# การศึกษาผลกระทบของสถานะความชื้นและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบธรรมชาติและรีไซเคิลต่อค่าการยุบตัวและกำลังอัดของคอนกรีต

นายอภิรักษ์ มาตรนอก

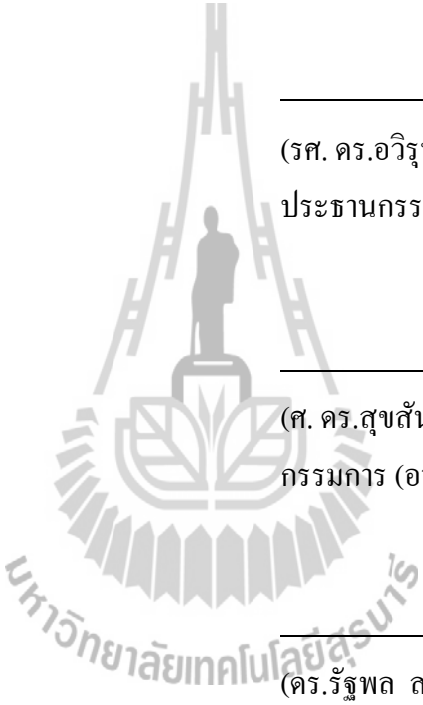
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

# การศึกษาผลกระทบของสถานะความชื้นและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบธรรมชาติและรีไซเคิลต่อค่าการยุบตัวและกำลังอัดของคอนกรีต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงงาน



(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)
ประธานกรรมการ

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน)

(ดร.รัฐพล สมนา)
กรรมการ

(รศ. ดร.วชรภูมิ เบญจโอพาร)
กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อภิรักษ์ มาตรนอก : การศึกษาผลกระทบของสถานะความชื้นและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบธรรมชาติและรีไซเคิลต่อค่าการยุบตัวและกำลังอัดของคอนกรีต (A STURY OF EFFECT OF MOISTURE STATES AND ABSORPTION OF NATURAL AGGREGATES AND RECYCLED COARSE AGGREGATES ON SLUMP AND COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร. สุขสันติ์ หอพิบูลสุข

การศึกษานี้ ศึกษาถึงผลกระทบของสภาวะความชื้นและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบธรรมชาติและมวลรวมหยาบรีไซเคิล ต่อค่าการยุบตัวและกำลังอัดของคอนกรีต โดยแบ่งสภาวะความชื้นของมวลรวมหยาบเป็น 2 สภาวะ คือ สภาวะแห้งในอากาศและสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง และใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติ (หินปูนย่อย) ในอัตราส่วนร้อยละ 25 และ 100 โดยปริมาตร ทำการทดสอบค่าสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด และทดสอบค่ากำลังอัด ค่าความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคพัลส์ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศมีค่าการยุบตัวเริ่มต้นที่มากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง และมีค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงแรก โดยเฉพาะคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ ส่วนกำลังอัดพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ เนื่องจากใช้ปริมาณน้ำน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ ค่าความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคพัลส์ไม่ได้รับผลกระทบจากสภาวะความชื้นของมวลรวมหยาบ แต่การใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลส่งผลต่อค่าความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคพัลส์ลดลง เนื่องจากรอยร้าวของมวลรวมหยาบรีไซเคิลเป็นการเพิ่มเวลาในการเดินทางของคลื่นที่ระยะทางเท่าเดิม ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตไม่ขึ้นกับสภาวะความชื้นของมวลรวมหยาบ โดยตรงแต่ขึ้นกับค่ากำลังอัดของคอนกรีต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ปีการศึกษา 2555 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม_____

APIRUK MARTNOK : A STUDY OF EFFECT OF MOISTURE STATES AND ABSORPTION OF NATURAL AGGREGATES AND RECYCLED COARSE AGGREGATES ON SLUMP AND COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE. ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., P.E.

The research studies, the effect of moisture states and absorption of natural and recycled coarse aggregates on slump and compressive strength of concrete. Effect of two moisture states of both aggregates, air-dried state and saturated surface dry state, were investigated. Recycled coarse aggregate was used to replace crashed limestone at 25 and 100 percent by volume. Slump loss of fresh concrete with two types of aggregate was determined. The compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and modulus of elasticity of hardened concrete were also determined. The results reveals that concrete samples using coarse aggregates in air- dried state, especially recycled coarse aggregates, have higher initial slump and faster slump loss in the first- hour than those in saturated surface dry state. The coarse aggregates in saturated surface dry state give higher compressive strength than those. The moisture states of aggregate do not affect the ultrasonic pulse velocity of concrete but the replacement of crushed limestone by recycled aggregate reduces the ultrasonic pulse velocity. The cracks on cement paste of the recycled coarse aggregate increases the distance for wave travel passing through concrete. The modulus of elasticity of concrete was not directly depended on the moisture states of recycled coarse aggregate but depended on the strength of concrete

School of Civil Engineering
Academic Year 2012

Student's Signature _____
Advisor's Signature _____
Co-Advisor's Signature _____

# กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สุขสันติ์ หอพิบูลสุข และ ดร.รัฐพล สมนา อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าให้คำปรึกษา ให้คำสอน ข้อชี้แนะ ข้อแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ในทุกขั้นตอนของการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ตลอดมา ขอขอบคุณกรรมการสอบทุกท่าน ซึ่งอาจารย์ รองศาสตราจารย์ ดร.วชรภูมิ เบญจโอพาร รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ที่สละเวลาอันมีค่ามาสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่ซึ่งเป็นประโยชน์ ขอขอบคุณ อาจารย์ ศักดิ์สิทธิ์ พันธ์ทวี ที่ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาครั้งนี้ ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือรวมถึงอุปกรณ์ในการทำ

ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาของผู้วิจัยซึ่งได้ให้กำเนิด ให้การอุปการะเลี้ยงดูผู้ศึกษา โดยให้คำสั่งสอน แนวคิดและการปฏิบัติตัวทำให้ผู้วิจัยมีวันนี้ รวมถึงหลาย ๆ กำลังใจจากญาติพี่น้อง เพื่อน ๆ ทุกท่านที่เป็นกำลังใจอย่างยิ่ง ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นสถาบันการศึกษาที่เปิดหลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ทำให้ผู้วิจัยได้มาเข้ามาศึกษาจนสำเร็จในวันนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้ทุกท่าน ที่ไม่ได้เอ่ยนามและหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเสริมสร้างความรู้ และความเข้าใจ ตลอดจนส่งเสริมการรีไซเคิลเศษคอนกรีตแทนมวลรวมจากธรรมชาติ ซึ่งจะช่วยลดปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากปริมาณคอนกรีตที่เหลือใช้จำนวนมากที่ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ มาเป็นสิ่งที่มีประโยชน์และสร้างคุณค่าในงานคอนกรีตต่อไป

อภิรักษ์ มาตรนอก

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ช

สารบัญรูปภาพ ..... ซ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ญ

บทที่

1 บทนำ ..... 1

1.1 ความเป็นมา ..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ..... 3

1.3 ขอบเขตของการวิจัย ..... 3

1.4 เนื้อหาของงานโครงงาน ..... 4

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 6

2.1 มวลรวมจากเศษคอนกรีต ..... 6

2.2 ปัญหาของการใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตในคอนกรีต ..... 6

2.3 ขนาดของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ..... 7

2.4 ความหนาแน่น ..... 9

2.5 การดูดซึมน้ำ ..... 10

2.6 ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เกาะที่ผิวของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ..... 11

2.7 การพัฒนาคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษ คอนกรีตด้วยวัสดุปอซโซลาน ..... 13

2.8 คอนกรีตสด ..... 14

2.9 ค่ายุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด ..... 15

2.10 กำลังอัด ..... 16

2.11 โมดูลัสความยืดหยุ่น ..... 18

2.12 การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ..... 19

2.13 ความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ 22
2.14 การนำมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตหรือวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ 24
2.15 งานวิจัยที่ผ่านมา 26
3 วิธีดำเนินงานวิจัย 31
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา 31
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา 31
3.3 วิธีการศึกษา 34
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างวัสดุ 34
3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา 36
3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว 36
3.3.4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตและการออกแบบส่วนผสม 38
3.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา 40
4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล 41
4.1 คุณสมบัติจำเพาะของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต 41
4.2 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีต 43
4.3 กำลังอัดของคอนกรีต 44
4.3.1 ผลกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ 44
4.3.2 ผลกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง 46
4.3.3 การเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศและสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง 47
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของกำลังอัดและอัตราความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคของคอนกรีต 49
4.5 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต 51
5 สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ 53
5.1 สรุปผลการทดสอบ 53
5.2 ข้อเสนอแนะ 54

เอกสารอ้างอิง ..... 55
ภาคผนวก ก ตารางและรูปแสดงคุณสมบัติจำเพาะของมวลรวม ..... 57
ภาคผนวก ข ตารางและรูปแสดงผลการทดสอบค่าการยุบตัวกำลังอัดและ อัตราความเร็ว
คลื่นอัลตราโซนิค พัลส์ ..... 64
ภาคผนวก ค รูปแสดงผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ..... 71
ประวัติผู้เขียน ..... 78

# สารบัญตาราง


ตารางที่ หน้า

2.1 ความหนาแน่นของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและจากธรรมชาติ 9

2.2 ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมจากงานวิจัยที่ผ่านมา 11

2.3 ค่าการสึกกร่อนที่ทดสอบด้วยเครื่องลอสแองเจอลิสจากงานวิจัยที่ผ่านมา 13

2.4 โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต เมื่อเทียบกับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ 18

2.5 การจำแนกประเภทของมวลรวมหยาบที่ใช้ 24

2.6 คุณลักษณะการจำแนกมวลรวมที่ใช้แล้ว 25

2.7 ข้อกำหนดคุณสมบัติทางเคมีเพิ่มเติมของมวลรวมหยาบที่ใช้แล้ว 26

2.8 กำลังอัดที่ยอมให้เมื่อคอนกรีตใช้มวลรวมหยาบที่ใช้แล้วเป็นส่วนผสมและแนวทางในการนำเอาไปใช้ในงาน 26

3.1 อัตราส่วนผสมคอนกรีต 39

4.1 คุณสมบัติจำเพาะของมวลรวม 41

4.2 ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต 42

4.3 กำลังอัดของคอนกรีต 45

4.4 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน 51


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญรูปภาพ


รูปที่ หน้า

2.1 การกระจายขนาดของมวลละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเปรียบเทียบกับกรอบมาตรฐาน ASTM C33 กำหนด 8

2.2 การกระจายขนาดของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเปรียบเทียบกับค่าที่มาตรฐาน ASTM C33 กำหนดไว้ 8

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดและค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของคอนกรีต 20

2.4 ตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบหาระยะคลอไรด์แทรกซึม 22

2.5 ความลึกคลอไรด์แทรกซึมของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นระยะเวลา 18 เดือน 23

3.1 ตะแกรงวิเคราะห์ขนาดมวลรวม 32

3.2 เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าอ่านได้ละเอียด 0.01 กรัม 32

3.3 ชุดเครื่องมือหาค่าความถ่วงจำเพาะ 32

3.4 ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ 105-115 องศาเซลเซียส 33

3.5 ชุดทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต 33

3.6 แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15×15×15 ซม. และ แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาด 0.15 × 0.30 ซม 33

3.7 เครื่องผสมคอนกรีต 34

3.8 เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต 34

3.9 มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต 35

3.10 เครื่องมือย่อยเศษคอนกรีต 35

3.11 เครื่องทดสอบอัตราความเร็วคลื่นด้วยวิธี Ultrasonic Pulse Velocity Test (UPV) 37

3.12 ตัวอย่างทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 38

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตกับระยะเวลา 44

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของคอนกรีต 46

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งและร้อยละการแทนที่ของมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต 48

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคพัลส์และกำลังอัดของคอนกรีต 49


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคพัลส์และกำลังอัดของคอนกรีต
ที่จัดแยกเป็น 2 กลุ่ม ..... 50
4.6 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่
มวลรวมหยาบที่ได้จากหินปูนย่อย ..... 52

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| | | |
|---|---|---|
| ASTM | = | American Society of Testing and Materials |
| ACI | = | American Concrete Institute |
| $Ca(OH)_2$ | = | Calcium hydroxide |
| UPV | = | Ultrasonic Pulse Velocity |
| AD | = | Air- Dried |
| SSD | = | Saturated Surface-Dried |
| AR | = | Air- dried Recycle aggregate |
| SSR | = | Saturated Surface-dried Recycle aggregate |
| $kg/m.^3$ | = | กิโลกรัม / ลูกบาศก์เมตร |
| $กก./ซม.^2$ | = | กิโลกรัม / ตารางเซนติเมตร |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมา

การเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคมทำให้สิ่งก่อสร้าง เช่น อาคาร ถนน และโครงสร้างพื้นฐานเกิดขึ้น อย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปคอนกรีตเป็นวัสดุโครงสร้างที่นิยมใช้กันอย่างมากในประเทศไทยเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุก่อสร้างอื่น เช่น อิฐ ไม้ และเหล็ก เมื่อถึงเวลาสิ่งก่อสร้างชำรุดหมดอายุใช้งาน หรือต้องการเปลี่ยนลักษณะการใช้ จะมีการรื้อถอนเพื่อสร้างสิ่งก่อสร้างใหม่ทดแทน ทำให้เศษวัสดุก่อสร้างจากการทำลายสิ่งก่อสร้างไม่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจและถูกขนย้ายไปกำจัด

คอนกรีตประกอบด้วย ปูนซีเมนต์,มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด และน้ำ พบว่าไม่ต่ำกว่าสามในสี่ส่วนของปริมาตรคอนกรีตทั้งหมด ดังนั้น คุณภาพของมวลรวมจึงมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งสภาพที่เป็นคอนกรีตสดและสภาพที่เป็นคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ตลอดจนคุณสมบัติของคอนกรีตด้วย ในปัจจุบันแหล่งมวลรวมธรรมชาติที่มีคุณภาพดีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความต้องการใช้งานคอนกรีตที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นสูงตามอัตราการเจริญเติบโตของธุระกิจทางด้านอุตสาหกรรมก่อสร้าง ข้อมูลจากกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่พบว่าในปี พ.ศ.2542 ประเทศไทยมีปริมาณการใช้หินปูนในงานก่อสร้างประมาณ 16.5 ล้านตัน และมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยในปี พ.ศ. 2543 มีปริมาณการใช้หินปูนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 33.9 ล้านตัน และ 49.7 ล้านตันตามลำดับ

เมื่อมีการก่อสร้างและมีการรื้อถอนสิ่งก่อสร้าง ทำให้มีเศษคอนกรีตที่ไม่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ปัจจุบันได้มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาถึงการนำเศษคอนกรีตที่ได้จากการรื้อถอนหรือทำลายสิ่งปลูกสร้างมาย่อยเพื่อนำกลับมาใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมของคอนกรีต เช่น Tavakoli และ Sorousshin พบว่ามวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตจากสถานที่รื้อถอนจริงสามารถใช้เป็นวัสดุที่มีคุณภาพในการทำคอนกรีตได้นอกจากนี้ De Oliveria และ Vazquez (1996) ศึกษาถึงอิทธิพลของความชื้นของมวลรวมรีไซเคิลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมรีไซเคิลที่อยู่ในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวลดลงเล็กน้อย คอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตผสมเสร็จที่นำมาย่อย ส่วนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตเดิมอยู่ประมาณร้อยละ 75 ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทั่วไป, Ravindrajah และ Tam (1985) พบว่าคุณภาพของมวลรวมรีไซเคิลขึ้นอยู่กับกำลังและการเสียรูปของคอนกรีตเดิม โดยมวลรวมรีไซเคิลมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กว่า และมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าหินแกรนิตย่อย (มวลรวมธรรมชาติ) นอกจากนี้ยังพบว่าความต้านทานต่อการกระแทก การย่อย และการขัดสีของมวลรวมหยาบรีไซเคิลต่ำกว่าหินแกรนิตย่อย เมื่อนำมวลรวมรีไซเคิลมาใช้แทนที่มวลรวมจากธรรมชาติ ในการผสมคอนกรีตพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลงถึงร้อยละ 25 และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าลดลงถึงร้อยละ 30, ในปี ค.ศ. 2002 Limbachiya และคณะ ศึกษาถึงการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลในคอนกรีตกำลังสูง มวลรวมหยาบธรรมชาติและมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นหินกรวด มวลรวมรีไซเคิล ที่ได้มาจากการย่อยเศษคอนกรีตจากชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปที่ไม่ผ่านมาตรฐานมวลรวมรีไซเคิลที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าสูงการดูดซึมน้ำเป็นสองเท่าของมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ พบว่าการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติไม่เกินร้อยละ 30 ไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีต แต่ถ้าใช้ในปริมาณมากกว่านี้จะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงและทำให้คอนกรีตมีความพรุนตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้สรุปไว้ว่ามวลรวมหยาบรีไซเคิลสามารถนำมาใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงโดยคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของคอนกรีต เช่น กำลังอัด กำลังรับแรงดัด และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ยังคงเป็นที่น่าพอใจหลังจากนั้น Poon และคณะ (2004) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของสภาวะความชื้นของมวลรวมธรรมชาติและมวลรวมรีไซเคิ้ลต่อค่าการยุบตัวและกำลังอัดของคอนกรีต พบว่าสภาวะความชื้นของมวลรวมส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด โดยสรุปได้ว่าการใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะผิวแห้งในอากาศแทนที่มวลรวมธรรมชาติไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักในส่วนผสมคอนกรีตเหมาะสมสำหรับการผลิตคอนกรีตรีไซเคิลกำลังปกติ, Etxeberria และคณะ (2007) ศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณมวลรวมรีไซเคิลและขั้นตอนการผลิต ต่อคุณสมบัติของคอนกรีตรีไซเคิลซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 (ใช้ปูนซีเมนต์เท่ากับ 325 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) จากผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมหยาบรีไซเคิลทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 20 ถึง 25 ซึ่งเป็นผลจากมอร์ต้าร์ที่ติดอยู่ในมวลรวมรีไซเคิลมีกำลังที่ต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติและเพสต์ที่ผสมใหม่ ดังนั้นจุดอ่อนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ใช้เพสต์ที่มีกำลังปานกลางถึงสูงจะขึ้นอยู่กับกำลังของมวลรวมหยาบรีไซเคิลหรือมอร์ต้าร์ที่ติดอยู่ในมวลรวมรีไซเคิล สำหรับคอนกรีตกำลังปานกลางที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลร้อยละ 50 และ 100 โดยน้ำหนักของมวลรวมหยาบธรรมชาติเพื่อให้ได้กำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่าใกล้เคียงคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ ทำได้โดยการลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ประสิทธิผลร้อยละ 4 ถึง 10 และการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 ถึง 10

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามวลรวมรีไซเคิลมีการค่าดูดซึมน้ำที่สูง เนื่องจากการที่มวลรวมรีไซเคิลมีเศษมอร์ต้าเก่าที่มีความพรุนทำให้ต้องมีการชดเชยน้ำในการผสมเพื่อให้มวลรวมรีไซเคิลมีความชื้นอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง เมื่อต้องมีการชดเชยน้ำเนื่องจากการดูดซึมของมวลรวมรีไซเคิล เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำที่จะทำปฏิกิริยาตามที่คำนวนออกแบบไว้ จึงทำให้มีปริมาณน้ำอิสระในช่วงแรกของการผสมมากกว่าที่ต้องการ ถ้าการดูดซึมน้ำของมวลรีไซเคิลจนได้สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเกิดขึ้นช้ากว่าเวลาที่ใช้ในการผสม จะส่งผลทำให้ปริมาณน้ำอิสระในส่วนผสมมากกว่าที่คำนวนออกแบบไว้ อาจส่งผลกระทบต่อค่าการยุบตัว การเยิ้มน้ำ กำลังอัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต พบว่ายังไม่มีงานวิจัยที่แสดงถึงผลของความชื้นหรือปริมาณน้ำส่วนที่ชดเชยในส่วนผสมต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดและที่แข็งตัวแล้ว ในการศึกษาการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมาใช้ในงานคอนกรีต

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาถึงผลกระทบของความชื้นของมวลรวมต่อค่าการยุบตัว กำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเป็นมวลรวม เพื่อเป็นการนำมวลรวมหยาบรีที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในงานก่อสร้าง อีกทั้งยังเป็นการจัดการสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่ง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลกระทบของความชื้นของมวลรวมหยาบธรรมชาติและมวลรวมหยาบรีไซเคิลต่อค่าการยุบตัว การพัฒนากำลังอัด และ

โมดูลัสยืดหยุ่น ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตการทำงานไว้เป็นข้อ ดังนี้

1.3.1 ปูนซีเมนต์ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม

1.3.2 มวลรวมหยาบได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและหินปูนย่อย ที่มีขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว หรือไม่เกิน 19 มม.

1.3.3 มวลรวมละเอียดได้จากทรายแม่น้ำ มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือสามารถลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4แต่ไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร หรือ ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200

1.3.4 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลประกอบด้วย

1.3.4.1 คอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตคอนกรีตแทนที่หินปูนจากธรรมชาติในอัตราส่วน 0 เปอร์เซนต์

1.3.4.2 คอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตคอนกรีตแทนที่หินปูนจากธรรมชาติในอัตราส่วน 25 เปอร์เซนต์

1.3.4.3 คอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตคอนกรีตแทนที่หินปูนจากธรรมชาติในอัตราส่วน 100 เปอร์เซนต์

โดยศึกษาถึงคอนกรีตที่ 2 สภาวะ ได้แก่ สภาวะแห้งในอากาศ และสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งมีการแทนที่มวลรวมหยาบที่ได้จากธรรมชาติด้วยมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร้อยละ 25 และ 100

1.3.5 เก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ตามมาตรฐานอังกฤษ BS 1881 : PART3 สัดส่วนผสมโดยปริมาตร โดยใช้อัตราส่วนผสม ปูน:ทราย:มวลรวมหยาบ 1 : 2 : 4 และค่ายุบตัว (Slump) ระหว่าง 5 ถึง 10 มิลลิเมตร

1.3.6 ทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อยู่ในการบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วันตามมาตรฐานอังกฤษ BS 1881 : PART4

1.3.7 ทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน

1.3.8 ทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต ทุกๆ 15 นาที

1.3.9 ทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตที่อยู่ในอายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน ด้วยเครื่องอุลตร้าโซนิค

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## 1.4 เนื้อหาของงานโครงงาน

เนื้อหาของงานวิทยานิพนธ์ แบ่งออกเป็น 5 บท ประกอบด้วย

บทที่ 1 กล่าวถึง ความเป็นมา จุดประสงค์ และขอบเขตการศึกษาของงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมาของการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ในงานโครงสร้างทั่วไป

บทที่ 3 กล่าวถึง วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ การเตรียมวัสดุ การทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของวัสดุ และทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

บทที่ 4 กล่าวถึง ผลและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

บทที่ 5 เป็นการสรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะที่น่าสนใจและประโยชน์สำหรับการพัฒนาการนำมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมาใช้ร่วมกับมวลรวมธรรมชาติ ต่อไป

# บทที่ 2
# ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมาของการใช้มวลรวมรีไซเคิลที่ใช้เป็นส่วนผสมในงานคอนกรีต

## 2.1 มวลรวมจากเศษคอนกรีต (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี 2553)

มวลรวมจากเศษคอนกรีต หรือ Recycled Concrete Aggregate ตามคำจำกัดความของ (ว.ส.ท. 1014 ,25) หมายถึง มวลรวมที่เคยใช้แล้วซึ่งประกอบด้วยวัสดุก่อสร้างจากคอนกรีตที่แตกหรือวัสดุเหลือใช้จากการรื้อสิ่งก่อสร้าง ซึ่งอาจเป็นมวลรวมหยาบหรือมวลรวมละเอียดเนื่องจากมวลรวมที่ได้จากเศษคอนกรีต เป็นมวลรวมที่ทำขึ้นจากการย่อยคอนกรีตที่มาจากการรื้อทิ้งหรือย่อยคอนกรีตที่มีคุณภาพต่ำกว่ากำหนด (ที่ต้องนำไปทิ้ง) หรือย่อยคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว จนมีขนาดพอๆ กับมวลรวมทั่วไปที่ใช้ในงานคอนกรีต ดังนั้นมวลรวมที่ได้จากเศษคอนกรีตจึงเป็นมวลรวมที่มีคุณภาพที่ต่ำกว่ามวลรวมที่ได้จากการย่อยหินตามธรรมชาติ เพราะมีการดูดน้ำที่สูงมีความแข็งแกร่งต่ำ สึกหรอได้ง่ายเมื่อเทียบกับมวลรวมที่ได้จากธรรมชาติ นอกจากนี้เมื่อนำมวลรวมที่ได้จากเศษคอนกรีตไปเป็นส่วนผสมในคอนกรีตพบว่าคุณภาพของคอนกรีตมักต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้หินย่อยจากธรรมชาติเป็นส่วนผสม ดังนั้นการเข้าใจถึงปัญหาและอุปสรรคของการใช้ มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตจะทำให้สามารถนำมวลรวมจากเศษคอนกรีตมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่ก่อให้เกิดปัญหาตามมาในภายหลัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## 2.2 ปัญหาของการใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตในคอนกรีต (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี 2553)

ในการผลิตมวลรวมจากเศษคอนกรีต หากคอนกรีตได้มาจากการรื้อถอนเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กต้องมีการแยกเหล็กออกจากเนื้อคอนกรีตเสียก่อน หลังจากนั้นจึงนำเศษคอนกรีตมาย่อยด้วยเครื่องย่อยอีกที เมื่อทำการย่อยเศษคอนกรีตแล้วต้องทำการแยกขนาดด้วยตะแกรงเพื่อแยกมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดออกจากกัน โดยใช้ตะแกรงขนาดช่องเปิด 4.75 มม. (หรือตะแกรงเบอร์ 4) ในบางครั้งอาจต้องทำความสะอาดมวลรวมดังกล่าวโดยการล้างด้วยน้ำเพื่อขจัดฝุ่นหรือสิ่งสกปรกบางอย่างที่อาจปะปนมาและเป็นอันตรายต่อคอนกรีต เช่น เศษดิน ซากใบไม้ พืชเน่า เป็นต้น

มวลรวมจากเศษคอนกรีตมักมีลักษณะและคุณภาพที่ต่างจากมวลรวมที่ได้จากธรรมชาติ โดย ทั่วไป มักมีคุณภาพที่ด้อยกว่า ไม่ว่าจะเป็นเรื่องขนาด ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ ร้อยละการสึกกร่อนจากการขัดสี เป็นต้น นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมดังกล่าวในส่วนผสมมักมี

คุณสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ เช่น ด้านกำลังอัด โมดูลัสความยืดหยุ่น กำลังดึง และการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

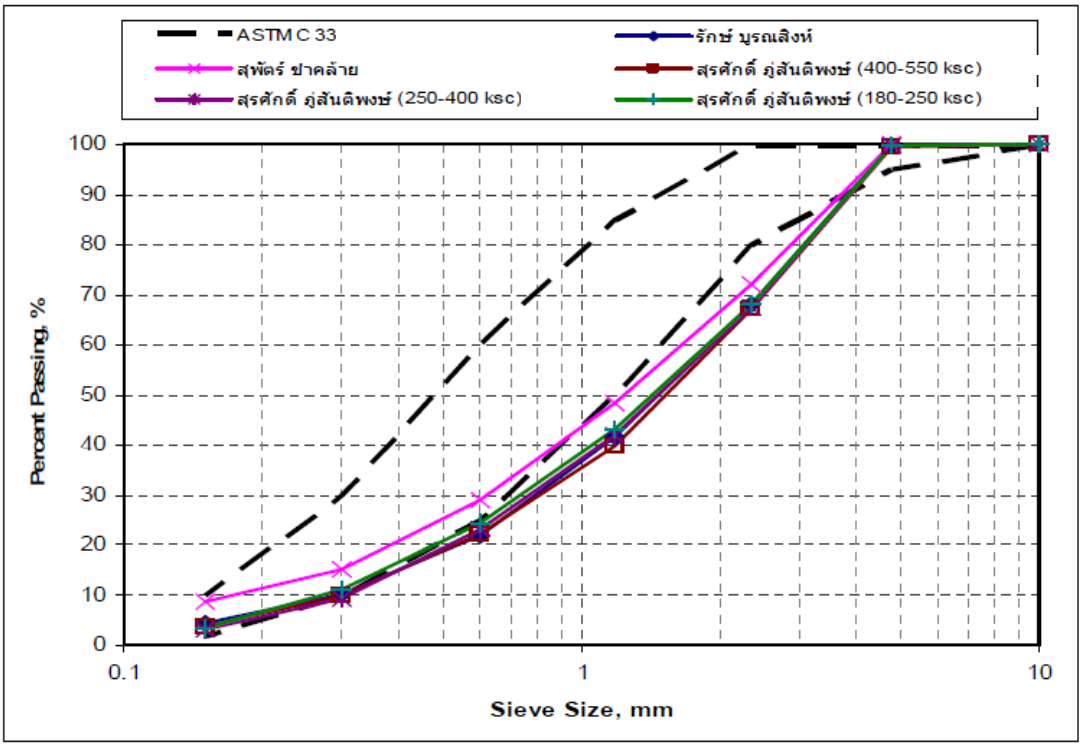
**2.3 ขนาดของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี 2553)**

กรณีของมวลรวมละเอียดพบว่ามวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตโดยใช้เครื่องย่อยชนิด Swing Hammer และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม. (ตะแกรงเบอร์ 4) มีความเป็นเหลี่ยมมุมสูง รูปร่างไม่แน่นอน และมีขนาดโดยเฉลี่ยใหญ่กว่าทรายแม่น้ำอยู่ค่อนข้างมาก (ดูรูปที่2.1) มวลรวมละเอียดดังกล่าวนอกจากประกอบด้วยส่วนที่เป็นซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์จากเศษคอนกรีตเดิมแล้ว ยังประกอบด้วยส่วนที่แตกของหินปูนย่อยจากกระบวนการย่อยซ้ำซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 4.75 มม. ดังนั้นมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตจึงค่อนข้างหยาบกว่าทรายแม่น้ำ สำหรับการกระจายขนาดมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตจากงานวิจัยโดยส่วนใหญ่พบว่ามีการกระจายขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ และอาจไม่สอดคล้องกับขนาดคละที่แนะนำโดย

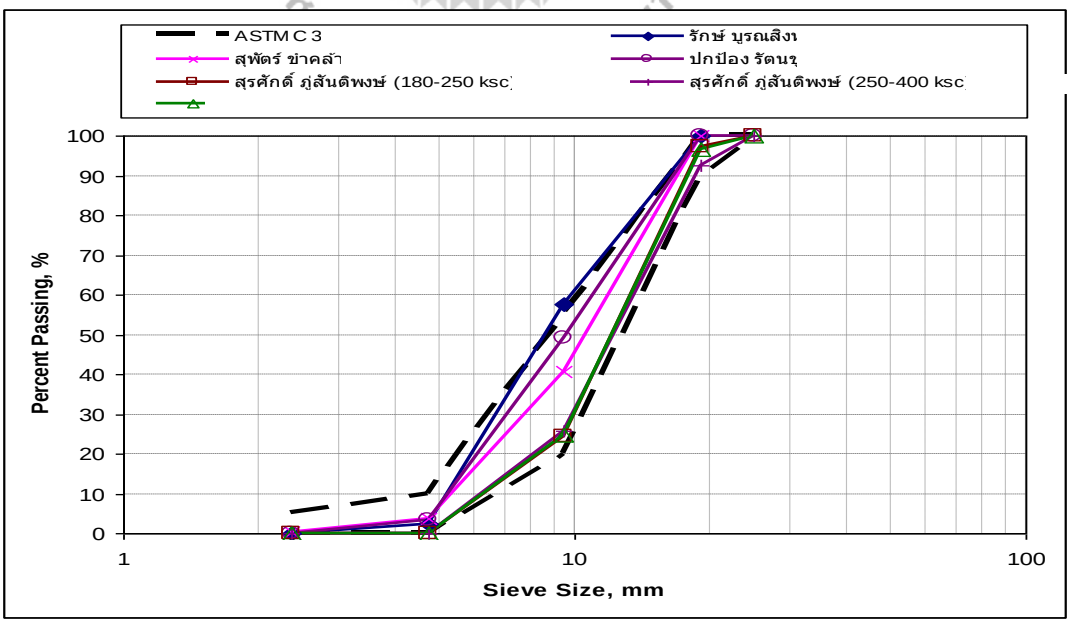
เมื่อพิจารณารูปที่ 2.2 พบว่าขนาดของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่อยู่ในช่วง 0.6 ถึง 2.36 มม. มีปริมาณสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C33 กำหนดไว้ หรือมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีขนาดโดยส่วนใหญ่โตกว่าขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมละเอียดที่มาตรฐาน ASTM C33 กำหนดไว้ ดังนั้นการนำมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตมาใช้ในส่วนผสมคอนกรีตจึงต้องใช้ร่วมกับทรายที่มีความละเอียดมาก (ขนาดเล็ก) เพื่อให้ขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตอยู่ในขอบเขตที่มาตรฐาน ASTM C33 กำหนดไว้ ซึ่งทำให้ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตดีขึ้นด้วย

สำหรับขนาดของมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตที่แสดงดังรูปที่ 2.3 มีขนาดไม่แตกต่างจากขนาดของหินปูนย่อยจากธรรมชาติมากนัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดช่องเปิดของเครื่องย่อยว่าได้ตั้งขนาดใหญ่สุดของมวลรวมไว้เท่าไร ความแตกต่างระหว่างมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและหินปูนย่อยทั่วไปคือ มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์เกาะติดอยู่ที่ผิวมวลรวมจากธรรมชาติเดิม (หินปูนย่อย) และบางส่วนของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตก็คือซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์ที่แตกออกมาและมีขนาดอยู่ในขนาดของมวลรวมหยาบ สำหรับขนาดของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตจากงานวิจัยที่ผ่านมาเปรียบเทียบกับขนาดของมวลรวมหยาบที่มาตรฐาน ASTM C33 กำหนดไว้ แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งพบว่ามวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีขนาดโดยส่วนใหญ่อยู่ในขอบเขตที่ ASTM C33 กำหนดไว้ และกล่าวได้ว่าขนาดของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษ

คอนกรีตมีขนาดคละที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในส่วนผสมคอนกรีตได้ดีกว่ากรณีของมวลรวมละเอียด




รูปที่ 2.1 การกระจายขนาดของมวลละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเปรียบเทียบ กับกรอบมาตรฐาน ASTM C33 กำหนด (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี 2553)




รูปที่ 2.2 การกระจายขนาดของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเปรียบเทียบ กับค่าที่มาตรฐาน ASTM C33 กำหนดไว้ (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี 2553)

**2.4 ความหนาแน่น (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี 2553)**

ความหนาแน่นของมวลรวมเป็นค่าที่ใช้ในการประเมินความหนาแน่นของคอนกรีต เพื่อใช้ในการคำนวณน้ำหนักของคอนกรีต ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความหนาแน่นของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาจำนวน 10 ชิ้น พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 2,200 ถึง 2,550 กก/ม$^3$ ซึ่งต่ำกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติที่มีค่าอยู่ระหว่าง 2,500 ถึง 2,860 กก/ม$^3$ ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์เกาะติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมจากธรรมชาติเดิม ซึ่งซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์ที่เกาะอยู่มีความพรุน มีความหนาแน่นต่ำ เมื่อมาเกาะติดอยู่กับมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตจึงทำให้มวลรวมดังกล่าวมีความหนาแน่นลดลงตามไปด้วย

ความหนาแน่นของมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตที่กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงมักมีค่าความหนาแน่นที่สูงกว่ามวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังอัดที่ต่ำกว่าเนื่องจากคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงมีค่าความหนาแน่นที่สูงกว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดที่ต่ำกว่านอกจากนี้ยังขึ้นกับความหนา แน่นของมวลรวมที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตเดิมด้วย กล่าวคือถ้าคอนกรีตเดิมใช้มวลรวมที่มีความหนาแน่นสูง เมื่อนำมาย่อยซ้ำเป็นมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตย่อมมีค่าความหนาแน่นที่สูงขึ้นด้วย จากการประมาณพบว่าสามารถใช้ความหนาแน่นของมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นร้อยละ 90 ของความหนาแน่นของมวลรวมจากธรรมชาติ แต่หากใช้ในการประมาณค่าความหนาแน่นของคอนกรีตเพื่อใช้ในการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถใช้ความหนาแน่นของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเท่ากับความหนาแน่นของคอนกรีตทั่วไปคือเท่ากับ 2,400 กก/ม$^3$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.1 ความหนาแน่นของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและจากธรรมชาติ (รัฐพล สมนา และคณะ,ปี2553)

| References | ความหนาแน่น (กก/ม$^3$) | |
|---|---|---|
| | Recycled Concrete Aggregate | Natural Aggregate |
| Hansen and Narud | 2,340-2,490 | 2,500-2,620 |
| Lopez-Gayarre et al. | 2,200-2,360 | 2,680-2,690 |
| Salem and Burette | 2,550 | 2,670 |
| Tangchirapat et al. | 2,450 | 2,670 |
| รัฐพล สมนา และคณะ | 2,490 | 2,730 |

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

| References | ความหนาแน่น (กก/ม$^3$) | |
|---|---|---|
| | Recycled Concrete Aggregate | Natural Aggregate |
| สุพัตร์ ขำคล้าย และชัย จาตุรพิทักษ์กุล | 2,480 | 2,730 |
| สุรศักดิ์ ภู่สันติพงษ์ และคณะ | 2,390-2,450 | 2,710 |
| Etxeberria et al. | 2,430 | 2,670 |
| Limbachiya et al. | 2,400-2,410 | 2,600 |
| Rahal | 2,390 | 2,860 |

**2.5 การดูดซึมน้ำ (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี 2553)**

โดยทั่วไปค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบจากธรรมชาติมีค่าต่ำและต่ำกว่าค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดจากธรรมชาติ แต่ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าสูงกว่าของมวลรวมที่ได้จากการย่อยหินธรรมชาติอย่างมากซึ่งอาจมากกว่า 10 จนถึง 50 เท่า การที่ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติค่อนข้างมาก เนื่องจากมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์ที่เกาะอยู่ที่มวลรวมดังกล่าวซึ่งมีการดูดซึมน้ำที่สูง นอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากการดูดซึมน้ำของอนุภาคขนาดเล็กและฝุ่นที่มีปะปนมากับมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตอีกด้วย

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตจากงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งพบว่าค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 6.2 ถึง 12.1 โดยน้ำหนัก ซึ่งถือว่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดจากธรรมชาติซึ่งโดยทั่วไปมักมีค่าไม่เกินร้อยละ 1 ทั้งนี้เนื่องมาจากมอร์ต้าร์ที่แตกออกเป็นเศษเล็กๆ และมีความพรุน มีความสามารถดูดน้ำที่สูงกว่ามวลรวมละเอียดจากธรรมชาติจึงทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าสูงตามไปด้วย นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมายังพบว่าค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตไม่ขึ้นกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่นำมาย่อย

ตารางที่ 2.2 ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมจากงานวิจัยที่ผ่านมา (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี 2553)

| งานวิจัยของ | ร้อยละการดูดซึมน้ำ (%) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต | | มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ | |
| | Coarse | Fine | Coarse | Fine |
| Hansen and Narud | 3.8-5.0 | 8.7 | 0.8-1.8 | 3.7 |
| Lopez-Gayarre et al. | 3.80-5.00 | - | 0.22-0.27 | - |
| Salem and Burette | 4.70 | - | 0.30 | - |
| สุพัตร์ ขำคล้าย และชัย จาตุรพิทักษ์กุล | 4.55 | 6.46 | 0.45 | 0.91 |
| สุรศักดิ์ ภู่สันติพงษ์ และคณะ | 5.20 – 5.46 | 8.03-9.62 | 0.39 | 0.94 |
| Etxeberria et al. | 4.44 | - | 0.88 | - |
| Limbachiya et al. | 4.90-5.20 | - | 2.5 | - |
| Rahal | 3.47 | - | 0.68 | - |
| Ravindrajah and Tam | 5.7 | 6.2 | 0.3 | 0.6 |
| Tangchirapat et al. | 5.61 | 11.91 | 0.46 | 0.94 |
| B.C.S.J. | 3.6-8.0 | 8.3-12.1 | - | - |
| ปกป้อง รัตนชู และชัย จาตุรพิทักษ์กุล | 4.81 | - | 0.45 | - |
| Levy and Helene | 5.6 | 10.3 | 0.8 | 1.8 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## 2.6 ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เกาะที่ผิวของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี 2553)

มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ มวลรวมจากธรรมชาติและซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์ที่เกาะอยู่ที่ผิวของมวลรวม ซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์ที่ผิวของมวลรวมมีความพรุนสูงจึงทำให้มีการดูดซึมน้ำสูงส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว การหาปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เกาะที่ผิวของมวลรวมสามารถใช้วิธี Linear Transverse Method ตามมาตรฐาน ASTM C457 : Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete

Hansen และ Narud พบว่ามวลรวมหยาบที่มีขนาด 16-33 มม. ที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เพสต์เกาะที่ผิวร้อยละ 25-35 มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีขนาด 8-16 มม. มีปริมาณซีเมนต์เพสต์เกาะที่ผิวร้อยละ 40 และมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษ

คอนกรีตที่มีขนาด 4-8 มม. มีปริมาณซีเมนต์เพสต์เกาะที่ผิวร้อยละ 60 ส่วน Lopez - Gayarre และคณะ พบว่ามวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เพสต์เกาะที่ผิวร้อยละ 25 ถึง 35 แสดงให้เห็นว่ามวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีขนาดเล็กมีปริมาณซีเมนต์เพสต์เกาะที่ผิวมากกว่ามวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่า

Building Contractors Society of Japan - B.C.S.J. เสนอวิธีหาปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เกาะที่ผิวของมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต โดยนำมวลรวมหยาบไปแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริคที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นหาปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เกาะที่ผิวของมวลรวมหยาบโดยหาการสูญเสียน้ำหนักของมวลรวมหยาบ แต่ De Juan และ Gutierrez เห็นว่าการหาปริมาณซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์ที่เกาะที่ผิวของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตด้วยการใช้กรดไฮโดรคลอริค ในการทำการละลายซีเมนต์เพสต์ออกจากมวลรวมไม่สามารถใช้ได้กับมวลรวมหยาบที่เป็นหินปูน เพราะกรดไฮโดรคลอริคสามารถทำปฏิกิริยากับหินปูนทำให้ค่าที่ได้สูงกว่าความเป็นจริง นอกจากนี้ยังสรุปเพิ่มเติมว่าปริมาณของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์ที่เกาะอยู่ที่มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตจากงานวิจัยหลายๆ ชิ้นที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ให้ค่าที่ต่างกัน เช่น ทดสอบด้วยวิธีการใช้กรดไฮโดรคลอริคมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 25 ถึง 75 ทดสอบด้วยวิธีฉีดสีพบว่ามีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 25 ถึง 65 และทดสอบด้วยวิธีการให้ความร้อนมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึง 55 และทั้ง 3 วิธีพบว่าวิธีการให้ความร้อนมีความแตกต่างกันน้อยที่สุด

ปริมาณของซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์ที่เกาะอยู่ที่ผิวมวลรวมหยาบที่ได้จากการ ย่อยเศษคอนกรีต มีความสำคัญต่อคุณภาพของมวลรวมหยาบโดยตรง เพราะส่งผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของมวลรวมหยาบ เช่น ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น ความสามารถในการดูดซึมน้ำ ความสามารถต้านทานการสึกกร่อน และยังเป็นส่วนที่อาจมีสารเคมีที่เป็นอันตรายติดมาด้วย

ตารางที่ 2.3 ค่าการสึกกร่อนที่ทดสอบด้วยเครื่องลอสแองเจอลิสจากงานวิจัยที่ผ่านมา (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี 2553)

| งานวิจัยของ | ค่าการสึกกร่อนที่ทดสอบด้วยเครื่องลอสแองเจอลิส (%) | |
|---|---|---|
| | มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต | มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ |
| Hansen and Narud | 22.4 - 41.4 | 18.8 - 25.9 |
| Lopez-Gayarre et al. | 33.1 - 37.2 | 24.0 - 26.4 |
| รัฐพล สมนา และคณะ | 37.0 | 23.0 |
| สุพัตร์ ขำคล้าย และชัย จาตุรพิทักษ์กุล | 29.14 | 23.41 |
| สุรศักดิ์ และคณะ | 29.69 - 33.5 | 22.43 |
| Tangchirapat et al. | 33.08 | 21.70 |
| B.C.S.J. | 25.1 - 35.1 | - |
| Tavakoli and Soroushian | 26.40 – 42.69 | 22.87 |

ตารางที่ 2.3 พบว่าค่าการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 22.4 ถึง 42.69 โดยน้ำหนัก ส่วนของมวลรวมหยาบจากธรรมชาติมีค่าการสึกกร่อนอยู่ระหว่างร้อยละ 18.8 ถึง 26.4 โดยน้ำหนัก ค่าการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าสูงกว่าค่าการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบจากธรรมชาติเนื่องจากมวลรวมดังกล่าวได้ผ่านกระบวนการย่อยมาแล้ว ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของมวลรวมมีค่าลดลง รวมถึงเพสต์และมอร์ต้าร์ที่ติดอยู่ตามผิวของมวลรวมเดิมไม่มีความแข็งแรงพอที่จะต้านทานการกระแทกในขณะที่ทำการทดสอบได้ จึงแตกออกมาจนมีขนาดเล็กกว่าที่ต้องการ

## 2.7 การพัฒนาคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษ คอนกรีตด้วยวัสดุปอซโซลาน (รัฐพล สมนา และคณะ,ปี2553)

จากข้อมูลเบื้องต้นที่นำเสนอพบว่ามวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีคุณภาพและคุณสมบัติที่ต่ำกว่ามวลรวมที่ได้จากการย่อยหินที่ได้จากธรรมชาติโดยตรง ทั้งในเรื่องความแข็งแกร่ง การดูดซึมน้ำ รูปร่าง และอื่นๆ ดังนั้นการนำมวลรวมหยาบหรือมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตไปใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตจึงคาดหมายได้ว่าย่อมทำให้

คุณภาพของคอนกรีตต่ำลง และเป็นเหตุผลสำคัญที่วิศวกรหรือผู้รับผิดชอบที่โรงงานผสมคอนกรีตไม่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตในส่วนผสมของคอนกรีต

อย่างไรก็ตาม ในประเทศไทยเริ่มพบว่ามีการรื้อถอนอาคารคอนกรีต หรือมีคอนกรีตเหลือจากการทดสอบกำลังอัด หรือมีการทำลายคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีคุณภาพไม่ถึงเกณฑ์ที่กำหนด หรือมีการตัดหัวเสาเข็มตอกหรือหัวเสาเข็มเจาะคอนกรีตที่สูงเกินระดับที่ต้องการในการก่อสร้างอาคาร ทำให้มีคอนกรีตที่ต้องนำไปทิ้ง ซึ่งการทิ้งคอนกรีตเหล่านี้มีทั้งแบบทิ้งตามสภาพที่เกิดขึ้นของคอนกรีตหรือทิ้งกองรวมกันในบริเวณใดบริเวณหนึ่งที่เป็นที่ทิ้งโดยเฉพาะ ขณะที่หน่วยงานบางแห่งได้ลงทุนซื้อเครื่องจักรเพื่อทำการย่อยคอนกรีตเหล่านี้เพื่อนำเหล็กเสริมออกมาใช้ประโยชน์ และทำการย่อยเศษคอนกรีตให้มีขนาดเล็กลง และนำไปใช้เป็นวัสดุถมในการสร้างถนน ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นการนำเศษคอนกรีตกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้งหนึ่ง จากข้อมูลเบื้องต้นพบว่าโรงงานทำลายคอนกรีตสำเร็จรูปที่ไม่ได้คุณภาพแห่งหนึ่งมีคอนกรีตที่ต้องทำลายมากถึงปีละ 1 หมื่นกว่าตัน

วัสดุปอซโซลานหลายชนิด เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย หรือเถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น พบว่าเมื่อมีความละเอียดสูง ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ไม่มากจนเกินไป และมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสม สามารถพัฒนาคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติได้ดี ดังนั้นแนวคิดในการนำวัสดุปอซโซลานมาพัฒนาคุณภาพของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งในการลดจุดด้อยของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตในส่วนผสม โดยมีรายละเอียดที่นำเสนอดังต่อไปนี้

**2.8 คอนกรีตสด (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี2553)**

รักษ์ บูรณสิงห์ พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนทรายแม่น้ำหรือหินย่อยจากธรรมชาติใช้น้ำในการผสมคอนกรีตมากกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้หินหรือทรายโดย ทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนผสมที่ใช้มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่ทรายแม่น้ำ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีการดูดซึมน้ำสูงกว่าทรายแม่น้ำประมาณ 13 เท่า ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยของสุรศักดิ์ ที่พบว่าปริมาณน้ำที่ใช้จริงทั้งหมดสำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 113 ถึง 123 ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ และยังพบอีกว่าปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตที่ใช้มวล

รวมหยาบจากคอนกรีตที่มีกำลังอัดแตกต่างกัน (กำลังอัดของคอนกรีตระหว่าง 180-550 กก/ซม$^2$) แทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม ที่ต้องใส่เพิ่มเติมเพื่อทำให้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งขึ้นอยู่กับปริมาณและความสามารถในการดูดน้ำของมอร์ต้าร์ที่เกาะที่ผิวของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและปริมาณของฝุ่นที่ปะปนมา นั่นหมายความว่าเมื่อร้อยละการแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติด้วยมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเพิ่มขึ้นปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในขณะที่ผสมคอนกรีตการดูดซึมน้ำของมวลรวมดังกล่าวจึงทำให้คอนกรีตสูญเสียความสามารถในการเทอย่างรวดเร็ว เพื่อลดปัญหาการสูญเสียความสามารถในการเทได้หรือมีการยุบตัวลดลงอย่างรวดเร็ว จึงควรแช่มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตในน้ำเพื่อให้มวลรวมดังกล่าวดูดซึมน้ำประมาณ 5-10 นาที ก่อนทำการผสมคอนกรีต

**2.9 ค่ายุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี2553)**

ค่ายุบตัวของคอนกรีตเป็นค่าที่แสดงถึงความข้นเหลวของคอนกรีตและมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อ โดยทั่วไปคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวสูงมักสามารถเทเข้าแบบได้ง่ายกว่าคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวที่ต่ำกว่า ส่วนค่าการสูญเสียการยุบตัวของคอนกรีตเป็นค่าที่ทำให้ทราบถึงช่วงระยะเวลาที่สามารถทำงานคอนกรีตได้ เพราะหากคอนกรีตมีการสูญเสียค่ายุบตัวเร็วเกินไปอาจทำให้เทคอนกรีตเข้าแบบไม่ทัน โดยทั่วไปคอนกรีตที่ใช้ทั้งมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่ทรายหรือหินปูนย่อยมีการสูญเสียค่าการยุบตัวเร็วกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ (ทราย และ หินปูนย่อย)

เมื่อกำหนดให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่ทรายแม่น้ำร้อยละ 50 และ 100 โดยน้ำหนักและมีค่ายุบตัวเริ่มต้นเท่ากับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่ทรายแม่น้ำร้อยละ 50 และ 100 โดยน้ำหนักต้องใช้น้ำในส่วนผสมคอนกรีตมากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมวลรวมละเอียดที่ได้จากเศษคอนกรีตที่มีความเป็นเหลี่ยมมุมสูง ผิวหยาบ และมีการกระจายขนาดไม่สม่ำเสมอ ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดการขัดกันระหว่างอนุภาคของมวลรวม ส่งผลให้ความลื่นไหลในคอนกรีตลดลง นอกจากนี้การขาดหายไปของส่วนละเอียดเนื่องจากการแทนที่ด้วยมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้คอนกรีตสดมีความสามารถในการทำงานลดลง

โดยสรุปกล่าวได้ว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีการสูญเสียค่าการยุบตัวในระยะเวลาที่สั้นกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอนกรีตที่ใช้ทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตในส่วนผสมมีการสูญเสียค่าการยุบตัวค่อนข้างเร็วมาก ทั้งนี้เนื่องจากซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์ที่มีหรือที่เกาะอยู่ที่มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต จะดูดน้ำที่ใช้ในส่วนผสมเข้าไปอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตลดน้อยลง จึงทำให้คอนกรีตสูญเสียความสามารถในการเทได้ในระยะเวลาอันสั้น

**2.10 กำลังอัด (รัฐพล สมนา และคณะ,ปี2553)**

คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากย่อยเศษคอนกรีตทำให้กำลังอัดต่ำลงร้อยละ 13 ถึง 15 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมีแนวโน้มลดลงตามกำลังอัดของคอนกรีตที่นำมาย่อยเพื่อทำมวลรวมหยาบ นั่นคือคอนกรีตทำจากมวลรวมที่ได้จากการย่อยคอนกรีตที่มีกำลังอัด 400 กก/ซม$^2$ มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมที่ได้จากการย่อยคอนกรีตที่มีกำลังอัด 200 กก/ซม$^2$ เป็นต้น การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต ในส่วนผสมคอนกรีตมีดังต่อไปนี้

รักษ์ บูรณสิงห์ พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรงแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 35 ในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียดสามารถให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 60 วัน การใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีตที่ใช้ มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียดสามารถให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 7 วันขึ้นไป ส่วนการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมสามารถช่วยให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุต้นได้ดี โดยการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียดมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 7 วัน

ต่อมา ปกป้อง รัตนชู พบว่าการใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติประมาณร้อยละ 10 ที่อายุ 7 วัน และลดลงเหลือร้อยละ 4 ที่อายุ 90 วันเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ และเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินที่ได้จากระบบฟลูอิดไดซ์เบดบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถช่วยให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษ

คอนกรีตพัฒนากำลังอัดให้สูงขึ้นได้ถึงร้อยละ 98 ของกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่อายุ 90 วัน และมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน) ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กของเถ้าถ่านหิน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 4.5 ไมครอน) สามารถแทรกเข้าอุดช่องว่างต่างๆ ของเพสต์ ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีความแน่นมากขึ้นและอนุภาคที่มีขนาดเล็กของเถ้าถ่านหินทำให้การทำปฏิกิริยาสูงขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดได้อย่างรวดเร็วในช่วงอายุต้นและสามารถพัฒนาได้อย่างต่อเนื่องเมื่อคอนกรีต มีอายุมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของจตุพล ตั้งปกาศิต และคณะที่พบว่าวัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดสูงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่าวัสดุปอซโซลานที่หยาบกว่า

นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตและแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินที่ได้จากระบบฟลูอิดไดซ์เบดบดละเอียดไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงกว่าร้อยละ 90 ของกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ที่อายุ 90 วันได้ ในขณะที่การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม สามารถทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดได้ถึงร้อยละ 89 ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่อายุ 90 วัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงถึงร้อยละ 97 ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่อายุ 90 วัน นั่นแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปริมาณที่เหมาะสมช่วยพัฒนากำลังอัดให้มีค่าเกือบเท่ากับกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติได้

สุพัตร์ ขำคล้าย พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ใช้และไม่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ แต่การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตให้สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันทุกอายุการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด สามารถแทรกเข้าอุดช่องว่างต่างๆ ของเพสต์ ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น และอนุภาคที่มีขนาดเล็กของเถ้าปาล์มน้ำมันมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดได้อย่างรวดเร็วในช่วงอายุต้นและสามารถพัฒนากำลังได้อย่างต่อเนื่องเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น อย่างไรก็ตามการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณที่มากเกินไปทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลงตามปริมาณ

การแทนที่ ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตลดลง ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นน้อยลงและไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน

### 2.11 โมดูลัสความยืดหยุ่น (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี 2553)

ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีค่าต่ำกว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ เนื่องจากความแข็งแกร่งของมวลรวมมีค่าต่ำลงนั่นเอง ตารางที่ 2.4 แสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต เมื่อเทียบกับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ซึ่งพบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตอาจมีค่าต่ำกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติถึงร้อยละ 45

ตารางที่ 2.4 โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเมื่อเทียบกับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี 2553)

| งานวิจัยที่ผ่านมา | ร้อยละที่ต่ำกว่า |
|---|---|
| Ravindrarajah และ Tam [17] | $\leq 30$ |
| Hansen และ Boegh [30] | 15 -30 |
| Ravindrarajah et al. [31] | 35 |
| Xiao และคณะ [32] | 45 |
| Kheder และ Al-Windawi [33] | 20 – 25 |

สำหรับงานวิจัยในประเทศไทย รักษ์ บูรณสิงห์ รายงานว่าการใช้เถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตโดยตรง เถ้าถ่านหินที่บดละเอียด และเถ้าแกลบ - เปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน พบว่ามีผลกระทบต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตไม่มากนักเมื่อเทียบกับผลกระทบจากการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต โดยพิจารณาจากคอนกรีตที่มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 280 ถึง 570 กก/ซม$^2$ พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีแนวโน้มต่ำลงตามปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต และพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้มีค่าแตกต่างจากสมการของ ACI 318 และ ACI 363 ไม่เกินร้อยละ 15 และ 17 ตามลำดับ ต่อมา ปกป้อง รัตนชู พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินที่ได้จากระบบฟลูอิดไดซ์เบดบดละเอียดและเถ้าชานอ้อยบดละเอียด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มีผลต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมไม่มากนัก เมื่อเทียบกับผลกระทบจากการใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของรักษ์ บูรณสิงห์ นอกจากนี้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินบดละเอียดและเถ้าชานอ้อยบดละเอียดมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่แนะนำจากสมการของ ว.ส.ท. 1008 แต่ยังคงต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติประมาณร้อยละ 20

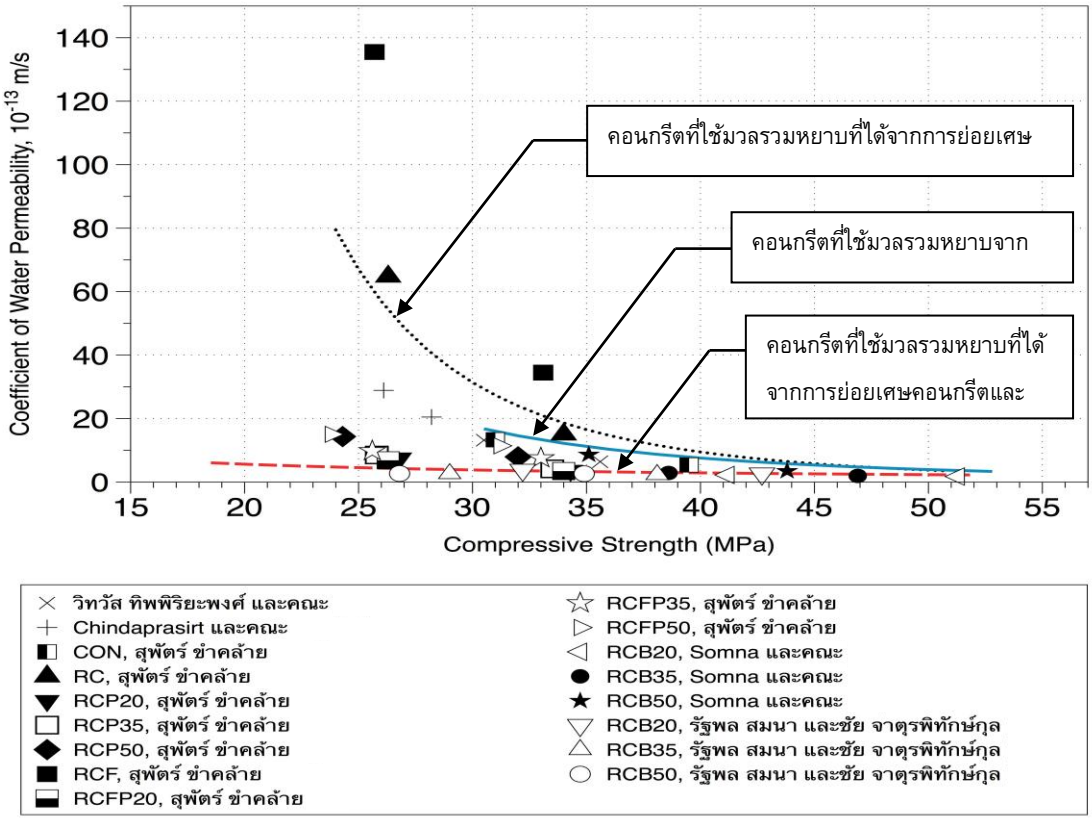
การใช้มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติ ส่งผลให้คอนกรีตมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าต่ำกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวมจากธรรมชาติ รวมถึงช่องว่างที่เกิดจากความพรุนของซีเมนต์เพสต์ที่เกาะอยู่ส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าต่ำกว่าของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ส่วนการใช้วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตพบว่ามีผลไม่มากต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

**2.12 การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (รัฐพล สมนา และคณะ,ปี2553)**

โดยทั่วไปหากคอนกรีตมีกำลังอัดที่เท่ากัน คอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ เนื่องจากมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีรูพรุนสูงกว่า รูปที่ 2.4 พบว่าค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติมีค่าอยู่ระหว่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ใช้และไม่ใช้วัสดุปอซโซลานในส่วนผสม โดยคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ไม่ใช้วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมมีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่สูงที่สุด ในทางกลับกันคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมมีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ต่ำที่สุด

สำหรับเส้นกราฟค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตจากงานวิจัยของ Somna และคณะ พบว่าเมื่อคอนกรีตดังกล่าวมีกำลังอัดสูงขึ้น ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมีค่าลดลง และเป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อคอนกรีตดังกล่าวมีกำลังที่ต่ำค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตนั้นมีค่าสูงขึ้นอย่างมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสุพัตร์ ขำคล้าย โดยในรูปที่ 2.4 ได้แสดงค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ซึ่งใช้สัญลักษณ์ RC และ RCF ตามลำดับ เปรียบเทียบกับเส้นแนวโน้มจากงานวิจัยของ Somna และคณะ ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการ

ย่อยเศษคอนกรีตที่มีค่าต่ำกว่า 35 เมกาปาสคาล ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมีแนวโน้มที่สูงขึ้นอย่างมาก และอาจกล่าวได้ว่าข้อมูลดังกล่าวสอดคล้องกับข้อมูลของ Somna และคณะ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาข้อมูลการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่กำลังอัดประมาณ 35 เมกาปาสคาล ซึ่งใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตจากงานวิจัยของสุพัตร์ ขำคล้าย พบว่ามีค่าสูงมาก ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเพียงอย่างเดียวเกือบ 2 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีขนาดคละที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 ทำให้มีช่องว่างระหว่างมวลรวมมากขึ้น รวมถึงมวลรวมดังกล่าวมีซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์ที่มีความพรุนสูงและกำลังอัดต่ำ จึงส่งผลให้ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมีค่าสูง ส่วนคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตและมีกำลังอัดมากกว่า 45 เมกาปาสคาล ขึ้นไป พบว่ามีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีความแน่นเพิ่มขึ้นตาม




รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดและค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของคอนกรีต (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี2553)

เมื่อใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดจากระบบฟลูอิดไดซ์เบดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต พบว่าสามารถลดค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้อย่างมาก ซึ่งเห็นได้จากเส้นกราฟในรูปที่ 2.4 และการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในอัตราร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต (คอนกรีต RCP20, RCP35, และ RCP50) และในคอนกรีตที่ใช้ทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต (คอนกรีต RCFP20, RCFP35, และ RCFP50) ผลที่ได้พบว่าในช่วงกำลังอัดประมาณ 25 เมกาปาสคาล ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตทั้งสองชนิดมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันที่ไม่ได้ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (คอนกรีต RC และ RCF) ส่วนค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน และคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ที่มีกำลังอัดตั้งแต่ 30 เมกาปาสคาล ขึ้นไป มีค่าไม่ต่างจากคอนกรีตชนิดเดียวกันที่มีกำลังอัดประมาณ 250 กก/ซม$^2$ มากนัก

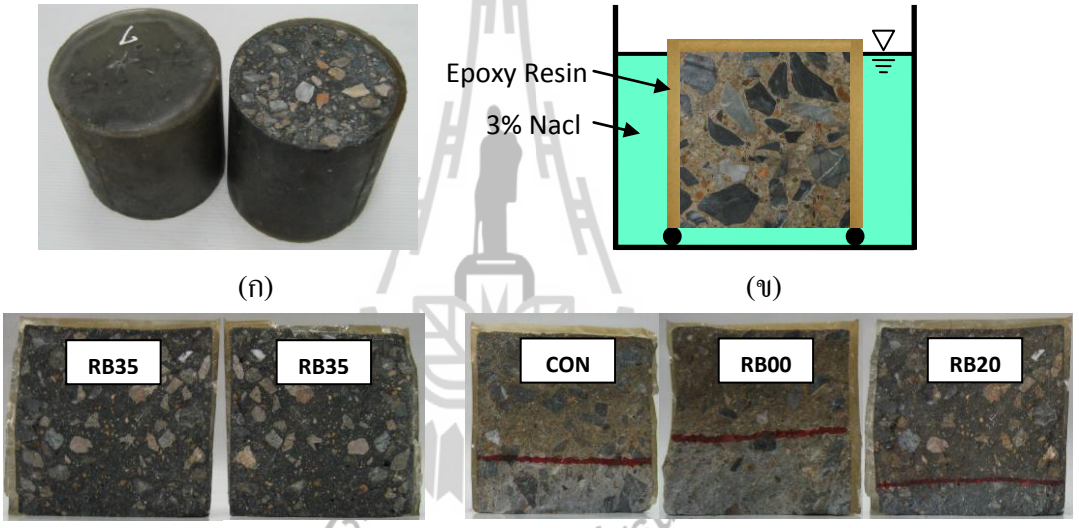
การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตสามารถลดค่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้ทุกอัตราส่วนการแทนที่ ยกเว้นการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 50 ถึงแม้ช่วยลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตลงได้ แต่เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ยังคงมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่สูงกว่าทั้งที่อายุ 28 และ 90 วัน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่งผลให้มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงขึ้น ผลการทดสอบดังกล่าวคล้ายกับงานวิจัยของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงเกินไป ซึ่งทำให้ความพรุนในคอนกรีตเพิ่มขึ้น

จากคุณสมบัติด้านกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านของคอนกรีต สามารถสรุปได้ว่าเถ้าถ่านหินบดละเอียด เถ้าชานอ้อยบดละเอียด และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต เพื่อลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้เป็นอย่างดีและไม่มีผลกระทบต่อกำลังอัดมากนัก ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าดังกล่าวในอัตราร้อยละ 35 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานช่วยให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้นแต่กำลังอัดมีแนวโน้มต่ำลงตามปริมาณการแทนที่ที่สูงขึ้น นอกจากนี้การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ

50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานไม่เหมาะสำหรับคอนกรีต เพราะทำให้คอนกรีตมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงและกำลังอัดมีค่าต่ำลงมาก

**2.13 ความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ (รัฐพล สมนา และคณะ,ปี2553)**

รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างคอนกรีตสำหรับการทดสอบหาระยะคลอไรด์แทรกซึม โดยระยะคลอไรด์แทรกซึมได้จากการวัดระยะจากผิวตัวอย่างคอนกรีตทดสอบด้านที่ไม่มีอีพ็อคซี่เคลือบไปจนถึงเส้นที่ขีดไว้เพื่อแสดงแนวความลึกของคลอไรด์แทรกซึม ซึ่งสังเกตได้จากสีขาวของสารประกอบซิลเวอร์คลอไรด์ที่เกิดขึ้น ส่วนที่ไม่มีคลอไรด์แทรกซึมมีสีออกน้ำตาลอ่อน




(ก) (ข)

(ค) (ง)

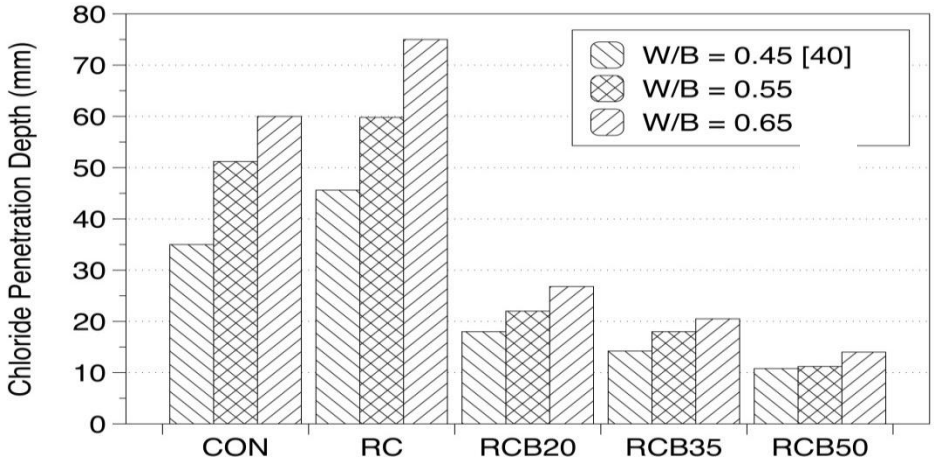
(ก) คอนกรีตที่หล่ออีพ็อกซี่โดยรอบเหลือไว้เพียงหนึ่งด้านสำหรับทดสอบการแทรกซึม

(ข) ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

(ค) ตัวอย่างที่ถูกกดให้แตกแบบผ่าซีกเพื่อหาระยะคลอไรด์แทรกซึม

(ง) ตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นระยะเวลา 18 เดือน และพ่นผิวหน้าด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.1N

รูปที่ 2.4 ตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบหาระยะคลอไรด์แทรกซึม (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี2553)




รูปที่ 2.5 ความลึกคลอไรด์แทรกซึมของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นระยะเวลา 18 เดือน (รัฐพล สมนา และคณะ,ปี2553)

รูปที่ 2.5 แสดงความลึกคลอไรด์แทรกซึมของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นระยะเวลา 18 เดือน โดยพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกัน คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตในส่วนผสม (RC) มีค่าความลึกคลอไรด์แทรกซึมสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ (CON) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตส่งผลให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้ง่ายกว่าคอนกรีต CON เนื่องจากมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีมอร์ต้าร์ซึ่งมีโพรงอากาศสูงกว่าหินธรรมชาติ (หินปูนย่อย) เกาะติดอยู่บนผิวมวลรวมเดิม จึงทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้ง่ายขึ้นโดยผ่านโพรงเหล่านี้

เมื่อใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต พบว่าความลึกคลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (RCB20, RCB35 และ RCB50 ตามลำดับ) ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคที่ละเอียดของเถ้าชานอ้อยบดละเอียด ($d_{50}$ = 5.6 ไมโครเมตร) ทำให้เนื้อเพสต์ในคอนกรีตมีความแน่นขึ้นกว่าเพสต์ในคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในส่วนผสม ส่งผลให้คลอไรด์แทรกซึมผ่านเข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้นแม้ว่าจะมีมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีความพรุนสูงกว่าในส่วนผสมก็ตาม โดยการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่

ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่สูงจะส่งผลต่อการลดลงของกำลังอัด

## 2.14 การนำมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตหรือวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี 2553)

มาตรฐาน ว.ส.ท. 1014 ได้จำแนกประเภทมวลรวมหยาบที่ได้จากย่อยเศษคอนกรีตหรือวัสดุก่อสร้างอื่นๆ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่เป็น 3 ระดับคุณภาพคือ ชั้นคุณภาพ 1 ชั้นคุณภาพ 2 และชั้นคุณภาพ 3 โดยชั้นคุณภาพ 1 เป็นมวลรวมหยาบที่ได้มวลรวมจากธรรมชาติไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก และมีมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต (ที่มีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 10) ผสมอยู่ไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ขณะที่ชั้นคุณภาพ 3 เป็นชั้นคุณภาพที่ต่ำสุดและเป็นมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยวัสดุก่อ หรือวัสดุก่อผสมกับคอนกรีตที่ใช้แล้วเป็นส่วนใหญ่และมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (ดูตารางที่ 2.5) นอกจากนี้หากมีข้อโต้แย้งเกี่ยวกับการแบ่งแยกประเภทและองค์ประกอบย่อยทั้งหมดของตัวอย่างมวลรวมหยาบที่ใช้แล้ว อาจพิจารณาถึงขอบเขตของความถ่วงจำเพาะของมวลรวมและดัชนีบ่งชี้ขอบเขตอื่น ๆ ตามตารางที่ 8.6 ประกอบ และหากสงสัยในคุณภาพของมวลรวมด้านเคมี ให้ทำการตรวจสอบถึงวัสดุอันตรายที่ปะปนมากับมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเพิ่มเติมตามตารางที่ 8.7 และเสนอแนะการนำมวลรวมหยาบที่ใช้แล้วตามคุณภาพทั้ง 3 ระดับคุณภาพ เพื่อใช้ในงานคอนกรีตตามตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.5 การจำแนกประเภทของมวลรวมหยาบที่ใช้ (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี 2553)

| ชั้นคุณภาพ | คำจำกัดความ |
|---|---|
| ชั้นคุณภาพ 1 | มวลรวมหยาบซึ่งประกอบด้วยมวลรวมหยาบจากธรรมชาติไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก และมวลรวมหยาบที่ใช้แล้วไม่มากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก หรือมีมวลรวมหยาบที่ใช้แล้ว ชั้นคุณภาพ 3 ผสมอยู่ไม่มากกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบที่ใช้แล้วประเภทที่ 1 ต้องไม่เกินร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก |
| ชั้นคุณภาพ 2 | มวลรวมหยาบส่วนใหญ่ที่ได้มาจากคอนกรีตที่ใช้แล้ว และมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก |
| ชั้นคุณภาพ 3 | มวลรวมหยาบส่วนใหญ่ที่ได้จากวัสดุก่อหรือ ผสมระหว่างวัสดุก่อและคอนกรีตที่ใช้แล้ว และมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก |

มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแม้ว่าจะมีข้ออ่อนด้อยกว่ามวลรวมที่ได้จากธรรมชาติในหลาย ๆ เรื่อง แต่การใช้วัสดุปอซโซลาน สามารถลดข้อด้อยลงได้และในบางกรณีอาจพัฒนาจนคอนกรีตมีคุณภาพเทียบเท่าหรือดีกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่ไม่ผสมวัสดุปอซโซลาน นอกจากนี้หากใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตบางส่วนร่วมกับมวลรวมจากธรรมชาติและวัสดุปอซโซลานร่วมกันย่อมช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพที่ดีขึ้นกว่าการใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตทั้งหมด

การเลือกมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตให้เหมาะสมกับคุณภาพงานก่อสร้างเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้การใช้มวลรวมดังกล่าวมีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น กล่าวคือคอนกรีตหยาบหรือคอนกรีตสำหรับงานปรับระดับและคอนกรีตไม่เสริมเหล็กที่ไม่ต้องการกำลังอัดสูง ไม่จำเป็นต้องใช้มวลรวมจากธรรมชาติ (ซึ่งเป็นมวลรวมที่มีคุณภาพสูง) แต่สามารถใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตได้และไม่ทำให้คุณภาพของงานก่อสร้างลดลงหรือเสียหายแต่อย่างไร แต่มีข้อดีคือช่วยลดและกำจัดคอนกรีตเก่าและเศษคอนกรีตที่ต้องนำไปทิ้งโดยไม่เกิดประโยชน์ ให้กลายเป็นวัสดุที่มีประโยชน์ และในหลายกรณีพบว่า ทำให้คอนกรีตมีราคาต่ำลง โดยที่คุณภาพของงานยังเป็นไปตามที่ต้องการ

ตารางที่ 2.6 คุณลักษณะการจำแนกมวลรวมที่ใช้แล้ว (รัฐพล สมนา และคณะ,ปี2553)

| คุณลักษณะ | เกณฑ์ที่กำหนด | | | วิธีการทดสอบ |
|---|---|---|---|---|
| | ชั้นคุณภาพ 1 | ชั้นคุณภาพ 2 | ชั้นคุณภาพ 3 | |
| ความถ่วงจำเพาะแห้งของมวลรวมอย่างน้อย | 2.40 | 2.00 | 1.50 | ASTM C127 |
| น้ำหนักร้อยละมากสุดขององค์ประกอบย่อย<br>-มีความถ่วงจำเพาะที่อิ่มตัวผิวแห้งน้อยกว่า 2.20<br>-มีความถ่วงจำเพาะที่อิ่มตัวผิวแห้งน้อยกว่า 1.80<br>-มีความถ่วงจำเพาะที่อิ่มตัวผิวแห้งน้อยกว่า 1.00 | <br>10<br>1<br>0.5 | <br>10<br>1<br>0.5 | <br>-<br>10<br>1 | ASTM C123 |
| น้ำหนักร้อยละมากสุดของวัสดุอื่นๆ (เหล็ก แก้ว วัสดุอ่อน ทาร์ แอสฟัลท์ อื่นๆ) | 1 | 1 | 5 | ดัดแปลงจาก ASTM C142 |

ตารางที่ 2.7 ข้อกำหนดคุณสมบัติทางเคมีเพิ่มเติมของมวลรวมหยาบที่ใช้แล้ว (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี2553)

| คุณลักษณะ | เกณฑ์ที่กำหนด | วิธีการทดสอบ |
|---|---|---|
| ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายได้ในกรด (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | $\leq 0.06$ | ASTM C1152 |
| ปริมาณซัลเฟอร์ในรูปองค์ประกอบ ซัลเฟตที่ละลายในกรดในรูป $SO_3$ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | $\leq 1$ | EN 1744-1 |
| ปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | $\leq 1$ | EN 1744-1 |
| ปริมาณอัลคาไลในรูปของ $Na_2O + 0.65K_2O$ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | $\leq 0.60$ | ASTM C289 |

ตารางที่ 2.8 กำลังอัดที่ยอมให้เมื่อคอนกรีตใช้มวลรวมหยาบที่ใช้แล้วเป็นส่วนผสมและแนวทางในการนำเอาไปใช้ในงาน (รัฐพล สมนา และคณะ,ปี2553)

| มวลรวมหยาบที่ใช้แล้ว | กำลังอัดคอนกรีตที่ยอมให้มากที่สุด (กก/ซม$^2$) | แนวทางในการนำเอาไปใช้ในงานคอนกรีต |
|---|---|---|
| ชั้นคุณภาพที่ 1 | ไม่กำหนด | งานคอนกรีตทั่วไป คอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตอัดแรง และถนนคอนกรีต |
| ชั้นคุณภาพที่ 2 | 500 | งานคอนกรีตทั่วไปแต่ไม่แนะนำให้ใช้กับคอนกรีตอัดแรงและคอนกรีตที่ต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมที่มีปริมาณคลอไรด์และ/หรือซัลเฟตสูง สำหรับงานคอนกรีตที่ใช้ทำโครงสร้างหลักควรนำเอาผลที่ได้จากการหดตัวแบบแห้งและความคืบของมวลรวมหยาบที่ใช้แล้วมาพิจารณาด้วย |
| ชั้นคุณภาพที่ 3 | 160 | งานปรับระดับคอนกรีตและคอนกรีตไม่เสริมเหล็กที่ไม่ต้องการกำลังอัดสูง |

## 2.15 งานวิจัยที่ผ่านมา

Ravindrajah และ Tam (1985) ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามาใช้เป็นมวลรวมหยาบ ซึ่งนักวิจัยทั้งสองพบว่าคุณภาพของมวลรวมรีไซเคิลขึ้นอยู่กับ

กำลังและการเสียรูปของคอนกรีตเดิม โดยมวลรวมรีไซเคิลมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า และมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าหินแกรนิตย่อย (มวลรวมธรรมชาติ) นอกจากนี้ยังพบว่าความต้านทานต่อการกระแทก การย่อย และการขัดสีของมวลรวมหยาบรีไซเคิลต่ำกว่าหินแกรนิตย่อย เมื่อนำมวลรวมรีไซเคิลมาใช้แทนที่มวลรวมจากธรรมชาติในการผสมคอนกรีตพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลงถึงร้อยละ 25 และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าลดลงถึงร้อยละ 30

De Oliveria และ Vazquez (1996) ศึกษาถึงอิทธิพลของความชื้นของมวลรวมรีไซเคิลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมรีไซเคิลที่อยู่ในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวลดลงเล็กน้อย กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตผสมเสร็จที่นำมาย่อย ส่วนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตเดิมและคอนกรีตอ้างอิงที่ผลิตในห้องปฏิบัติการอยู่ประมาณร้อยละ 75 ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทั่วไป

ในปี ค.ศ. 2002 Limbachiya และคณะศึกษาถึงการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลในคอนกรีตกำลังสูง มวลรวมหยาบธรรมชาติและมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นหินกรวด มวลรวมรีไซเคิลที่ได้มาจากการย่อยเศษคอนกรีตจากชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปที่ไม่ผ่านมาตรฐาน โดยขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบเท่ากับ 20 มิลลิเมตร มวลรวมรีไซเคิลที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าสูงการดูดซึมน้ำเป็นสองเท่าของมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ในขณะที่ค่าความหนาแน่นมีค่าต่ำกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติอยู่ในระหว่างร้อยละ 7 ถึงร้อยละ 9 ทั้งนี้เนื่องจากความพรุนของซีเมนต์เพสต์ที่ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมหยาบรีไซเคิล ส่วนผลกระทบจากการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่มวลรวมธรรมชาติพบว่าการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติไม่เกินร้อยละ 30 ไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีต แต่ถ้าใช้ในปริมาณมากกว่านี้จะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงและทำให้คอนกรีตมีความพรุนตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้สรุปไว้ว่ามวลรวมหยาบรีไซเคิลสามารถนำมาใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงโดยคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของคอนกรีต เช่น กำลังอัด กำลังรับแรงดัด และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ยังคงเป็นที่น่าพอใจ

หลังจากนั้น Poon และคณะ (2004) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของสภาวะความชื้นของมวลรวมธรรมชาติและมวลรวมรีไซเคิ้ลต่อค่าการยุบตัวและกำลังอัดของคอนกรีต พบว่าสภาวะความชื้นของมวลรวมส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด มวลรวมที่อยู่ในสภาวะอบแห้งทำให้มีค่าการยุบตัวช่วงแรกที่สูงกว่าและเกิดการสูญเสียค่าการยุบตัวที่เร็วกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งและสภาวะแห้งในอากาศ กล่าวคือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งและสภาวะแห้งในอากาศจะมีค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่า

การยุบตัวอยู่ในภาวะปกติ ค่าการยุบตัวของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำอิสระในส่วนผสมคอนกรีตอย่างมาก ในด้านกำลังอัดพบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลที่อยู่ในสภาวะผิวแห้งในอากาศมีกำลังอัดสูงที่สุด ส่วนคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งดูเหมือนว่าจะส่งผลทางลบต่อกำลังอัด ซึ่งอาจเกิดจากการเอิ้มน้ำของน้ำส่วนเกินในมวลรวมที่ถูกทำให้เปียกก่อนการผสม ดังนั้นสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าการใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะผิวแห้งในอากาศแทนที่มวลรวมธรรมชาติไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ในส่วนผสมคอนกรีตเหมาะสมสำหรับการผลิตคอนกรีตรีไซเคิลกำลังปกติ

Etxeberria และคณะ (2007) ศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณมวลรวมรีไซเคิลและขั้นตอนการผลิตต่อคุณสมบัติของคอนกรีตรีไซเคิลซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 (ใช้ปูนซีเมนต์เท่ากับ 325 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) จากผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมหยาบรีไซเคิลทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 20 ถึง 25 ซึ่งเป็นผลจากมอร์ต้าร์ที่ติดอยู่ในมวลรวมรีไซเคิลมีกำลังที่ต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติและเพสต์ที่ผสมใหม่ ดังนั้นจุดอ่อนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ใช้เพสต์ที่มีกำลังปานกลางถึงสูงจะขึ้นอยู่กับกำลังของมวลรวมหยาบรีไซเคิลหรือมอร์ต้าร์ที่ติดอยู่ในมวลรวมรีไซเคิล สำหรับคอนกรีตกำลังปานกลางที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลร้อยละ 50 และ 100 โดยน้ำหนักของมวลรวมหยาบธรรมชาติ เพื่อให้ได้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่าใกล้เคียงคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ ทำได้โดยการลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ประสิทธิผลร้อยละ 4 ถึง 10 และการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 ถึง 10 นอกจากนี้พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ

Rattapon Somna และคณะ (2012a)ได้ศึกษาผลกระทบจากเถ้าถ่านหินบดละเอียด และเถ้าชานอ้อยบดละเอียด ต่อความทนทานของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลเป็นส่วนผสม โดยจะใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมดและใช้ เถ้าถ่านหินบดละเอียด และเถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วนในอัตราร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานในส่วนผสม ทำการทดสอบหากำลังรับแรงอัด,การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต, ระยะการแซกซึมคลอไรด์และการขยายตัวของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต ผลการศึกษาพบว่าการใช้ เถ้าถ่านหินบดละเอียด และเถ้าชานอ้อยบดละเอียด แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการปรับปรุงความทนทานของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล อัตราการแทนที่ที่เหมาะสมของเถ้าถ่านหินบดละเอียดและเถ้าชานอ้อยบดละเอียดในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลเพื่อให้ได้กำลังอัดที่เหมาะสม ค่าซึมผ่านของ

น้ำที่ต่ำ ความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่สูงและความต้านทานซัลเฟตที่สูงคือร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

Somna และคณะ (2012b) ศึกษาผลกระทบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและเถ้าถ่านหินบดละเอียดต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่ไว้มวลรวมรีไซเคิล โดยออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ โดยใช้ปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ส่วนคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลนั้นใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติ (หินปูนย่อย) ทั้งหมด และใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดแทนที่ปูนซิเมนต์บางส่วนในอัตราร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เพื่อให้ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล ทำการทดสอบกำลังอัดและค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่มีอายุ 28 และ 29 วัน นอกจากนี้ยังทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตด้วย ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดแทนที่ปูนซิเมนต์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลสามารถช่วยปรับปรุงกำลังอัดให้มีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ไม่ได้ใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันได้ เถ้าถ่านหินบดละเอียดยังสามารถนำมาแทนที่ปูนซิเมนต์ได้ถึงร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 แต่สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และ 0.65 ไม่ควรใช้เกินร้อยละ 20โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เมื่อพิจารณาที่กำลังอัดเท่ากัน พบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตรีไซเคิลทั้งที่ใช้และไม่ใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ(หินปูนย่อย)ประมาณร้อยละ 16 ถึง 20 นอกจากนี้การใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดแทนที่ปูนซิเมนต์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีประสิทธิภาพการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้มากกว่าการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

Somna และคณะ (2012c) ได้ศึกษาผลกระทบของเถ้าชานอ้อยบดละเอียด(ขนาดอนุภาคประมาณ 70 ไมคอน)ต่อคุณสมบัติทางกลและความต้านทานของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล ซึ่งเถ้าชานอ้อยก่อนบดที่ใช้ในงานวิจัยได้จากโรงงานน้ำตาล งานวิจัยนี้ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดปเนวัสดุปอซโซลานเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกลและความต้านทานของคอนกรีตที่ใช้มวบรวมหยาบรีไซเคิล โดยแทนที่ปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 25 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำการหล่อตัวอย่างทดสอบเพื่อหากำลังรับแรงอัด,ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น, การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และการแทรกซึมของคลอไรด์

ผลทดสอบพบว่า โมดูลัสยืดหยุ่น ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลทั้งที่ใช้และที่ไม่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ (หินปูนย่อย) ประมาณร้อยละ 19 นอกจากนี้ยังพบว่าเถ้าชานอ้อยบดละเอียดสามารถใช้เพื่อลดการซึมของน้ำผ่าน

คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลได้อย่างมีประสิทธิผล การเพิ่มปริมาณเถ้าชานอ้อยบดละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีตรีที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลช่วยให้ระยะกาแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงอย่างมีนัย นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดร้อยละ 20 โดยน้ำหนักในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและความต้านทานของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**ว่าที่ร้อยเอกอิทธิพล ศิริสวัสดิ์ และคณะ** ได้ศึกษาประเมินคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบไม่ทำลายโดยวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี้ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกรวดเร็ว ทำการวิเคราะห์ผลทางทางสถิติ เลือกใช้วัสดุปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสามและมวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุดขนาด 3/8 นิ้วและ 3/4 นิ้ว ใช้แทงคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์และแบบลห่อชิ้นงานความหนา 10 ถึง 15 เซนติเมตร ออกแบบค่ากำลังอัดวัสดุประลัยที่ อายุ 28 วันให้มีค่าอยู่ ระหว่าง 200$\pm$25 ถึง 422$\pm$25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การศึกษาประกอบด้วยการศึกษาผลกระทบของความหนาต่าง ๆ ของชิ้นงานในช่วงกำลังรับแรงอัดต่าง ๆ รวมทั้งขนาดโตสุดของวัสดุมวลรวมหยาบที่ส่งผลกระทบต่อการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี้ เทียบกับกำลังรับแรงอัดมาตรฐานแบบทำลาย จากผลการทดสอบพบว่าความหนาของชิ้นงานและช่วงค่ากำลังรับแรงอัดรวมทั้งขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบมีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ทดสอบแบบไม่ทำลาย ด้วยวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี้ในลักษณะที่แตกต่างกันออกไป จึงเป็นการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้โดยประมาณที่ยอมรับได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งควรพิจารณาทดสอบกำลังรับแรงอัดในวิธีอื่น ๆ ประกอบการใช้งาน และต้องคำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบถึงความน่าเชื่อถือของการทดสอบนี้ด้วย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่ามวลรวมหยาบรีไซเคิลมีความแข็งแกร่งต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากมอร์ต้าร์และ/หรือซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในมวลรวมรีไซเคิลมีความแข็งแรงน้อยกว่ามวลรวมธรรมชาติ นอกจากนี้มอร์ต้าร์และ/หรือซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในมวลรวมรีไซเคิลยังมีความพรุนสูงกว่ามวลรวมธรรมชาติด้วย ส่งผลให้มีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงตามไปด้วย แม้ว่า Poon และคณะ (2004) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของสภาวะความชื้นของมวลรวมธรรมชาติและมวลรวมรีไซเคิ้ลต่อค่าการยุบตัวและกำลังอัดของคอนกรีตไปแล้ว แต่เป็นการศึกษามวลรวมที่เป็นหินแกรนิต ยังไม่พบการศึกษามวลรวมที่เป็นหินปูน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาผลกระทบจากความชื้นของมวลรวมธรรมชาติและมวลรวมรีไซเคิ้ลที่เป็นหินปูนต่อค่าการยุบตัว กำลังอัด และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น โดยจะทดสอบกำลังอัดคอนกรีตด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิคเพื่อดูผลกระทบของความชื้นภาย ในก้อนตัวอย่างร่วมด้วย นอกจากนี้ยังสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคได้อีกด้วย

# บทที่ 3
# วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงวัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ การเตรียมวัสดุทดสอบ การทดสอบคุณสมบัติจำเพาะต่างๆ ของวัสดุ การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วการเตรียมตัวอย่างทดสอบ และสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

## 3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม
2. มวลรวมหยาบรีไซเคิล ขนาดใหญ่สุด 3/4 นิ้วหรือไม่เกิน 19 มม.
3. ทรายแม่น้ำ ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 (ขนาดเล็กกว่า 4.75 มม.)
4. หินปูนย่อย ขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 19 มม.
5. น้ำประปา

## 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

1. ตะแกรงวิเคราะห์ขนาดมวลรวม แสดงดังรูปที่ 3.1
2. เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าอ่านได้ละเอียด 0.01 กรัม แสดงดังรูปที่ 3.2
3. ชุดทดสอบความฉ่วงจำเพาะ แสดงดังรูปที่ 3.3
4. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิปรับอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 3.4
5. ชุดทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 3.5
6. แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงลูกบากค์ขนาด 15×15×15 ซม. และแบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก แสดงดังรูปที่ 3.6
7. เครื่องผสมคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 3.7
8. เครื่องทดสอบกำลังอัด แสดงดังรูปที่ 3.8
9. ชุดทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 3.12
10. เครื่องทดสอบกำลังอัดแบบอัลตร้าโซนิค แสดงดังรูปที่ 3.11
11. บ่อบ่มคอนกรีต

รูปที่ 3.1 ตะแกรงวิเคราะห์ขนาดมวลรวม

รูปที่ 3.2 เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าอ่านได้ละเอียด 0.01 กรัม

รูปที่ 3.3 ชุดเครื่องมือหาค่าความถ่วงจำเพาะ

รูปที่ 3.4 ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ 105 - 115 องศาเซลเซียส

รูปที่ 3.5 ชุดทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต

รูปที่ 3.6 แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15×15×15 ซม. และ แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาด 0.15 × 0.30 ซม.

รูปที่ 3.7 เครื่องผสมคอนกรีต

รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

## 3.3 วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็นขั้นตอนต่างๆดังนี้

### 3.3.1 การเตรียมตัวอย่างวัสดุ

3.3.1.1 วัสดุ ปูนซีเมนต์ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.3.1.2 มวลรวมละเอียดที่ได้จากทรายแม่น้ำ นำมาล้างให้สะอาด

3.3.1.3 มวลรวมหยาบจากหินปูนที่ได้จากธรรมชาติมีขนาดไม่เกิน 25 มิลลิเมตร หลังจากนั้น นำส่วนที่ได้ มาแยกขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 โดยส่วนที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 คือมวลรวมละเอียดออก สำหรับส่วนที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และมีขนาดไม่เกิน 25 มิลลิเมตร คือมวลรวมหยาบที่ใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต จากนั้นนำมวลรวมดังกล่าวเก็บใส่ถุงพลาสติกมัดปากถุงให้มิดชิด เพื่อควบคุมค่าความชื้นและป้องกันการปนเปื้อนจากวัสดุอื่น ๆ

3.3.1.4 มวลรวมหยาบจากหินปูนที่ได้จากย่อยเศษคอนกรีต มีขนาดไม่เกิน 19 มิลลิเมตร นำตัวอย่างเศษคอนกรีตย่อยด้วยเครื่องย่อยคอนกรีต หลังจากนั้นนำส่วนที่ได้จากการย่อยดังกล่าวมาแยกขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 โดยส่วนที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 คือมวลรวมละเอียดที่

ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตออก สำหรับส่วนที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และมีขนาดไม่เกิน 19 มิลลิเมตร คือมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต จากนั้นนำมวลรวมดังกล่าวเก็บใส่ถุงพลาสติกมัดปากถุงให้มิดชิด เพื่อควบคุมค่าความชื้นและป้องกันการปนเปื้อนจากวัสดุอื่นๆ

รูปที่ 3.9 มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

3.3.1.5 มวลรวมหยาบจากหินปูนที่ได้จากธรรมชาติมีขนาดไม่เกิน 25 มิลลิเมตร และมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต หลังจากนั้นนำมาทำให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง โดยการนำมวลรวมมวลรวมหยาบมาแช่น้ำ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาเช็ดผิวให้แห้ง ระวังความชื้นที่จะหาย ในขั้นตอนการเช็ดผิวให้แห้ง

รูปที่ 3.10 เครื่องย่อยเศษคอนกรีต

**3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา**

**การทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของวัสดุประสาน**

3.3.2.1 การทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์

ตามมาตรฐาน ASTM C 188 โดยอาศัยหลักการเพิ่มขึ้นของปริมาณของของเหลวเมื่อแทนที่ด้วยวัสดุทดสอบ โดยค่าความถ่วงจำเพาะคือ อัตราส่วนของน้ำหนักวัสดุต่อน้ำหนักของของเหลวที่ปริมาณเท่ากับวัสดุนั้น โดยการทดสอบนี้ใช้น้ำมันก๊าดเป็นของ เหลวในการทดสอบเนื่องจากไม่ทำปฏิกิริยากับวัสดุทดสอบ

**การทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของมวลรวม**

3.3.2.2 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ และค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C 128 และ ASTM C 127 สำหรับมวลรวมละเอียดละมวลรวมหยาบ ตามลำดับ โดยค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของมวลรวมต่อน้ำหนักน้ำที่มีปริมาณเท่ากัน ส่วนค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวม คือ อัตราส่าวระหว่างน้ำหนักของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของมวลรวมต่อน้ำหนักของมวลรวมที่สภาวะอบแห้ง

3.3.2.3 วิเคราะห์การกระจายตัวและค่าโมลัสความละเอียดของมวลรวมด้วยตะแกรง ตามมาตรฐาน ASTM C 136 เพื่อวิเคราะห์ขนาดการกระจายตัวและขนาดโดยเฉลี่ยของมวลรวม โดยเปรียบเทียบมาตรฐาน ASTM C 33 ซึ่งได้กำหนดขอบเขตการกระจายตัวของมวลรวมที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานคอนกรีต

3.3.2.4 ทดสอบหน่วยน้ำหนักของมวลรวม และปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C 29 โดยหน่วยน้ำหนักมวลรวม คือน้ำหนักของมวลรวมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร มีหน่วย กก/ม$^3$ ส่วนปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวม คือร้อยละของช่องว่างต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

**3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว**

3.3.3.1 ทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด ตามมาตรฐาน ASTM C 143 เทคอนกรีตลงในชุดกรวยทดสอบค่าการยุบตัว โดยแบ่งคอนกรีตเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็กกลมปลายมนเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 60 ซม.ชั้นละ 25 ครั้ง จากนั้นปาดห้าให้เรียบ ยกกรวยขึ้นแล้วทำการวัดค่ายุบตัว

3.3.3.2 ทดสอบการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีต เป็นการหาค่ายุบตัวของคอนกรีตที่เวลาต่างๆ เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการนำคอนกรีตไปใช้งาน โดยทำการวัดดค่ายุบตัวทุก ๆ 15 นาที จนคอนกรีตไม่มีค่ายุบตัวหรือค่ายุบตัวเท่ากับศูนย์

3.3.3.3 การทดสอบกำลังของคอนกรีตด้วยวิธี Ultrasonic Pulse Velocity Test (UPV)

การทดสอบกำลังของคอนกรีตด้วยวิธี Ultrasonic Pulse Velocity Test (UPV) วิธีการนี้ เป็นการทดสอบการรับกำลังอัดของคอนกรีตโครงสร้าง ด้วยคลื่นคลอัลตร้าโซนิค (Ultrasonic Pulse) โดยไม่ทำลายโครงสร้างเดิม ซึ่งความเร็วของคลื่นอัลตร้าโซนิคในตัวกลางคอนกรีตขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีต ถ้าคอนกรีตมีคุณภาพดีคลื่นจะสามารถเดินทางผ่านคอนกรีตได้เร็ว และจากการวัดความเร็วคลื่นคลอัลตร้าโซนิค ผลของความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคสามารถนำมาเปรียบเทียบถึงความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตได้ ซึ่งจะอาศัยหลักการของการส่งคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic Pulse) ผ่านเข้าไปในตัวกลางเนื้อคอนกรีตที่ต้องการทดสอบ แล้ววัดเวลาที่คลื่นความถี่สูง ใช้ในการเคลื่อนที่จากหัวส่งสัญญาณไปยังหัวรับสัญญาณ นำมาคำนวณ หาค่าความเร็วคลื่น (Pulse Velocity) ในตัวกลางนั้น ๆ แล้วนำไปแปรผลเป็นค่ากำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต การทดสอบด้วยวิธีการนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C597 หรือ BS 1881 Part203 โดยเครื่องมือทดสอบหลักประกอบด้วย กล่องอุปกรณ์เนิดสัญญาณ หัวส่งสัญญาณ (Transmitter) ขนาด 54 kHz สำหรับคอนกรีตทั่วไป และหัวรับสัญญาณ (Receiver) เนื่องจากคลื่นความถี่สูงสามารถทะลุ ทะลวงคอนกรีตหนาๆ ได้เป็นอย่างดี

รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบอัตราความเร็วคลื่นด้วยวิธี Ultrasonic Pulse Velocity Test (UPV)

3.3.3.4 ทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตาม มาตรฐาน ASTM C 469 ที่อายุ 28 วัน โดยติดตั้งคอมเพรสโซมิเตอร์ (Compressometer) เข้ากับตัวอย่างทดสอบ วางตัวอย่างลงบนเครื่องทดสอบให้แรงกดประมาณร้อยละ 20 ถึง 30 ของกำลังอัดประลัย แล้วจึงลดแรงกดด้วยอัตราเดียวกันจนมีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการคืบ จากนั้นกดก้อนตัวอย่างด้วยอัตรา $2.46 \pm 0.35$ กก/ซม$^2$/วินาที บันทึกค่าแรงกดและค่าการหดตัวที่อ่านได้จากมาตรวัดจนกระทั่งแรงกดมีค่าประมาณร้อยละ 80-90 ของแรงอัดประลัยจึงถอดคอมเพรสโซมิเตอร์ออกจากนั้นให้แรงกดต่อ เพื่อหากำลังอัดประลัย

รูปที่ 3.12 ตัวอย่างทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Compressometer)

3.3.3.5 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 39 เมื่อคอนกรีตมีอายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน โดยก่อนการทดสอบแต่ละอายุ ใช้ตัวอย่างทดสอบ 5 ตัวอย่าง โดยกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีต พิจารณาจากตัวอย่างที่มีค่ากำลังอัดแตกต่างจากค่ากำลังอัดเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดไม่เกินร้อยละ 10

### 3.3.4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตและการออกแบบส่วนผสม

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงลูกบากค์ ขนาด 15x15x15 ซม. ควบคุมอัตราส่วนระหว่างน้ำประสิทธิผลต่อต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.89, 0.93, 1 และควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. หลังจากหล่อคอนกรีตแล้วเป็น 24 ชั่วโมงทำการถอดแบบ

และนำไปบ่มในน้ำ จากนั้นทำการการทดสอบกำลังของคอนกรีตด้วยวิธี Ultrasonic Pulse Velocity Test (UPV),ทดสอบกำลังอัด,โมดุลัสยืดหยุ่นที่อายุทดสอบต่างๆ

สำหรับส่วนผสมคอนกรีตใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้หินปูนย่อยและมวลรวมรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบ แบ่งออกเป็น / สถานะ สถานะแรกเป็นสภาวะะแห้งในอากาศ Air - Dried (AD), สถานะที่ 2 สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง Saturated Surface-Dried (SSD) ( แทนด้วยสัญลักษณ์ AD และ SSD ตามลำดับ) ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน และทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด อัตราส่วนแทนที่ระหว่างหินปูนย่อย และ มวลรวมหยาบรีไซเคิล แบ่งเป็น 3 กลุ่ม และ ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 0, 25 และ 100 โดยน้ำหนักมวลรวมหยาบ ตามลำดับ

ในการศึกษาครั้งนี้ออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตควบคุม (CON) ตามมาตรฐาน ACI 211.1 ส่วนคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากหินปูนย่อยและเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม ทำการปรับปริมาณความชื้น, ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม ตลอดจนค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทั่วไปในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 211.1 น้ำหนักของมวลรวมที่ใช้เป็นส่วนผสมถูกสมมุติให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง Saturated Surface-Dried (SSD) ขณะที่มวลรวมธรรมชาติ และมวลรวมที่ใช้ในการครั้งนี้เตรียมให้อยู่ในสภาวะผิวแห้งในอากาศ Air - Dried (AD) ดังนั้นในการออกแบบส่วนผสมจึงต้องมีการปรับน้ำเนื่องจากความชื้นและการดูดซึมน้ำของมวลรวมตามจริง โดยปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมแบ่งออกเป็น ปริมาณน้ำที่ใช้จริงในส่วนผสม (Mixing Water)ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่รวมการชดเชยการดูดซึมน้ำของมวลรวม และปริมาณน้ำประสิทธิผล (Effective Water) คือปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมซึ่งกำหนดให้มวลรวมอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

| **Mix** | **Mix Proportion (kg/m$^3$)** | | | | | **W/C** | **Slump (mm)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Cement** | **Sand** | **Limestone** | **Recycled Concrete** | **Effective water** | | |
| **AC** | 250 | 845 | 1,180 | - | 212.5 | 0.85 | 80 |
| **AR25** | 250 | 845 | 885 | 263.1 | 212.5 | 0.85 | 100 |
| **AR100** | 250 | 845 | - | 1,052.3 | 212.5 | 0.85 | 135 |
| **SSC** | 250 | 854.4 | 1,190 | - | 212.5 | 0.85 | 80 |

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

| Mix | Mix Proportion (kg/m$^3$) | | | | | W/C | Slump (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Cement | Sand | Limestone | Recycled Concrete | Effective water | | |
| **SSR25** | 250 | 854.4 | 895.5 | 275.6 | 212.5 | 0.85 | 60 |
| **SSR100** | 250 | 854.4 | - | 1,102.5 | 212.5 | 0.85 | 80 |

### 3.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

AC, SSC หมายถึง คอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานโดยมีทรายและหินปูนย่อยเพียงอย่างเดียวเป็นมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ,มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ตามลำดับ

AR , SSR หมายถึง การใช้มวลรวมหยาบ หินปูนย่อยและเศษคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะ แห้งในอากาศ Air - Dried Recycle Aggregate (AR), การใช้มวลรวมหยาบ หินปูนย่อยและเศษคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะ อิ่มตัวผิวแห้ง Saturated Surface - Dried Recycle Aggregate (SSR) ตามลำดับ

(0, 25, 100) หมายถึง ร้อยละการใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อย

(AR, SSR) (0, 25, 100) หมายถึง การใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติที่สถานะ แห้งในอากาศ Air - Dried Recycle Aggregate (AR), สถานะที่ 2 สถาวะอิ่มตัวผิวแห้ง Saturated Surface - Dry Recycle Aggregate (SSR) (แทนด้วยสัญลักษณ์ AR และ SSR ตามลำดับ) ในอัตราส่วนแทนที่ต่างกัน

**ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์**

AC หมายถึง คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ แทนที่หินปูนย่อยที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ ในอัตราส่วนร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

AR25 หมายถึง คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ แทนที่หินปูนย่อยที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ ในอัตราส่วนร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก

SSR100 หมายถึง คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง แทนที่หินปูนย่อยที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ในอัตราส่วนร้อยละ 100โดยน้ำหนัก

# บทที่ 4
# ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

บทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ในการศึกษา รวมถึงผลกระทบจากการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมที่ได้จากธรรมชาติในอัตราส่วนร้อยละ 25 และ 100 โดยปริมาตร ต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ซึ่งได้แก่ การสูญเสียค่าการยุบตัว กำลังอัด ความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

## 4.1 คุณสมบัติจำเพาะของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

คุณสมบัติของมวลรวมเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่ต้องใช้ในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต นอกจากนี้ยังเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดและที่แข็งตัวแล้ว รวมถึงความทนทานของคอนกรีต มวลรวมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยทรายแม่น้ำ มวลรวมหยาบที่ได้จากธรรมชาติ (หินปูนย่อย) และมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต โดยคุณสมบัติของมวลรวม แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติจำเพาะของมวลรวม

| Properties | River sand | Lime Stone | Recycled Aggregate |
|---|---|---|---|
| Fineness Modulus | 2.01 | 7.05 | 6.40 |
| Bulk Specific gravity(SSD) | 2.67 | 2.74 | 2.70 |
| Water Absorption (%) | 1.11 | 0.85 | 4.77 |
| Dry-Rodded Weight (kg/m$^3$) | 1,643 | 1,542 | 1,432 |
| Void (%) | 36.57 | 42.47 | 40.09 |

จากตารางที่ 4.1 พบว่า มวลรวมละเอียดมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.01 ค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.67 ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.11 มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและหินปูนย่อยมีค่าโมดูลัสความละเอียดของเท่ากับ 6.40 และ 7.05 ตามลำดับ มีค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.74 และ 2.70 ตามลำดับ และมีค่าการดูดซึมน้ำ

เท่ากับร้อยละ 0.85 และ 4.77 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่ามวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าหินปูนย่อยประมาณ 5.6 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hansen และ Narud (1983) และ Chen และคณะ(2003) ที่พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตอยู่ในช่วง ร้อยละ 5.0 ถึง 5.7 ทั้งนี้เนื่องจากซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าจากเศษคอนกรีตเดิมที่ยึดเกาะที่ผิวของมวลรวมมีความพรุน จึงส่งผลให้การดูดซึมน้ำสูงมีค่าสูง

จากผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ พบว่าทรายแม่น้ำมีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,643 กก/ม$^3$ ในขณะที่มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและหินปูนย่อยมีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,542 และ 1,432 กก/ม$^3$ ตามลำดับ สังเกตุได้ว่ามวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าหน่วยน้ำหนักที่ต่ำกว่ามวลรวมหยาบธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์จากเศษคอนกรีตเดิมที่ยึดเกาะที่ผิวของมวลรวมมีความพรุน จึงส่งผลให้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีน้ำหนักลดลงเมื่อเทียบกับหินปูนย่อยที่ปริมาตรเท่ากัน

ตารางที่ 4.2 ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต

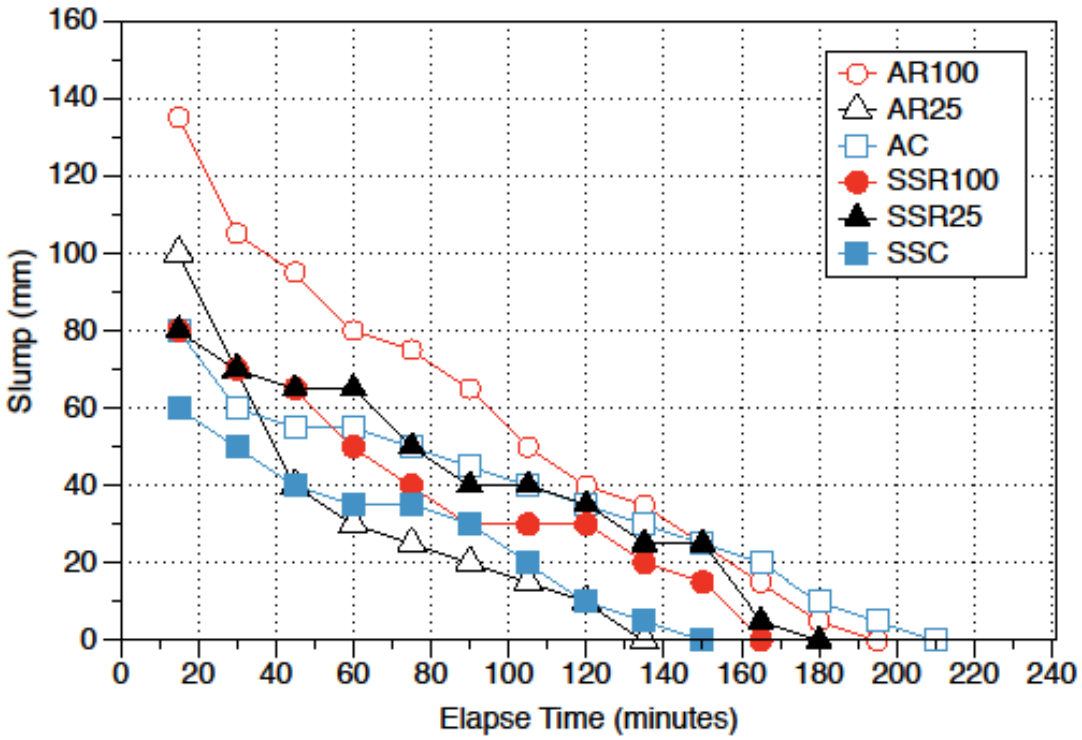
| Sample | Mixing Water (kg/m$^3$) | Absorption Water (kg/m$^3$) | | | Effective Water (kg/m$^3$) | Effective W/C | Slump (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Sand | Stone | Recycle aggregate | | | |
| AC | 231.90 | 9.40 | 10.00 | - | 212.50 | 0.85 | 80 |
| AR25 | 241.90 | 9.40 | 7.50 | 12.50 | 212.50 | 0.85 | 100 |
| AR100 | 272.10 | 9.40 | - | 50.20 | 212.50 | 0.85 | 135 |
| SSC | 221.90 | 9.40 | - | - | 212.50 | 0.85 | 80 |
| SSR25 | 221.90 | 9.40 | - | - | 212.50 | 0.85 | 60 |
| SSR100 | 221.90 | 9.40 | - | - | 212.50 | 0.85 | 80 |

**4.2 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีต**

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตกับระยะเวลา พบว่าทุกตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงการสูญเสียค่ายุบตัวที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่การสูญเสียค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศเริ่มต้นที่เวลา 15 นาทีโดยค่าการยุ่บตัวเริ่มต้นของตัวอย่าง AC, AR25 และ AR100 มีค่าเท่ากับ 80,100 และ 135 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งที่เวลา 15 นาที ของคอนกรีต SSC, SSR25 และ SSR100 มีค่าเท่ากับ 80,60 และ 80 มิลลิเมตร ตามลำดับ หลังจากนั้นค่าการยุบตัวของคอนกรีตก็ลดลงเรื่อย ๆ จนค่ายุบตัวของคอนกรีตมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยพบว่าคอนกรีต AC, AR25 และ AR100 มีค่าการยุบตัวเท่ากับศูนย์ที่เวลา 210,135 และ 195 นาที ตามลำดับ ในขณะที่ SSC, SSR25 และ SSR100 มีค่าการยุบตัวเท่ากับศูนย์ที่เวลา 150,180 และ 165 นาที ตามลำดับ

จากผลการทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตข้างต้น พบว่าความชื้นในมวลรวมมีผลกระทบต่อค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ (คอนกรีต AR100, AR25 และ AC) จะมีค่าการยุบตัวเริ่มต้นสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากการชดเชยน้ำเพื่อปรับสภาวะความชื้นของมวลรวมที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศให้มีความชื้นหรือน้ำในมวลรวมเทียบเท่ากับปริมาณที่มีอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ปริมาณน้ำอิสระในระหว่างการผสมคอนกรีตมีปริมาณมากกว่าส่วนผสมเดียวกันที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ส่งผลให้ค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งที่ใช้ส่วนผสมเดียวกัน

เมื่อเวลาผ่านไปสังเกตุพบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศมีการลดลงของค่าการยุบตัวที่เร็วกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง โดยในช่วงเวลาประมาณ 1 ชั่วโมงแรกจะมีการลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากกการย่อยเศษคอนกรีต หลังจากนั้นการสูญเสียค่าการยุบตัวจะค่อย ๆ ลดลงในลักษณะเดียวกันกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศมีการดูดซึมน้ำในส่วนผสมที่ได้ชดเชยในขณะผสมเพื่อให้ปริมาณน้ำเท่ากันกับปริมาณน้ำในมวลรวมที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต ซึ่งสามารถสังเกตุได้จากเส้นกราฟที่ลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าการดูดซึมที่สูงกว่าหินปูนย่อย




รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตกับระยะเวลา

## 4.3 กำลังอัดของคอนกรีต

### 4.3.1 ผลกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 4.3 และดังรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาผลกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ พบว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อยที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ (AC) มีกำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 34, 82, 113, 138 และ 159 กก./ซม.$^2$ ตามลำดับ เมื่อใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศแทนที่หินปูนย่อยที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศในอัตราร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก (AR25) พบว่ากำลังอัดมีค่าเท่ากับ 67, 120, 143, 176 และ 189 กก./ซม.$^2$ ที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อแทนที่หินปูนย่อยด้วยมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศทั้งหมด พบว่ากำลังอัดมีค่าเท่ากับ 57, 104, 134, 151 และ 177 กก./ซม.$^2$ ที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 กำลังอัดของคอนกรีต

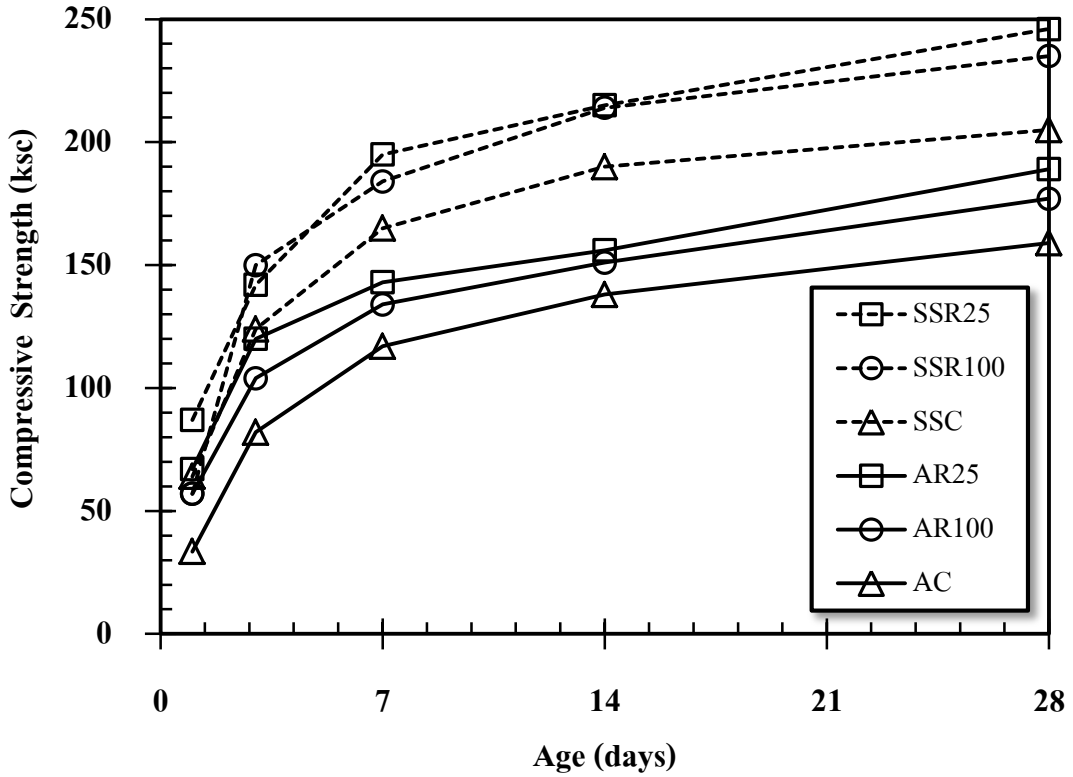
| Sample | Compressive Strength ( ksc) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 day | 3 days | 7 days | 14 days | 28 days |
| AC | 34 | 82 | 117 | 138 | 159 |
| AR25 | 67 | 120 | 143 | 176 | 189 |
| AR100 | 57 | 104 | 134 | 151 | 177 |
| SSC | 64 | 124 | 165 | 190 | 205 |
| SSR25 | 87 | 142 | 195 | 215 | 246 |
| SSR100 | 57 | 150 | 184 | 214 | 235 |

จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่ากำลังอัดของคอนกรีต AR25 มีค่าสูงที่สุดในกลุ่มนี้ (มวลรวมหยาบอยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ) รองลงมาคือคอนกรีต AR100 และ AC ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยครั้งนี้ใช้ปริมาณน้ำที่ทำให้คอนกรีต AR100 มีค่าการยุบตัวประมาณ 10 ซม. เป็นตัวควบคุมในการผสมคอนกรีตอื่น ๆ ด้วย ดังนั้นปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตทุกส่วนผสมจึงมีปริมาณที่ค่อนข้างสูง คือมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 1 การที่คอนกรีต AR25 มีกำลังอัดสูงที่สุดอาจเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่ไม่มากจนเกินไป กล่าวคือในส่วนผสมของ AR25 มีมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก น้ำในการผสมบางส่วนถูกมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตดูดเพื่อปรับสภาพให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ทำให้ปริมาณน้ำที่จะเหลือทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับปูนซีเมนต์ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับกฎของ Abram ที่กล่าวว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง นอกจากนี้การที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตในปริมาณเพียงร้อยล 25 ซึ่งไม่เกินกว่าร้อยละ 30 ตามที่ Limbachiya และคณะ (2000) พบว่ามันไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต ซึ่งทั้งสองประเด็นนี้อาจช่วยส่งผลให้คอนกรีต AR25 มีค่ากำลังอัดสูงในกลุ่มนี้

เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีต AR100 ที่มีกำลังอัดรองลงมา แต่กำลังอัดก็ไม่แตกต่างกับค่ากำลังอัดของคอนกรีต AR25 มากนัก การที่กำลังอัดของคอนกรีต AR100 ต่ำกว่าคอนกรีต AR25 นั้น อาจเนื่องมาจากการที่ใช้หินปูนย่อยในปริมาณที่สูง จึงส่งผลให้คอนกรีตมีความอ่อนแอกว่า เพราะมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีเพสต์หรือมอร์ต้าร์ที่มีความอ่อนแอกว่าหินปูนธรรมชาติผสมอยู่ในปริมาณมากกว่านั่นเอง

ส่วนกำลังอัดคอนกรีต AC ที่มีค่าต่ำที่สุดในกลุ่มนี้ เนื่องจากปริมาณน้ำในการผสมที่สูง (W/C =0.89) จึงส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีต AC ลดลงและไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้มากจนมีค่าสูง

กว่าคอนกรีต AR25 และ AR100 ได้ ทั้งนี้เพราะค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำของหินปูนย่อย รวมถึงหินปูนมีความทึบน้ำสูงกว่าซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์ซึ่งมีความพรุนในเนื้อของมันที่ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตทำให้ปริมาณน้ำที่ชดเชยถูกดูดเข้าสู่มวลรวมช้ากว่า ส่งผลให้เมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวก็จะมีโพรงเนื่องจากมีน้ำคงเหลืออยู่ในเนื้อซีเมนต์เพสต์หรือทีเรียกว่า capillary pores ในปริมาณที่มากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตนั่นเอง




รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของคอนกรีต

**4.3.2 ผลกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง**

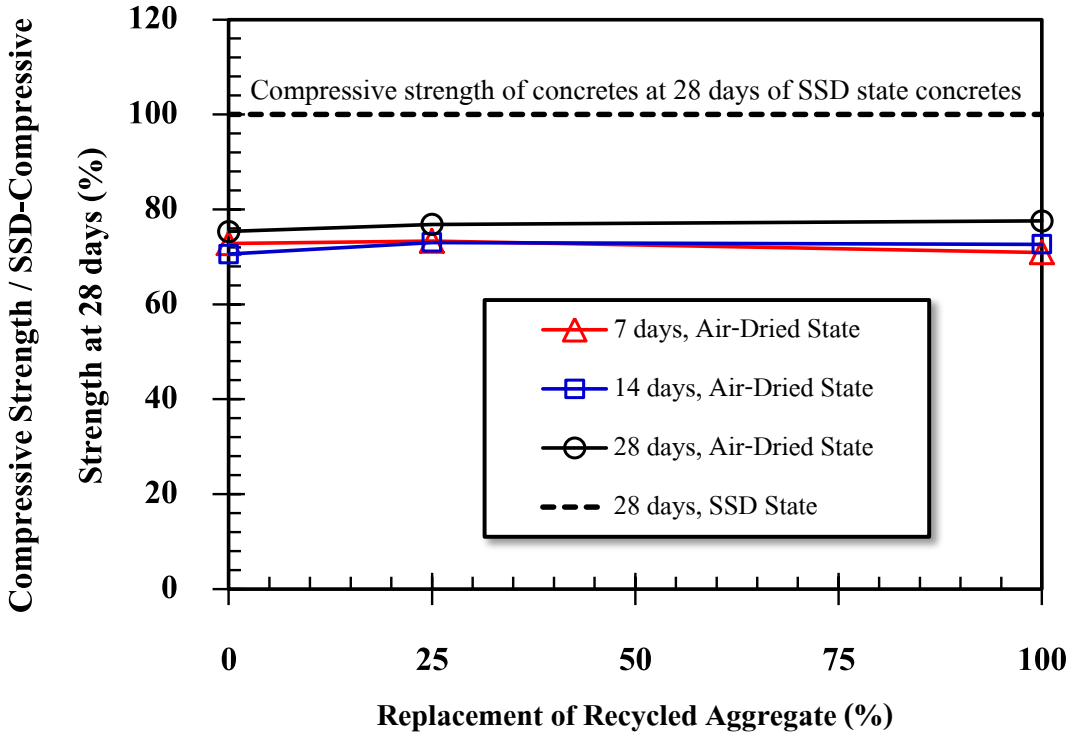
จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.2 พบว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อยที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSC) มีกำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 64, 124, 165, 190 และ 205 กก./ซม.$^2$ ตามลำดับ เมื่อใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยในอัตราส่วนร้อยละ 25 (SSR25) พบว่ากำลังอัดมีค่าเท่ากับ 87, 142, 195, 215 และ 246 กก./ซม.$^2$ ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ของมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นร้อยละ 100 (SSR100) พบว่ากำลังอัดมีค่าเท่ากับ 57, 150, 184, 214 และ 235 กก./ซม.$^2$ ตามลำดับ

จากผลกำลังอัดของคอนกรีต SSC, SSR25 และ SSR100 พบว่าคอนกรีต SSR25 มีกำลังอัดสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตในปริมาณเพียงร้อยละ 25 ซึ่งไม่เกินกว่าร้อยละ 30 ตามที่ Limbachiya และคณะ (2000) พบว่ามันไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต ส่วนกำลังอัดของคอนกรีต SSR100 มีค่าต่ำกว่าคอนกรีต SSR25 เพราะผลกระทบจากการใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตที่สูง จึงส่งผลกระทบให้กำลังอัดลดต่ำลงกว่าของ SSR25 ส่วนกำลังอัดของคอนกรีต SSC ที่ใช้หินปูนย่อยนั้นมีกำลังต่ำที่สุดในกลุ่ม เนื่องจากการที่งานวิจัยนี้ใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมในปริมาณที่สูง ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่ได้จากการปรับแก้ค่าเพื่อให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าการยุบตัวประมาณ 10 ซม. ดังนั้นจึงทำให้มีปริมาณน้ำมากกว่าที่ต้องการใช้จริงอยู่ค่อนข้างมาก จึงส่งผลให้กำลังของซีเมนต์เพสต์ลดลงอย่างมาก ด้วยเหตุผลเดียวกับผลของกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ

### 4.3.3 การเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศและสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง

รูปที่ 4.3 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งที่อายุเดียวกัน โดยผลกำลังอัดที่เลือกมาพิจารณาในกราฟนั้นใช้ผลกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 ถึง 28 วัน ทั้งนี้เนื่องจากค่าร้อยละกับอัดที่เทียบออกมามีค่าค่อนข้างคงที่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี




รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งและร้อยละการแทนที่ของมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต

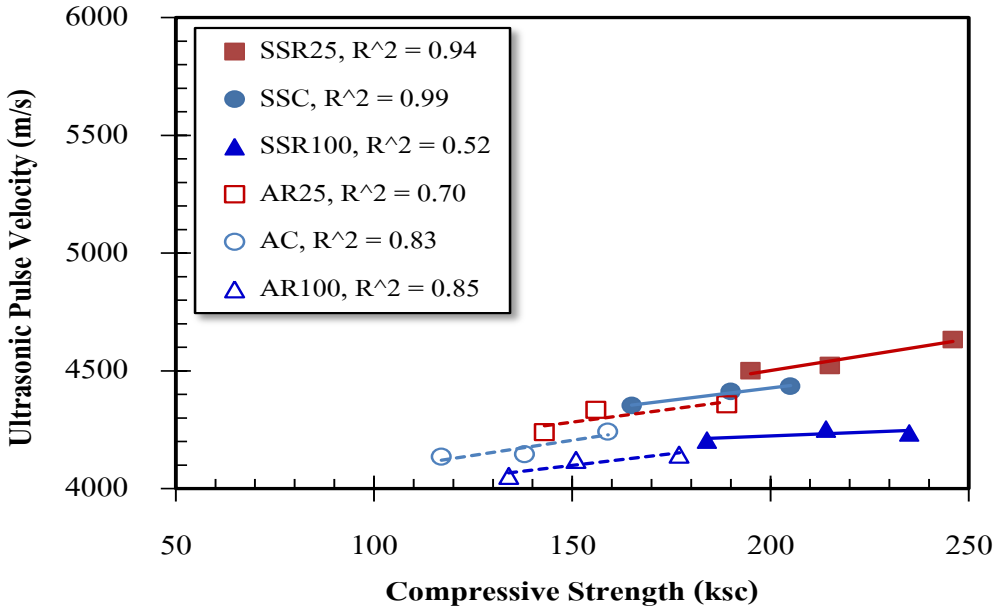
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อพิจารณาค่าที่ได้จากรูปที่ 4.3 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศมีค่ากำลังอัดคิดเป็นประมาณร้อยละ 71 ถึง 78 ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง โดยพบว่าการแทนที่หินปูนย่อยด้วยมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตส่งผลกระทบต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดน้อยกว่าการใช้มวลรวมที่สภาวะที่แตกต่างกัน แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้มีการใช้ปริมาณน้ำในการผสมที่ค่อนข้างสูงเพื่อที่จะทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตทั้งหมดสามารถผสมได้ค่าความสามารถในการทำงานได้ จึงอาจส่งผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะความชื้นที่แตกต่างกันมีค่าต่างกันค่อนข้างมาก ดังนั้นสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าการใช้มวลรวมหยาบทั้งจากธรรมชาติ (หินปูนย่อย) และจากการย่อยเศษคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศจะส่งผลให้กำลังของคอนกรีตลดลง เนื่องจากการที่ต้องเพิ่มปริมาณน้ำเพื่อปรับสภาวะของมวลรวมให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งนั่นเอง

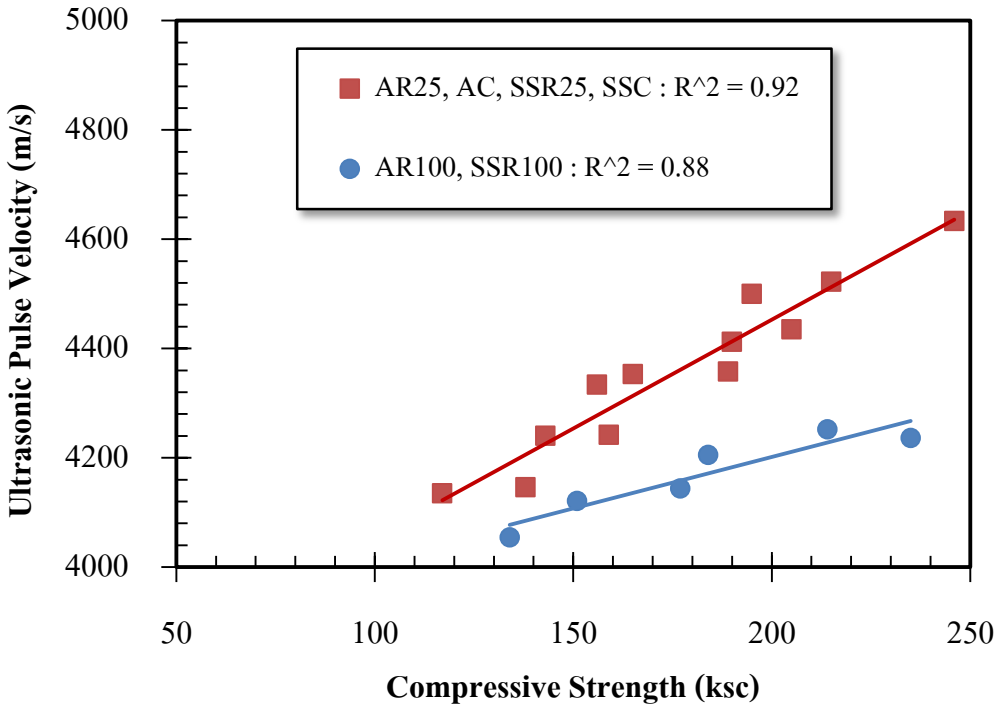
**4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของกำลังอัดและอัตราความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคของคอนกรีต**

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคพัลส์ที่วิ่งผ่านตัวอย่างคอนกรีต ในกราฟความสัมพันธ์ใช้ค่ากำลังอัดและค่าความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคพัลส์ที่อายุทดสอบ 7, 14 และ 28 วัน มาพล็อต เนื่องจากเป็นช่วงอายุที่มีการพัฒนากำลังอัดค่อนข้างคงที่ โดยผลการทดสอบคอนกรีตพบว่าค่าความเร็วอัลตร้าโซนิคพัลส์ของคอนกรีตทุกส่วนผสมมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณากลุ่มคอนกรีตในรูปที่ 4.5 พบว่าแนวโน้มของกลุ่มคอนกรีตสามารถแยกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกได้แก่ คอนกรีต SSR25, คอนกรีต SSC, คอนกรีต AR25 และ คอนกรีต AC ส่วนอีกกลุ่มได้แก่ คอนกรีต SSR100 และคอนกรีต AR100 โดยกลุ่มแรกเป็นกลุ่มตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่เป็นหินปูนย่อย และมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตร้อยละ 25 แม้ว่าคอนกรีตในกลุ่มแรกนี้มีค่ากำลังอัดที่ต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาโดยรวมกลับพบว่าความสัมพันธ์มีความต่อเนื่องกันอย่างเห็นได้ชัด เพื่อให้เห็นความชัดเจนยิ่งขึ้น จึงได้ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคพัลส์และกำลังอัดของคอนกรีตขึ้นมาดังรูปที่ 4.8 ซึ่งจากรูปพบว่าความสัมพันธ์ที่ได้จากเส้นแนวโน้มมีค่าสูงกว่าคอนกรีตกลุ่มที่สองและความน่าเชื่อถือของข้อมูลเท่ากับร้อยละ 92 ส่วนคอนกรีตในกลุ่มที่สองซึ่งเป็นกลุ่มที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตทั้งหมดมีความน่าเชื่อถือของเส้นแนวโน้มที่ได้จากข้อมูลเท่ากับร้อยละ 82




รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคพัลส์และกำลังอัดของคอนกรีต




รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคพัลส์และกำลังอัดของคอนกรีตที่จัดแยกเป็น 2 กลุ่ม

เมื่อวิเคราะห์ผลในรูปที่ 4.5 พบว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อยและที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตร้อยละ 25 ในส่วนผสม มีค่าความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคพัลส์สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตร้อยละ 100 ในส่วนผสม ที่มีค่ากำลังอัดเท่ากัน เนื่องจากการใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตไม่เกินกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต นั่นอาจหมายถึงการเป็นตัวนำคลื่นสัญญาณอัลตร้าโซนิคได้ดีพอๆ กับหินปูนย่อยนั่นเอง แต่เมื่อใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีตทั้งหมด พบว่าความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคพัลส์มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีเพสต์หรือมอร์ต้าร์เกาะอยู่ที่ผิวของมวลรวมซึ่งผิวสัมผัสระหว่าง มวลรวมเดิมกับเพสต์หรือมอร์ต้าร์เดิมอาจมีรอยร้าวจากกระบวนการย่อยโดยรอยร้าวดังกล่าวก็คือช่องว่างในคอนกรีต ที่เป็นตัวทำให้คลื่นอัลตร้าโซนิควิ่งผ่านได้ช้าลงเมื่อวิ่งผ่านระยะทางที่เท่ากันโดยใช้เวลานานขึ้น นั่นคือความเร็วที่ใช้ในการวิ่งผ่านคอนกรีตก็ลดลงตามไปด้วยนั่นเอง

ดังนั้นผลกระทบจากความชื้นในตัวอย่างคอนกรีตต่อค่าความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคพัลส์ไม่ชัดเจน เนื่องจากค่าความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคพัลส์จากผลการทดสอบขึ้นกับค่ากำลังอัดของคอนกรีต โดยผลกระทบที่ชัดเจนต่อค่าความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคพัลส์คือการใช้มวลรวมหยาบ

จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีตทั้งหมด ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคพัลส์ลดลงอย่างชัดเจน

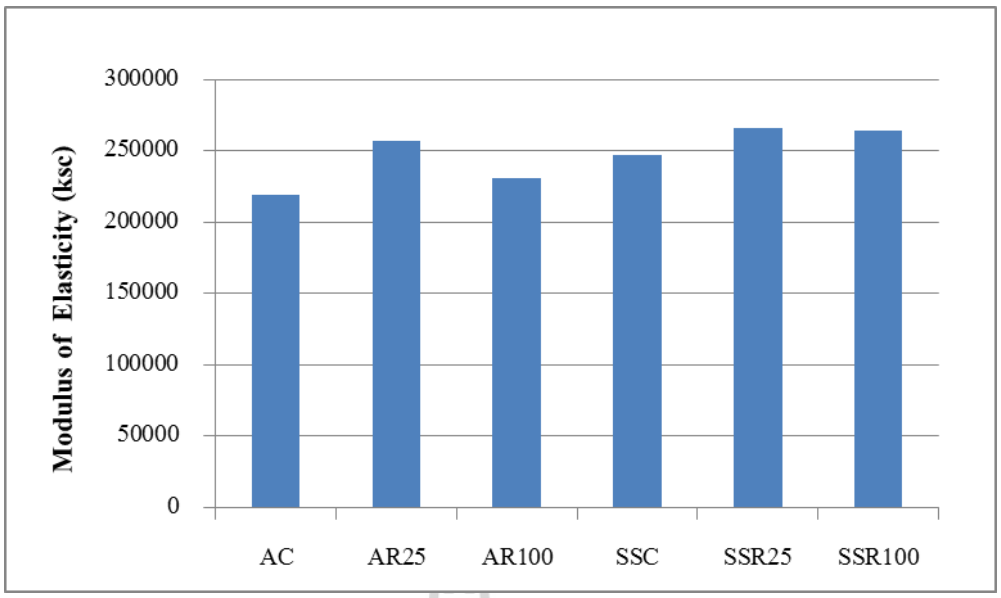
### 4.5 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

จากตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต AC, AR25 และAR100 มีค่าเท่ากับ 219186, 256540 และ 231185 กก./ซม.$^2$ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการแทนค่ากำลังอัดที่ได้จากการทดสอบในสมการของ ACI 318 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 15100 $\sqrt{f_c'}$ พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบในสภาวะแห้งในอากาศ AC, AR25 และ AR100 มีค่าต่างจากการคำนวนด้วยสมการของ ACI 318 เท่ากับร้อยละ 15.1, 23.6 และ 15.1 ตามลำดับ ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต SSC, SSR25 และ SSR100 ที่อายุเดียวกันอมีค่าเท่ากับ 247160, 265978 และ 264512 กก./ซม$^2$ ซึ่งมีค่าต่างจากการคำนวนด้วยสมการของ ACI 318 เท่ากับร้อยละ 14.3, 12.3 และ 14.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

| Sample | $f_c'$ (ksc) | Modulus of Elasticity at 28 days (kg/cm$^2$) | | Compared with ACI 318 (%) |
|---|---|---|---|---|
| | | This Research | ACI 318 | |
| AC | 159 | 219186 | 190403 | 15.1 |
| AR25 | 189 | 256540 | 207590 | 23.6 |
| AR100 | 177 | 231185 | 200892 | 15.1 |
| SSC | 205 | 247160 | 216199 | 14.3 |
| SSR25 | 246 | 265978 | 236834 | 12.3 |
| SSR100 | 235 | 264512 | 231478 | 14.3 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี




รูปที่ 4.6 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบที่ได้จากหินปูนย่อย

จากรูปที่ 4.6 เมื่อพิจารณาคอนกรีตในกลุ่มที่ใช้มวลรวมหยาบในสภาวะแห้งในอากาศ พบว่า คอนกรีต AR25 มีค่าโมดูลัสสูงสุด รองลงมาคือ คอนกรีต AR100 และ AC ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตในกลุ่มนี้มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด กล่าวคือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตแปรผันตรงกับค่ากำลังอัดของคอนกรีต กลุ่มคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งก็ได้ผล การทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับกลุ่มคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ คือ แปรผันตรงกับค่ากำลังอัดของคอนกรีต นั่นเอง

# บทที่ 5
# สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการศึกษา สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศจะมีค่าการยุบตัวในช่วงต้นที่สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศมีปริมาณมากกว่า เนื่องจากการชดเชยน้ำเพื่อให้มวลรวมมีปริมาณน้ำเท่ากับมวลรวมที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง

5.1.2 ส่วนการสูญเสียค่าการยุบตัว คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศจะมีการสูญเสียค่าการยุบตัวเร็วกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง เนื่องจาก มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศมีการดูดซึมน้ำเข้าสู่มวลรวมจึงทำให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมลดลงรวดเร็วในช่วงแรก โดยเฉพาะในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากเศษคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ

5.1.3 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศใช้น้ำในการผสมมากกว่าเนื่องจากการชดเชยน้ำในมวลรวมให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้จริงมีค่าสูงกว่าที่ใช้ในคอนกรีตที่มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง และส่งผลต่อการลดลงของกำลังอัดนั่นเอง

5.1.4 สภาวะความชื้นของมวลรวมหยาบไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิคพัลส์ แต่สิ่งที่ส่งผลกระทบต่อค่าความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิค คือกำลังอัดของคอนกรีตและปริมาณของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต กล่าวคือ การใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมดส่งผลให้ค่าความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิค พัลส์ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีเพลส์หรือมอร์ต้าร์เกาะอยู่ และรอยร้าวที่เกิดจากการกระบวนการย่อยคอนกรีต

5.1.5 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตขึ้นอยู่กับค่ากำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งแสดงให้เห็นทางอ้อมว่าสภาวะความชื้นจะมีผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อมันมีผลกระทบต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นไปในการศึกษาผลกระทบของสถานะความชื้นและการดูดซึมน้ำของมวลรวมธรรมชาติและมวลรวมรีไซเคิลต่อค่าการยุบตัว และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบที่ได้จากหินปูนย่อย ในอัตราส่วนร้อยละ 25 และ 100 โดยปริมาตร ดังนั้นในอนาคตควรทำการศึกษาในด้านอื่น ๆ เช่น การศึกษาเกี่ยวกับส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ทั้งหมดโดยไม่สูญเสียค่ากำลังอัด

5.2.2 จากการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมร่วมกับมวลรวมหยาบที่ได้จาก หินปูนย่อยส่งผลให้มีค่าการยุบตัวลดลงและสูญเสียค่ายุบตัวอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงควรศึกษาการนำมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมร่วมกับมวลรวมหยาบที่ได้จากหินปูนย่อยมาใช้ เช่น ผนังสำเร็จรูป แบริเออร์ ถนนคอนกรีต งานที่ต้องการค่าการยุบตัวที่สูงในช่วงระยะเวลาแรก หรือ โครงสร้างที่ไม่ต้องการกำลังรับแรงอัดที่มากนัก ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการใช้วัสดุ และที่สำคัญยังเป็นการนำเศษวัสดุที่เหลือใช้นำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกทางหนึ่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# เอกสารอ้างอิง

De Oliveria, M.B. and Vazquez, E., 1996, **"The Influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete",** Waste Management, Vol. 16, No. 1-3, pp. 113 - 117.

Ravindrajah, R.S. and Tam, T.C., 1985, **"Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate",** Magazine of concrete research, Vol.37, Issue 130, March, pp. 29 - 38.

Limbachiya, M.C., Leelawat, T., and Dhir, R.K., 2000, "**Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete"**, Materials and Structures, Vol. 33, pp. 574 – 580.

Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Fok, H., and Kou, S.C., 2004, **"Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete,"** Cement and Concrete Research, Vol.34, pp.31-36.

Etxeberria, M., Vazquez, E., Mari, A., and Barra, M., 2007, **"Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete,"** Cement and Concrete Research, Vol. 37, Issue 5, pp.735 - 742.

Hansen, T.C. and Narud, H., 1983, **"Strength of recycled aggregate concrete made from cushed concrete coarse aggregate",** Concrete International, Vol. 5, No. 1, pp. 79 - 83.

Limbachya, M.C., Leelawat, T., and Dhir, R.K., 2000, **"Use of recycled aggregate concrete aggregate in high-strength concrete",** Materials and Structures, Vol. 33, pp. 574-580.

Somna, R, Jaturapitakkul, C. and Made, A.M. (2012a), **"Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete",** Cement and Concrete Composite, Vol.34, pp.848 - 854.

Somna, R, Jaturapitakkul, C., Chalee, W. and Rattanachu, P. (2012b), **"Effect of the water to binder ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate concrete"**, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.24, No.1, pp.16 - 22.

Somna, R, Jaturapitakkul, C., Rattanachu, P. and Chalee, W. (2012c), **"Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete"**, Materials and Design, Vol.36, pp.597 - 603.

Lopez-Gayarre, F., Serna, P., Domingo-Cabo, A,. Serrano-Lopez, M.A., Lopez-Colina, C., 2009, **"Influence of Recycled Aggregate Quality and Proportioning Criteria on Recycled Concrete Properties"**, Waste Management, Vol.29, 3022 - 3028

B.C.S.J., 1978, **"Study on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete",** Building Contractors Society of japan, Committee on Disposal and Reuse of concrete Construction Waste, Summary in Concrete Journal, Japan, Vol. 16, No.7, pp. 18 - 31

De Juan, M.S. and Gutierrez, P.A., 2009, **"Study on the Influence of Attached Moetar Content on the Properties of Recycled Concrete Aggregate",** Construction and building Materials, Vol.23, pp. 872 - 877

Tavakoli and Soroushian, 1996 **"Strengths of Recycled Aggregate Concrete Made using Field-Demolished Concrete as Aggregate",** ACI Materials Journal, Vol.93, No.2 pp. 182 - 190

อิทธิพล ศิริสวัสดิ์, และวิทวัส พันยา. 2527. **"ความมหน่าเชื่อถือในการประเมินคุณสมบัติกำลังอัดของคอนกรีตด้วยการทดสอบแบบไม่ทำลายโดยวิธีอุลตราโซนิคพัลส์เวโลซิตี้"** การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครังที่ 2, สมาคมคอนกรีตไทย,26 - 27 ตุลาคม 2547 จังหวัดเชียงใหม่. A24.

รักษ์ บูรณสิงห์ ปี 2547 **"การศึกษาการรับกำลังของคอนกรีตเมื่อใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้",** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

# ภาคผนวก ก
# ตารางและรูปแสดงคุณสมบัติจำเพาะของมวลรวม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของทรายแม่น้ำ

| **Materials Identification** | **Sample 1** | **Sample 2** | **Sample 3** | **Average** |
|---|---|---|---|---|
| Weight of Sand in Oven-Dry , A (g) | 493.75 | 494.23 | 495.62 | |
| Weight of Flask + Water, B (g) | 668.60 | 669.10 | 669.10 | |
| Weight of Flask+Water+Sand , C (g) | 978.40 | 977.70 | 978.00 | |
| Weight of Sand in SSD , S (g) | 500.00 | 500.00 | 500.00 | |
| Bulk Specific Gravity (Oven-Dry) : A/(B+S-C) | 2.60 | 2.58 | 2.59 | 2.59 |
| Bulk Specific Gravity (SSD) : S/(B+S-C) | 2.63 | 2.61 | 2.62 | 2.62 |
| Apparent Specific Gravity : A/(A+B-C) | 2.68 | 2.66 | 2.65 | 2.66 |
| Absorption : (S-A)/A x 100 (%) | 1.27 | 1.17 | 0.88 | 1.10 |

ตารางที่ ก.2 ค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหินธรรมชาติ

| **Materials Identification** | **Sample 1** | **Sample 2** | **Sample 3** | **Sample 4** | **Sample 5** | **Average** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Weight of Limestone in Oven-Dry , A (kg) | 1,979.47 | 1,994.87 | 1,983.82 | 1,980.60 | 1,979.46 | |
| Weight of Limestone in SSD , B (kg) | 2,000.90 | 2,000.20 | 2,000.50 | 2,000.60 | 2,000.30 | |
| Weight of Limestone in Water , C (kg) | 1,256.70 | 1,264.10 | 1,259.30 | 1,257.80 | 1,258.50 | |
| Bulk Specific Gravity (Oven-Dry) : A/(B -C) | 2.66 | 2.71 | 2.68 | 2.67 | 2.67 | 2.68 |
| Bulk Specific Gravity (SSD) : B/(B -C) | 2.69 | 2.72 | 2.70 | 2.69 | 2.70 | 2.70 |
| Apparent Specific Gravity : A/(A+B-C) | 2.74 | 2.73 | 2.74 | 2.74 | 2.75 | 2.74 |
| Absorption : (B-A)/A x 100 (%) | 1.08 | 0.27 | 0.84 | 1.01 | 1.05 | 0.85 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.3 ค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

| Materials Identification | Sample 1 | Sample 2 | Sample 3 | Sample 4 | Sample 5 | Average |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Weight of Limestone in Oven-Dry , A (kg) | 1,910.90 | 1,904.65 | 1,908.64 | 1,911.55 | 1,911.55 | |
| Weight of Limestone in SSD , B (kg) | 2,000.00 | 2,000.10 | 2,000.80 | 2,000.7 | 2,000.7 | |
| Weight of Limestone in Water , C (kg) | 1,208.50 | 1,199.40 | 1,199.90 | 1,200.3 | 1,200.3 | |
| Bulk Specific Gravity (Oven-Dry) : A/(B -C) | 2.41 | 2.38 | 2.38 | 2.39 | 2.39 | 2.39 |
| Bulk Specific Gravity (SSD) : B/(B -C) | 2.53 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 |
| Apparent Specific Gravity : A/(A+B-C) | 2.72 | 2.70 | 2.69 | 2.69 | 2.69 | 2.70 |
| Absorption : (B-A)/A x 100 (%) | 4.66 | 5.01 | 4.82 | 4.66 | 4.66 | 4.76 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.4 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียดที่ได้จากทรายแม่น้ำ

| Sieve No. | Sieve Opening (mm.) | Sieve Weight (g) | Sieve and Fine Agg. (g) | Fine Agg. Retained (%) | Percent Retined (%) | Cumulative Percent Retained (%) | Percent Passing (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3/8” | 9.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| #4 | 4.75 | 441.63 | 466.34 | 24.71 | 2.471 | 2.471 | 97.529 |
| #8 | 2.36 | 408.18 | 451.86 | 43.68 | 4.367 | 6.838 | 95.633 |
| #16 | 1.18 | 331.39 | 413.60 | 82.21 | 8.220 | 15.058 | 91.780 |
| #30 | 0.60 | 310.38 | 460.66 | 150.28 | 15.026 | 30.084 | 84.974 |
| #50 | 0.30 | 282.6 | 567.22 | 284.62 | 28.458 | 58.542 | 71.542 |
| #100 | 0.15 | 258.98 | 563.24 | 304.26 | 30.422 | 88.964 | 69.578 |
| pan | - | 343.96 | 454.33 | 110.37 | 11.036 | 100.000 | 88.964 |
| **Sum** | | | | 1000.13 | | 201.96 | |
| **Fineness Modulus** = 2.019 | | | | | | | |

ตารางที่ ก.5 การกระจายตัวของมวลรวมที่ได้จากหินธรรมชาติ

| Sieve No. | Sieve Opening (mm.) | Sieve Weight (g) | Sieve and Fine Agg. (g) | Line Stone Retained (g) | Percent Retined (%) | Cumulative Percent Retained (%) | Percent Passing (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3/4” | 19.00 | 624.66 | 624.66 | 0 | 0.000 | 0.000 | 100.000 |
| 3/8” | 9.50 | 683.07 | 951.51 | 268.44 | 13.729 | 13.729 | 86.271 |
| #4 | 4.75 | 718.93 | 2269.98 | 1551.05 | 79.326 | 93.055 | 6.945 |
| #8 | 2.36 | - | - | - | - | - | - |
| pan | - | 438.36 | 438.36 | 470 | 31.64 | 6.328 | - |
| Sum | | | | 1955.3 | | | |
| Fineness Modulus = 6.45 | | | | | | | |

ตารางที่ ก.6 การกระจายตัวของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

| Sieve No. | Sieve Opening (mm.) | Sieve Weight (g) | Sieve and Fine Agg. (g) | Line Stone Retained (g) | Percent Retined (%) | Cumulative Percent Retained (%) | Percent Passing (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3/4” | 19.00 | 785 | 785 | 0 | 0.000 | 0.000 | 100.000 |
| 3/8” | 9.50 | 715 | 1785 | 1070 | 53.500 | 53.500 | 46.500 |
| #4 | 4.75 | 755 | 1600 | 845 | 42.250 | 95.750 | 4.250 |
| #8 | 2.36 | 685 | 750 | 65 | 3.250 | 99.000 | 1.000 |
| pan | - | 385 | 405 | 20 | 4.000 | | - |
| Sum | | | | 2000 | | | |
| Fineness Modulus = | | | | | 6.49 | | |

ตารางที่ ก.7 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมละเอียดที่ได้จากทรายแม่น้ำ

| Materials Identification | Sample 1 | Sample 2 | Average |
|---|---|---|---|
| Weight of Measuring Cylinder (kg) | 7.675 | 7.675 | |
| Volume of Measuring Cylinder ($m^3$) | 0.0015707 | 0.0015707 | |
| Weight of Measuring Cylinder + Sand (kg) | 10.255 | 10.250 | |
| Weight of Sand (kg) | 2.58 | 2.575 | |
| Unit Weight of Sand , M ($kg/m^3$) | 1642.57 | 1639.39 | 1640.98 |
| Water Absorption , A (%) | 2.67 | 2.67 | |
| Bulkspecific Gravity (Oven-Dry) , s | 2.59 | 2.59 | |
| Unit Weight in SSd condition : M[1+(A/100)] , $kg/m^3$ | 1686.42 | 1683.16 | 1684.79 |
| Void Content : 100[(S x W) – M] / (S x W ) , (%) | 36.58 | 36.70 | 36.64 |

ตารางที่ ก.8 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบที่ได้จากหินปูนย่อย

| Materials Identification | Sample 1 | Sample 2 | Average |
|---|---|---|---|
| Weight of Measuring Cylinder (kg) | 9.685 | 9.685 | |
| Volume of Measuring Cylinder ($m^3$) | 0.013744 | 0.013744 | |
| Weight of Measuring Cylinder + Sand (kg) | 30.875 | 30.880 | |
| Weight of Sand (kg) | 21.19 | 21.195 | |
| Unit Weight of Sand , M ($kg/m^3$) | 1541.76 | 1542.12 | 1541.94 |
| Water Absorption , A (%) | 0.85 | 0.85 | |
| Bulkspecific Gravity (Oven-Dry) , s | 2.86 | 2.86 | |
| Unit Weight in SSd condition : M[1+(A/100)] , $kg/m^3$ | 1554.86 | 1555.22 | 1555.04 |
| Void Content : 100[(S x W) – M] / (S x W ) , (%) | 42.47 | 42.45 | 42.46 |

ตารางที่ ก.9 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษอนกรีต

| Materials Identification | Sample 1 | Sample 2 | Average |
|---|---|---|---|
| Weight of Measuring Cylinder (kg) | 9.685 | 9.685 | |
| Volume of Measuring Cylinder ($m^3$) | 0.013744 | 0.013744 | |
| Weight of Measuring Cylinder + Sand (kg) | 29.325 | 29.40 | |
| Weight of Sand (kg) | 19.64 | 19.715 | |
| Unit Weight of Sand , M ($kg/m^3$) | 1428.98 | 1434.44 | 1431.71 |
| Water Absorption , A (%) | 4.77 | 4.77 | |
| Bulkspecific Gravity (Oven-Dry) , s | 2.39 | 2.39 | |
| Unit Weight in SSd condition : M[1+(A/100)] , $kg/m^3$ | 1497.14 | 1615.67 | 1615.48 |
| Void Content : 100[(S x W) – M] / (S x W ) , (%) | 40.21 | 39.98 | 40.09 |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.10 ความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบหินธรรมชาติ

| Materials Identification | Sample 1 | Sample 2 | Sample 3 |
|---|---|---|---|
| Total Weight of Aggregate (g) | 5000 | 5000 | 5000 |
| Weight of Agg. Retain No.12 (g) | 770 | 705 | 745 |
| Weight of Agg. passing No.12 (g) | 4230 | 4295 | 4255 |
| Abraion Loss (%) | 15.4 | 14.1 | 14.9 |
| Average Abraion Loss (%) | 14.8 | | |

ตารางที่ ก.11 ความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

| Materials Identification | Sample 1 | Sample 2 | Sample 3 |
|---|---|---|---|
| Total Weight of Aggregate (g) | 5000 | 5000 | 5000 |
| Weight of Agg. Retain No.12 (g) | 1320 | 1225 | 1250 |
| Weight of Agg. passing No.12 (g) | 3680 | 3775 | 3750 |
| Abraion Loss (%) | 26.40 | 24.50 | 25.00 |
| Average Abraion Loss (%) | 25.3 | | |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# ภาคผนวก ข

## ตารางและรูปแสดงผลการทดสอบค่าการยุบตัว กำลังอัดและ อัตราความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค พัลส์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 กำลังอัดและอัตราความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิค พัลส์ ของคอนกรีต เมื่อใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมหินปูนย่อย AC

| Mix No. 1 | **AC** | Slump 80 (mm.) |
|---|---|---|

| Mix | Age | Sample | Width | Height | Length | Weight | Density | | Load | Comp.Strength | | UPV | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (days) | No. | (cm.) | (cm.) | (cm.) | (kg.) | (kg/m$^3$) | | (kN) | (ksc.) | | (m/s) | |
| AC | 1 | 1 | 51.08 | 15.15 | 15.19 | 8.20 | 697.15 | 2,017.77 | 73.20 | 9.62 | 28.76 | | |
| | | 2 | 15.06 | 15.40 | 15.37 | 8.20 | 2,298.95 | | 72.90 | 32.10 | | | |
| | | 3 | 15.26 | 15.13 | 15.09 | 8.16 | 2,340.68 | | 69.20 | 30.63 | | | |
| | | 4 | 15.09 | 15.06 | 15.09 | 8.22 | 2,397.00 | | 83.80 | 37.51 | | | |
| | | 5 | 15.08 | 15.23 | 15.04 | 8.14 | 2,355.10 | | 75.50 | 33.93 | | | |
| | 3 | 1 | 15.13 | 15.08 | 15.12 | 8.17 | 2,366.81 | 2,356.91 | 194.40 | 86.62 | 82.04 | 3,916 | 3,863.20 |
| | | 2 | 15.13 | 15.18 | 15.10 | 8.17 | 2,354.34 | | 191.60 | 85.49 | | 3,788 | |
| | | 3 | 15.18 | 15.18 | 15.11 | 8.20 | 2,355.08 | | 172.40 | 76.62 | | 3,780 | |
| | | 4 | 15.12 | 15.15 | 15.05 | 8.10 | 2,349.55 | | 182.30 | 81.66 | | 3,916 | |
| | | 5 | 15.11 | 15.04 | 15.12 | 8.11 | 2,358.79 | | 178.90 | 79.82 | | 3,916 | |
| | 7 | 1 | 15.11 | 15.11 | 15.14 | 8.11 | 2,346.21 | 2,346.44 | 253.10 | 112.78 | 116.69 | 4,167 | 4,137.33 |
| | | 2 | 15.11 | 15.03 | 15.16 | 8.11 | 2,354.13 | | | | | 4,155 | |
| | | 3 | 15.14 | 15.13 | 15.16 | 8.18 | 2,354.09 | | 249.10 | 110.63 | | 4,135 | |
| | | 4 | 15.14 | 15.13 | 15.12 | 8.10 | 2,337.22 | | 284.40 | 126.64 | | 4,110 | |
| | | 5 | 15.23 | 15.19 | 15.19 | 8.23 | 2,340.56 | | | | | 4,110 | |
| | 14 | 1 | 15.11 | 15.10 | 15.14 | 8.07 | 2,336.18 | 2,341.14 | 318.60 | 141.97 | 138.06 | 4,100 | 4,146.60 |
| | | 2 | 15.15 | 15.10 | 15.27 | 8.17 | 2,337.37 | | 309.70 | 136.46 | | 4,155 | |
| | | 3 | 15.06 | 15.15 | 15.24 | 8.11 | 2,332.37 | | 295.80 | 131.38 | | 4,155 | |
| | | 4 | 15.02 | 15.11 | 15.16 | 8.05 | 2,338.26 | | 319.20 | 142.90 | | 4,098 | |
| | | 5 | 15.13 | 15.11 | 15.17 | 8.19 | 2,361.54 | | 309.80 | 137.59 | | 4,225 | |
| | 28 | 1 | 15.00 | 15.00 | 15.00 | 8.16 | 2,416.30 | 2,405.50 | 353.60 | 160.20 | 159.38 | 4,210 | 4,241.60 |
| | | 2 | 15.07 | 15.00 | 14.97 | 8.16 | 2,411.37 | | 367.30 | 165.97 | | 4,213 | |
| | | 3 | 15.07 | 15.00 | 15.00 | 8.16 | 2,405.07 | | 349.00 | 157.38 | | 4,237 | |
| | | 4 | 15.07 | 15.00 | 14.90 | 8.05 | 2,390.04 | | 342.10 | 155.30 | | 4,274 | |
| | | 5 | 15.10 | 15.00 | 15.00 | 8.17 | 2,404.71 | | 351.20 | 158.06 | | 4,274 | |

ตารางที่ ข.2 กำลังอัดและอัตราความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิค พัลส์ ของคอนกรีต เมื่อใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมหินปูนย่อย AR25

| Mix No. 2 | **AR25** | Slump 100 (mm.) |
|---|---|---|

| Mix | Age | Sample | Width | Height | Length | Weight | Density | | Load | Comp.Strength | | UPV | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (days) | No. | (cm.) | (cm.) | (cm.) | (kg.) | (kg/m$^3$) | | (kN) | (ksc.) | | (m/s) | |
| **AR 25** | 1 | 1 | 15.08 | 15.21 | 15.06 | 8.01 | 2,318.87 | 2,329.59 | 154.80 | 69.48 | 66.63 | | |
| | | 2 | 15.07 | 15.24 | 15.22 | 8.14 | 2,328.69 | | 148.00 | 65.78 | | | |
| | | 3 | 15.13 | 14.82 | 15.05 | 8.08 | 2,394.35 | | 147.00 | 65.81 | | | |
| | | 4 | 15.38 | 15.16 | 15.19 | 8.03 | 2,267.26 | | 155.00 | 67.63 | | | |
| | | 5 | 15.14 | 15.14 | 15.10 | 8.10 | 2,338.77 | | 144.60 | 64.48 | | | |
| | 3 | 1 | 15.13 | 15.00 | 15.12 | 8.13 | 2,369.24 | 2,364.32 | 250.50 | 111.62 | 119.54 | 3,866 | 3,878.00 |
| | | 2 | 15.08 | 15.44 | 15.09 | 8.17 | 2,325.33 | | 266.10 | 119.20 | | 3,886 | |
| | | 3 | 15.02 | 15.08 | 15.13 | 8.10 | 2,362.15 | | 268.60 | 120.48 | | 3,836 | |
| | | 4 | 15.13 | 15.05 | 15.16 | 8.12 | 2,350.79 | | 298.50 | 132.66 | | 3,906 | |
| | | 5 | 15.15 | 15.05 | 15.17 | 8.35 | 2,414.08 | | 256.40 | 113.72 | | 3,896 | |
| | 7 | 1 | 15.10 | 15.15 | 15.14 | 8.04 | 2,319.91 | 2,325.34 | 325.00 | 144.91 | 143.21 | 4,261 | 4,239.80 |
| | | 2 | 15.15 | 15.11 | 15.16 | 8.04 | 2,315.31 | | 330.20 | 146.55 | | 4,155 | |
| | | 3 | 15.11 | 15.06 | 15.08 | 8.04 | 2,341.51 | | 337.30 | 150.90 | | 4,261 | |
| | | 4 | 15.23 | 15.17 | 15.06 | 8.10 | 2,327.95 | | 282.20 | 125.42 | | 4,261 | |
| | | 5 | 15.09 | 15.04 | 15.19 | 8.01 | 2,322.02 | | 333.40 | 148.27 | | 4,261 | |
| | 14 | 1 | 15.06 | 15.09 | 15.14 | 7.98 | 2,319.33 | 2,317.62 | 399.50 | 178.61 | 176.28 | 4,399 | 4,334.80 |
| | | 2 | 15.15 | 15.14 | 15.05 | 7.98 | 2,311.68 | | 413.70 | 184.96 | | 4,335 | |
| | | 3 | 15.18 | 15.13 | 15.15 | 8.01 | 2,300.58 | | 393.90 | 174.60 | | 4,274 | |
| | | 4 | 15.20 | 15.14 | 15.29 | 8.15 | 2,314.80 | | 394.60 | 173.08 | | 4,267 | |
| | | 5 | 15.04 | 15.05 | 15.14 | 8.03 | 2,341.72 | | 380.10 | 170.16 | | 4,399 | |
| | 28 | 1 | 15.00 | 15.00 | 15.00 | 8.16 | 2,416.30 | 2,405.97 | 429.10 | 194.40 | 188.83 | 4,386 | 4,354.50 |
| | | 2 | 15.24 | 15.10 | 15.00 | 8.16 | 2,363.94 | | 406.40 | 181.22 | | 4,323 | |
| | | 3 | 14.93 | 15.00 | 15.00 | 8.16 | 2,427.63 | | 424.90 | 193.40 | | 4,386 | |
| | | 4 | 14.90 | 15.00 | 15.00 | 8.05 | 2,401.19 | | 411.70 | 187.77 | | 4,323 | |
| | | 5 | 15.00 | 15.07 | 14.93 | 8.17 | 2,420.79 | | 411.60 | 187.35 | | | |

ตารางที่ ข.3 กำลังอัดและอัตราความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิค พัลส์ ของคอนกรีต เมื่อใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมหินปูนย่อย AC

| Mix No. 3 | **AR100** | Slump 135 (mm) |
|---|---|---|

| Mix | Age | Sample | Width | Height | Length | Weight | Density | | Load | Comp.Strength | | UPV | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (days) | No. | (cm.) | (cm.) | (cm.) | (kg.) | (kg/m$^3$) | | (kN) | (ksc.) | | (m/s) | |
| **AR100** | 1 | 1 | 15.18 | 15.00 | 15.12 | 7.88 | 2,288.82 | 2,243.57 | 127.50 | 56.63 | 57.23 | | |
| | | 2 | 15.17 | 15.44 | 15.09 | 7.76 | 2,194.12 | | 134.60 | 59.94 | | | |
| | | 3 | 15.29 | 15.08 | 15.13 | 7.75 | 2,221.54 | | 125.60 | 55.34 | | | |
| | | 4 | 15.17 | 15.05 | 15.16 | 7.75 | 2,239.14 | | 123.80 | 54.87 | | | |
| | | 5 | 15.08 | 15.05 | 15.17 | 7.83 | 2,274.25 | | 133.20 | 59.35 | | | |
| | 3 | 1 | 15.02 | 15.09 | 15.05 | 7.74 | 2,269.06 | 2,259.26 | 235.90 | 106.38 | 103.74 | 4,043 | 4,037.20 |
| | | 2 | 15.04 | 15.04 | 15.09 | 7.71 | 2,257.29 | | 217.70 | 97.78 | | 4,089 | |
| | | 3 | 15.09 | 15.08 | 15.05 | 7.71 | 2,249.81 | | 230.30 | 103.37 | | 4,000 | |
| | | 4 | 15.00 | 15.11 | 15.21 | 7.82 | 2,268.41 | | 237.90 | 106.29 | | 4,000 | |
| | | 5 | 15.09 | 15.16 | 15.21 | 7.84 | 2,251.76 | | 236.10 | 104.86 | | 4,054 | |
| | 7 | 1 | 14.96 | 15.25 | 15.06 | 7.69 | 2,238.21 | 2,244.78 | 289.90 | 131.17 | 134.40 | 4,043 | 4,054.00 |
| | | 2 | 15.07 | 15.17 | 15.15 | 7.78 | 2,246.30 | | 301.00 | 134.39 | | 4,043 | |
| | | 3 | 15.01 | 15.16 | 15.09 | 7.72 | 2,246.81 | | 296.90 | 133.62 | | 4,110 | |
| | | 4 | 15.03 | 15.02 | 15.09 | 7.66 | 2,247.12 | | 300.80 | 135.19 | | 4,098 | |
| | | 5 | 15.05 | 15.11 | 15.05 | 7.69 | 2,245.47 | | 305.80 | 137.62 | | 4,032 | |
| | 14 | 1 | 15.02 | 15.05 | 15.20 | 7.66 | 2,229.35 | 2,244.77 | 351.30 | 156.85 | 150.51 | 4,110 | 4,121.20 |
| | | 2 | 15.16 | 15.09 | 15.06 | 7.75 | 2,249.51 | | 366.20 | 163.50 | | 4,121 | |
| | | 3 | 15.10 | 15.15 | 15.02 | 7.67 | 2,230.76 | | 356.20 | 160.10 | | 4,110 | |
| | | 4 | 15.03 | 15.13 | 15.08 | 7.72 | 2,251.22 | | 346.20 | 155.70 | | 4,110 | |
| | | 5 | 15.08 | 15.12 | 15.01 | 7.75 | 2,263.02 | | 258.50 | 116.42 | | 4,155 | |
| | 28 | 1 | 15.02 | 15.00 | 15.20 | 7.65 | 2,233.86 | 2,294.91 | 390.40 | 174.31 | 177.06 | 4,110 | 4,224.20 |
| | | 2 | 14.93 | 14.90 | 15.00 | 7.71 | 2,310.56 | | 375.10 | 170.74 | | 4,221 | |
| | | 3 | 14.97 | 15.23 | 15.00 | 7.98 | 2,331.94 | | 394.70 | 179.18 | | 4,254 | |
| | | 4 | 15.00 | 15.07 | 15.00 | 7.79 | 2,295.95 | | 410.60 | 186.02 | | 4,213 | |
| | | 5 | 15.00 | 15.00 | 15.00 | 7.77 | 2,302.22 | | 386.40 | 175.06 | | 4,323 | |

ตารางที่ ข.4 กำลังอัดและอัตราความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิค พัลส์ ของคอนกรีต เมื่อใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมหินปูนย่อย SSC

| Mix No. 4 | **SSC** | Slump 60 (mm.) |
|---|---|---|

| Mix | Age (days) | Sample No. | Width (cm.) | Height (cm.) | Length (cm.) | Weight (kg.) | Density ($kg/m^3$) | | Load (kN) | Comp.Strength (ksc.) | | UPV (m/s) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SSC | 1 | 1 | 15.12 | 15.11 | 15.08 | 8.07 | 2,342.37 | 2,331.41 | 151.20 | 67.60 | 64.46 | | |
| | | 2 | 15.26 | 15.30 | 15.24 | 8.14 | 2,286.27 | | 142.70 | 62.55 | | | |
| | | 3 | 15.11 | 15.13 | 15.05 | 8.31 | 2,413.79 | | 145.90 | 65.40 | | | |
| | | 4 | 15.17 | 15.30 | 15.10 | 8.06 | 2,299.75 | | 144.40 | 64.26 | | | |
| | | 5 | 15.20 | 15.18 | 15.24 | 8.14 | 2,314.86 | | 142.00 | 62.49 | | | |
| | 3 | 1 | 15.25 | 15.10 | 15.20 | 8.04 | 2,295.60 | 2,337.87 | 278.50 | 122.47 | 124.03 | 4,261 | 4,178.60 |
| | | 2 | 15.16 | 15.14 | 15.12 | 8.06 | 2,321.07 | | 279.50 | 124.30 | | 4,121 | |
| | | 3 | 15.14 | 15.05 | 15.15 | 8.35 | 2,418.86 | | 282.50 | 125.55 | | 3,989 | |
| | | 4 | 15.11 | 15.11 | 15.28 | 8.10 | 2,321.84 | | 279.50 | 123.40 | | 4,261 | |
| | | 5 | 15.07 | 15.09 | 15.18 | 8.05 | 2,331.96 | | 279.20 | 124.41 | | 4,261 | |
| | 7 | 1 | 15.25 | 15.10 | 15.20 | 8.17 | 2,334.17 | 2,326.01 | 386.30 | 169.88 | 165.10 | 4,386 | 4,353.00 |
| | | 2 | 15.16 | 15.14 | 15.20 | 8.10 | 2,320.32 | | 373.30 | 165.14 | | 4,323 | |
| | | 3 | 15.14 | 15.05 | 15.15 | 8.02 | 2,321.82 | | 363.90 | 161.72 | | 4,360 | |
| | | 4 | 15.11 | 15.11 | 15.28 | 8.12 | 2,327.58 | | 373.60 | 164.95 | | 4,373 | |
| | | 5 | 15.07 | 15.09 | 15.18 | 8.03 | 2,326.17 | | 367.60 | 163.80 | | 4,323 | |
| | 14 | 1 | 15.25 | 15.10 | 15.20 | 8.11 | 2,316.45 | 2,332.73 | 415.10 | 182.55 | 189.52 | 4,464 | 4,412.00 |
| | | 2 | 15.16 | 15.14 | 15.12 | 8.04 | 2,316.75 | | 426.20 | 189.54 | | 4,386 | |
| | | 3 | 15.14 | 15.05 | 15.15 | 8.12 | 2,350.79 | | 440.80 | 195.90 | | 4,438 | |
| | | 4 | 15.11 | 15.11 | 15.28 | 8.17 | 2,341.91 | | 426.10 | 188.13 | | 4,386 | |
| | | 5 | 15.07 | 15.09 | 15.18 | 8.07 | 2,337.76 | | 429.70 | 191.47 | | 4,386 | |
| | 28 | 1 | 15.30 | 15.04 | 15.19 | 8.21 | 2,348.80 | 2,343.57 | 445.10 | 195.23 | 204.78 | 4,399 | 4,435.40 |
| | | 2 | 15.00 | 15.11 | 15.15 | 8.02 | 2,334.18 | | 461.20 | 206.88 | | 4,399 | |
| | | 3 | 15.06 | 15.17 | 15.09 | 8.08 | 2,343.75 | | 462.10 | 207.28 | | 4,464 | |
| | | 4 | 15.04 | 15.14 | 15.21 | 8.12 | 2,344.52 | | 462.10 | 205.92 | | 4,464 | |
| | | 5 | 15.17 | 15.19 | 15.10 | 8.17 | 2,346.58 | | 468.70 | 208.58 | | 4,451 | |

ตารางที่ ข.5 กำลังอัดและอัตราความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิค พัลส์ ของคอนกรีต เมื่อใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมหินปูนย่อย SSR25

| Mix No. 5 | **SSR25** | Slump 80 (mm.) |
|---|---|---|

| Mix | Age (days) | Sample No. | Width (cm.) | Height (cm.) | Length (cm.) | Weight (kg.) | Density ($kg/m^3$) | | Load (kN) | Comp.Strength (ksc.) | | UPV (m/s) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **SSR25** | 1 | 1 | 15.14 | 15.08 | 15.17 | 8.16 | 2,356.01 | 2,418.46 | 200.20 | 88.86 | 87.10 | | |
| | | 2 | 15.13 | 15.09 | 15.09 | 8.12 | 2,356.89 | | 203.70 | 90.95 | | | |
| | | 3 | 15.13 | 15.11 | 15.07 | 8.55 | 2,481.70 | | 203.70 | 91.07 | | | |
| | | 4 | 15.16 | 15.15 | 15.17 | 8.20 | 2,353.51 | | 185.20 | 82.09 | | | |
| | | 5 | 15.13 | 15.04 | 15.20 | 8.80 | 2,544.21 | | 186.20 | 82.53 | | | |
| | 3 | 1 | 15.09 | 15.07 | 15.11 | 8.05 | 2,342.77 | 2,161.18 | 336.30 | 150.35 | 142.27 | 4,167 | 4,144.00 |
| | | 2 | 15.13 | 15.08 | 15.04 | 8.01 | 2,334.23 | | 330.70 | 148.14 | | 4,155 | |
| | | 3 | 15.09 | 15.13 | 15.28 | 5.05 | 1,447.57 | | 330.70 | 146.20 | | 4,190 | |
| | | 4 | 15.14 | 15.10 | 15.08 | 8.10 | 2,349.53 | | 299.40 | 133.68 | | 4,110 | |
| | | 5 | 15.06 | 15.10 | 15.20 | 8.06 | 2,331.79 | | 298.60 | 132.97 | | 4,098 | |
| | 7 | 1 | 15.02 | 15.09 | 15.03 | 8.07 | 2,368.95 | 2,355.04 | 421.70 | 190.42 | 195.36 | 4,451 | 4,499.60 |
| | | 2 | 14.99 | 15.08 | 15.01 | 8.02 | 2,363.69 | | 442.80 | 200.61 | | 4,438 | |
| | | 3 | 15.05 | 15.10 | 15.07 | 8.08 | 2,357.85 | | 443.40 | 199.29 | | 4,518 | |
| | | 4 | 15.05 | 15.13 | 15.28 | 8.06 | 2,315.08 | | 445.50 | 197.48 | | 4,518 | |
| | | 5 | 15.10 | 15.08 | 15.03 | 8.11 | 2,369.65 | | 420.80 | 189.00 | | 4,573 | |
| | 14 | 1 | 15.09 | 15.07 | 15.11 | 8.16 | 2,373.32 | 2,348.50 | 487.60 | 217.99 | 215.05 | 4,451 | 4,522.25 |
| | | 2 | 15.13 | 15.08 | 15.04 | 8.07 | 2,350.26 | | 428.30 | 191.86 | | 4,601 | |
| | | 3 | 15.09 | 15.13 | 15.28 | 8.12 | 2,326.15 | | 500.70 | 221.36 | | 4,505 | |
| | | 4 | 15.14 | 15.10 | 15.28 | 8.12 | 2,323.36 | | 502.00 | 221.20 | | | |
| | | 5 | 15.05 | 15.10 | 15.08 | 8.12 | 2,369.42 | | 496.10 | 222.82 | | 4,532 | |
| | 28 | 1 | 15.05 | 15.12 | 15.14 | 8.21 | 2,381.58 | 2,373.23 | 544.60 | 243.64 | 246.44 | 4,573 | 4,633.20 |
| | | 2 | 15.05 | 15.12 | 15.07 | 8.15 | 2,376.60 | | 564.90 | 253.89 | | 4,673 | |
| | | 3 | 15.02 | 15.14 | 15.07 | 8.12 | 2,369.45 | | 557.70 | 251.16 | | 4,587 | |
| | | 4 | 15.07 | 15.12 | 15.06 | 8.10 | 2,358.99 | | 519.60 | 233.38 | | 4,601 | |
| | | 5 | 15.07 | 15.11 | 15.06 | 8.16 | 2,379.51 | | 556.90 | 250.13 | | 4,732 | |

ตารางที่ ข.6 กำลังอัดและอัตราความเร็วคลื่นอัลตร้าโซนิค พัลส์ ของคอนกรีต เมื่อใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมหินปูนย่อย SSR100

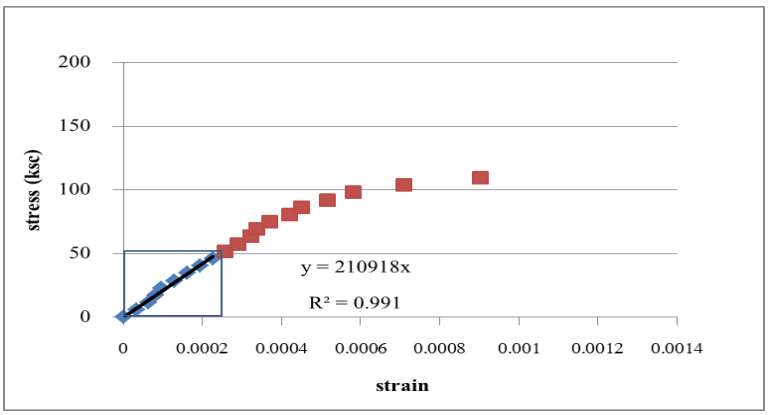
| Mix No. 6 | **SSR100** | Slump 80 (mm.) |
|---|---|---|

| Mix | Age | Sample | Width | Height | Length | Weight | Density | | Load | Comp.Strength | | UPV | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (days) | No. | (cm.) | (cm.) | (cm.) | (kg.) | (kg/m$^3$) | | (kN) | (ksc.) | | (m/s) | |
| **SSR 100** | 1 | 1 | 15.10 | 15.06 | 15.10 | 7.88 | 2,294.81 | 2,245.41 | 127.50 | 57.00 | 57.24 | | |
| | | 2 | 15.24 | 15.13 | 15.11 | 7.76 | 2,225.84 | | 134.60 | 59.58 | | | |
| | | 3 | 15.09 | 15.11 | 15.19 | 7.75 | 2,237.64 | | 125.60 | 55.86 | | | |
| | | 4 | 15.09 | 15.17 | 15.16 | 7.75 | 2,233.20 | | 123.80 | 55.16 | | | |
| | | 5 | 15.18 | 15.11 | 15.27 | 7.83 | 2,235.56 | | 133.20 | 58.58 | | | |
| | 3 | 1 | 15.10 | 15.11 | 15.08 | 7.82 | 2,271.36 | 2,264.95 | 343.40 | 153.73 | 149.50 | 4,144 | 4,090.20 |
| | | 2 | 15.06 | 15.06 | 15.08 | 7.84 | 2,292.26 | | 330.30 | 148.26 | | 4,155 | |
| | | 3 | 15.21 | 15.13 | 15.26 | 7.92 | 2,253.87 | | 328.40 | 144.23 | | 4,098 | |
| | | 4 | 15.19 | 15.11 | 15.26 | 7.83 | 2,234.13 | | 346.50 | 152.38 | | 4,054 | |
| | | 5 | 15.11 | 15.04 | 15.08 | 7.79 | 2,273.13 | | 332.90 | 148.93 | | 4,000 | |
| | 7 | 1 | 15.09 | 15.07 | 15.11 | 7.83 | 2,277.29 | 2,270.17 | 420.30 | 187.90 | 184.29 | 4,202 | 4,204.80 |
| | | 2 | 15.13 | 15.08 | 15.04 | 7.79 | 2,270.12 | | 427.20 | 191.37 | | 4,274 | |
| | | 3 | 15.09 | 15.13 | 15.28 | 7.90 | 2,263.08 | | 391.20 | 172.95 | | 4,202 | |
| | | 4 | 15.14 | 15.10 | 15.28 | 7.91 | 2,264.39 | | 422.20 | 186.04 | | 4,144 | |
| | | 5 | 15.06 | 15.10 | 15.08 | 7.81 | 2,275.99 | | 408.10 | 183.18 | | 4,202 | |
| | 14 | 1 | 15.09 | 15.07 | 15.11 | 7.88 | 2,291.84 | 2,280.10 | 477.00 | 213.25 | 214.40 | 4,021 | 4,252.40 |
| | | 2 | 15.13 | 15.08 | 15.04 | 7.92 | 2,308.01 | | 465.00 | 208.30 | | 4,202 | |
| | | 3 | 15.09 | 15.13 | 15.28 | 7.87 | 2,254.48 | | 465.10 | 205.62 | | 4,323 | |
| | | 4 | 15.14 | 15.10 | 15.28 | 7.92 | 2,265.82 | | 493.00 | 217.23 | | 4,561 | |
| | | 5 | 15.06 | 15.10 | 15.08 | 7.82 | 2,280.36 | | 507.10 | 227.61 | | 4,155 | |
| | 28 | 1 | 15.21 | 15.15 | 15.14 | 7.91 | 2,267.30 | 2,271.70 | 524.10 | 232.00 | 234.68 | 4,132 | 4,235.60 |
| | | 2 | 15.10 | 15.13 | 15.09 | 7.85 | 2,277.01 | | 524.70 | 234.73 | | 4,286 | |
| | | 3 | 15.03 | 15.08 | 14.97 | 7.69 | 2,264.97 | | 518.30 | 234.82 | | 4,213 | |
| | | 4 | 15.03 | 15.02 | 15.02 | 7.71 | 2,272.34 | | 534.50 | 241.35 | | 4,286 | |
| | | 5 | 15.09 | 15.16 | 15.09 | 7.86 | 2,276.90 | | 514.90 | 230.50 | | 4,261 | |

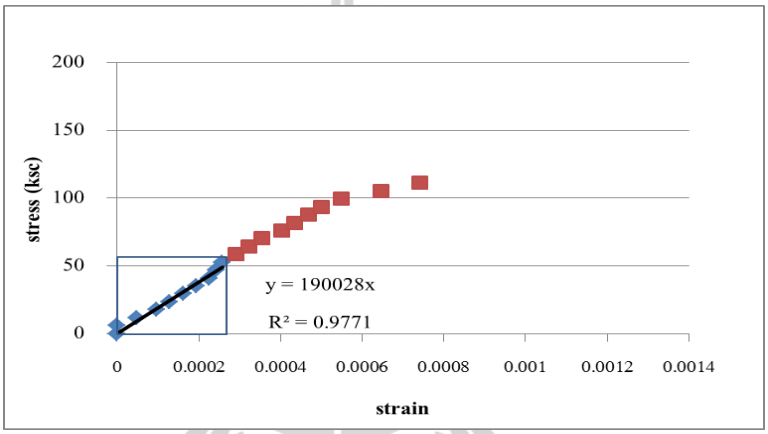
# ภาคผนวก ค

# รูปแสดงผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

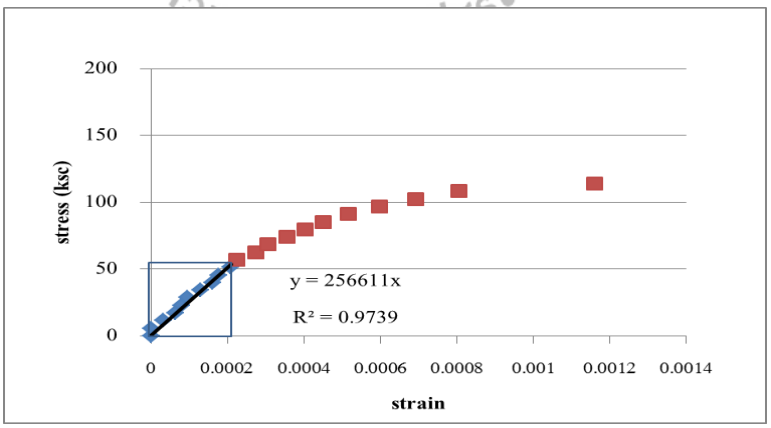
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี




$E_c$ = 210918 ksc

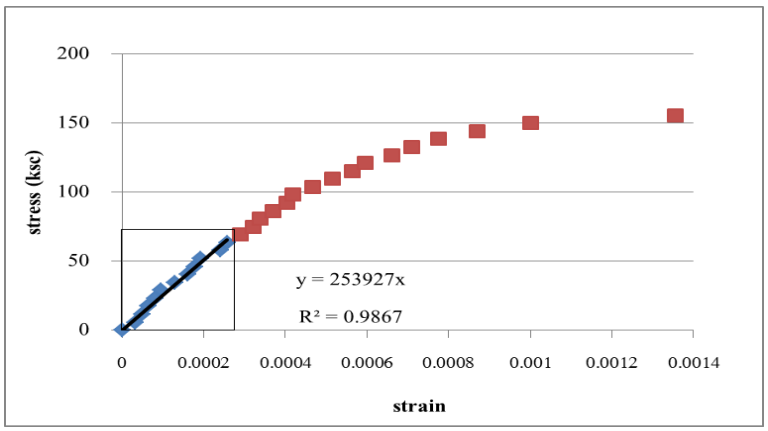



$E_c$ = 190028 ksc

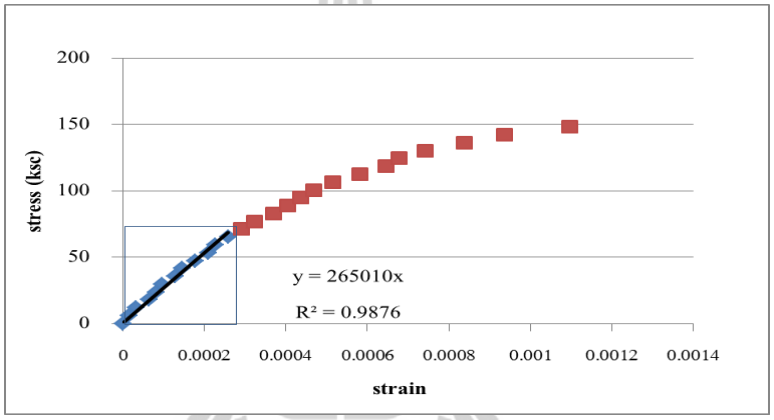



$E_c$ = 256611 ksc

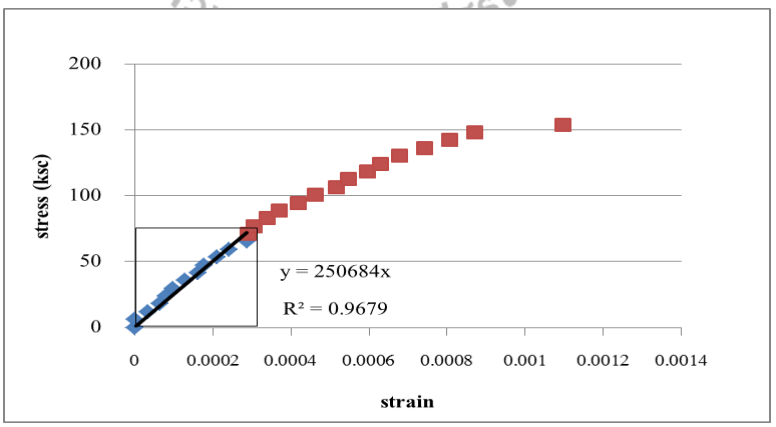
รูปที่ ข.1 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อใช้มวลรวมหินปูนย่อยในสภาวะแห้งในอากาศ AC




$E_c$ = 253927 ksc

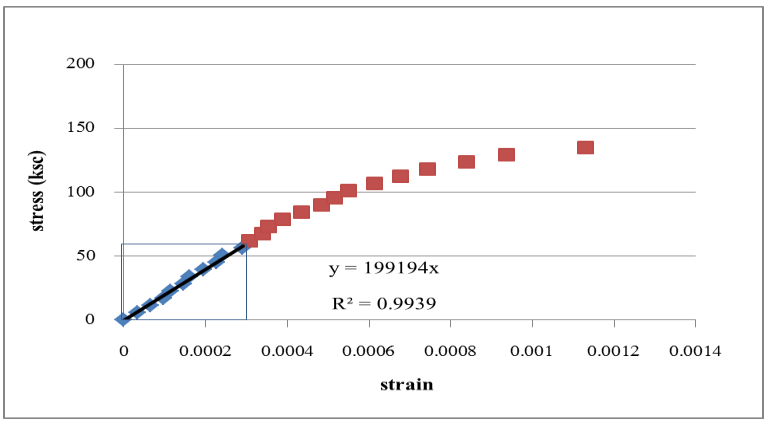



$E_c$ = 265010 ksc

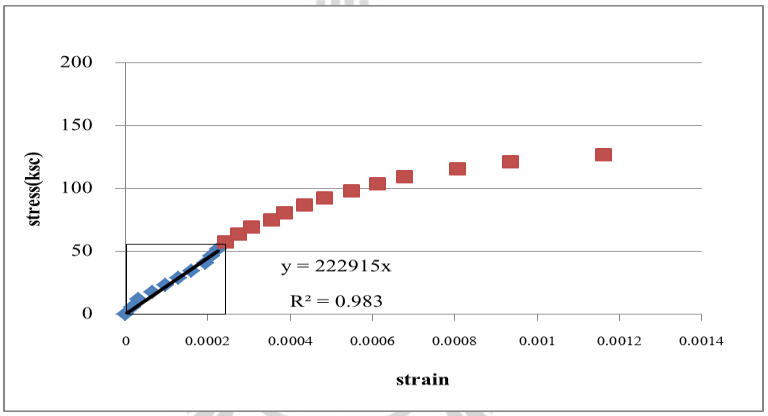



$E_c$ = 250684 ksc

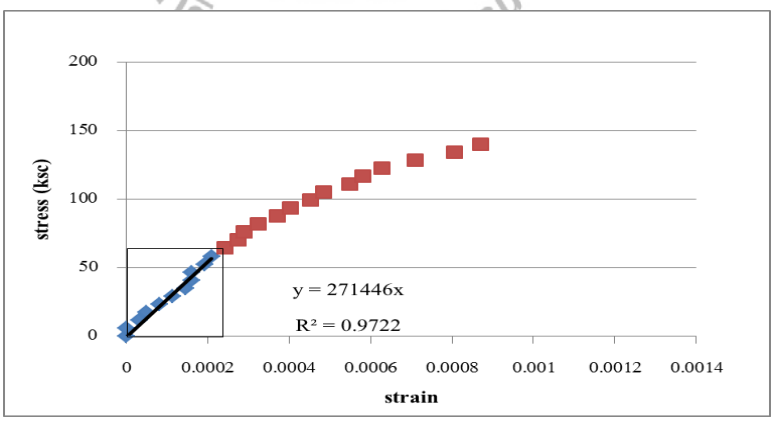
รูปที่ ข.2 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมหินปูนย่อย ในสภาวะแห้งในอากาศ AR25




$E_c$ = 199194 ksc

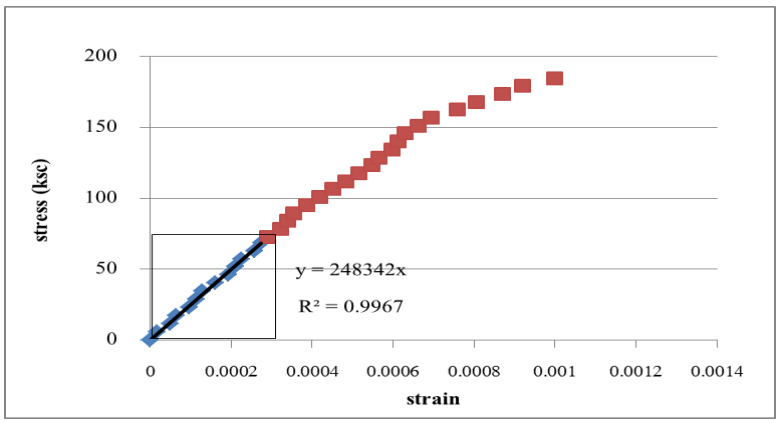



$E_c$ = 222915 ksc

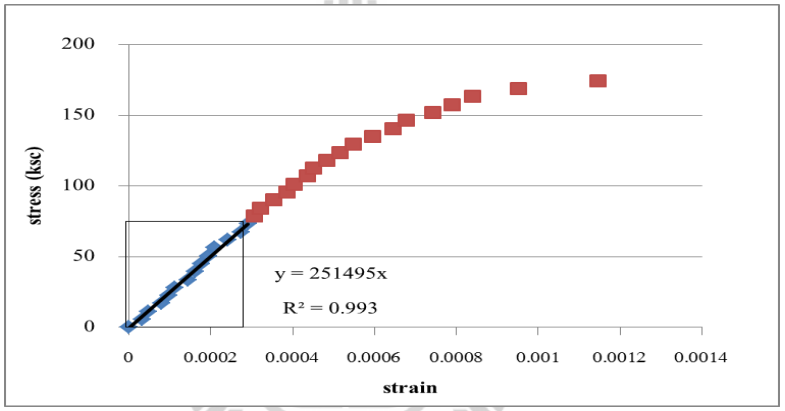



$E_c$ = 271446 ksc

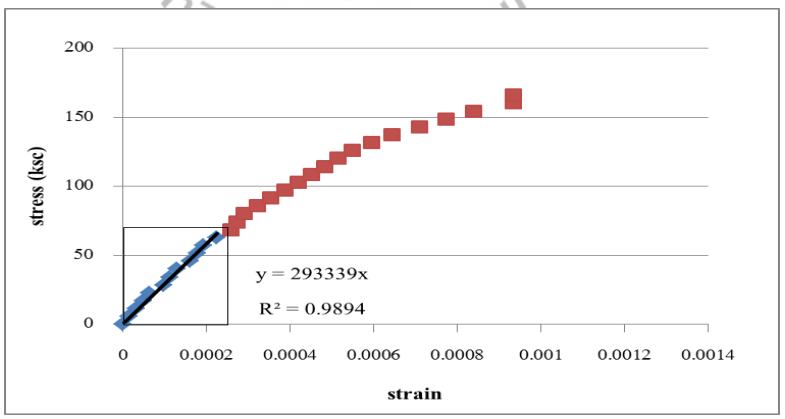
รูปที่ ข.3 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต แทนที่มวลรวมหินปูนย่อย ในสภาวะแห้งในอากาศ AR100




$E_c$ = 248342 ksc

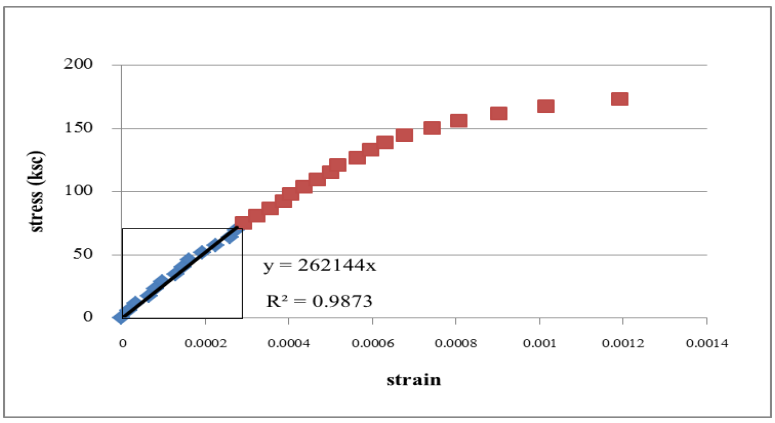



$E_c$ = 251495 ksc

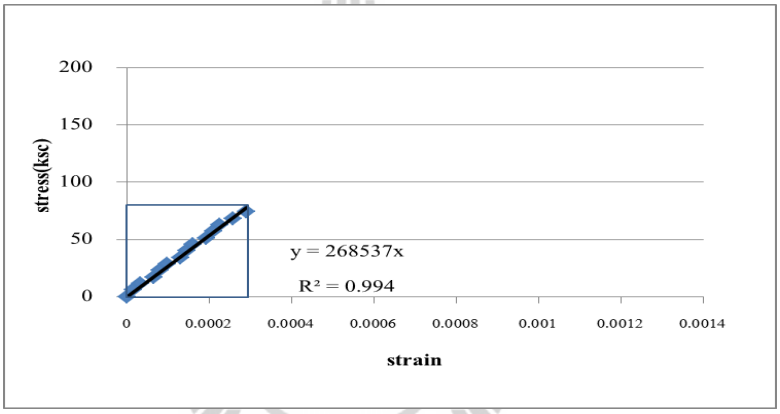



$E_c$ = 293339 ksc

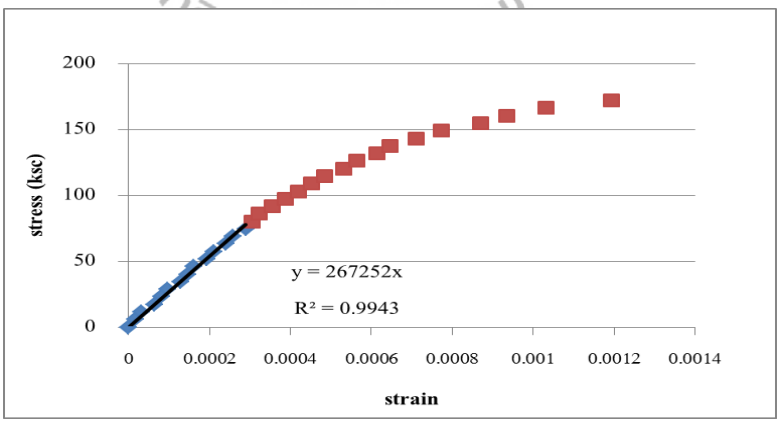
รูปที่ ข.4 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อใช้มวลรวมหินปูนย่อยในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง SSC




$E_c$ = 262144 ksc

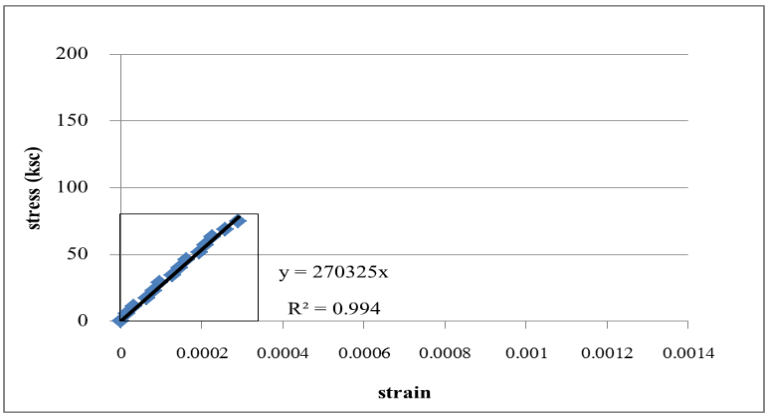



$E_c$ = 268537 ksc

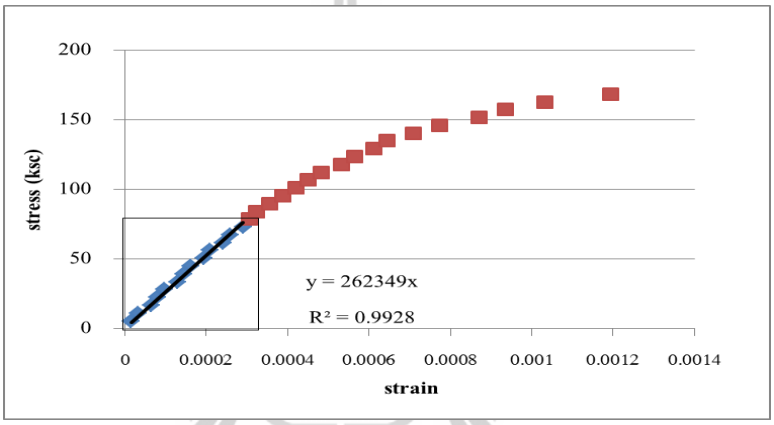



$E_c$ = 267252 ksc

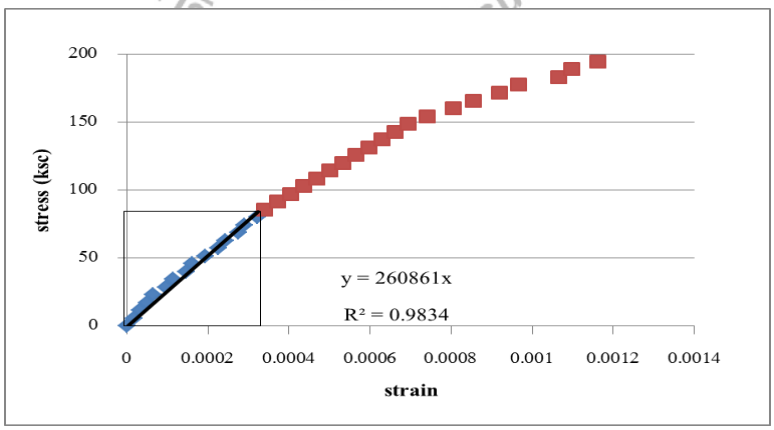
รูปที่ ข.5 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมหินปูนย่อย ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง SSR25




$E_c$ = 270325 ksc




$E_c$ = 262349 ksc




$E_c$ = 260861 ksc

รูปที่ ข.6 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมหินปูนย่อย ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง SSR100

# ประวัติผู้เขียน

นายอภิรักษ์ มาตรนอก เกิดเมื่อวันที่ 30 มกราคม 2519 เรียนจบชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนเกรียติคุณวิทยา เรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 ถึงมัธยมศึกษาปีที่ 3 ที่โรงเรียนอัสสัมชัญนครราชสีมา ระดับประกาศณียบัตรวิชาชีพและประกาศณียบัตรวิชาชีพชั้นสูงที่ วิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา ต่อมา ได้สอบคัดเลือกเข้าเรียนต่อระดับปริญาตรีที่มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา เมื่อ ปี พศ. 2546 และได้เข้าทำงานกับบริษัทรับเหมาก่อสร้างในกรุงเทพฯ ในตำแหน่งผู้ควบคุมงาน และในปัจจุบัน ได้ทำงานในสาขาวิศวกรรมโยธาคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน พ.ศ. 2554 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ระหว่างการศึกษาได้ทำงานวิจัยในเรื่อง การศึกษาผลกระทบของสถานะความชื้นและการดูดซึมน้ำของมวลรวมธรรมชาติและมวลรวมรีไซเคิล ต่อค่าการยุบตัวและกำลังอัดของคอนกรีต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี