

การศึกษากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตและ
เศษอิฐมวลเบาเป็นวัสดุผสมรวม

นายชุตีพงศ์ เอื้อจิตาภรณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**A STUDY OF ULTIMATE COMPRESSIVE STRENGTH
OF CONCRETE USING CONCRETE AND
LIGHTWEIGHT BRICK WASTES
AS AGGREGATES**

Chutipong Euathitaporn

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2012**

การศึกษากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตและ
เศษอิฐมวลเบาเป็นวัสดุมวลรวม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)
ประธานกรรมการ

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.รัฐพล สมณา)
กรรมการ

(รศ. ดร.วชรภูมิ เบญจโอพาร)
กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

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

ชุดิพงส์ เอื้อธิดาภรณ์ : การศึกษากำลั้งอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตและ
เศษอิฐมวลเบาเป็นวัสดุมวลรวม (A STUDY OF ULTIMATE COMPRESSIVE
STRENGTH OF CONCRETE USING CONCRETE AND LIGHTWEIGHT BRICK
WASTES AS AGGREGATES) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข,
85 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลั้งอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเป็นมวล
รวมหยาบ และใช้เศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียด ส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คืออัตราส่วน
ระหว่าง ปูนซีเมนต์ : มวลรวมละเอียด : มวลรวมหยาบ เท่ากับ 1 : 2 : 4 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วน
น้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.50 และ 0.60 การทดสอบกำลั้งอัดของคอนกรีตกระทำที่อายุ 7, 14
และ 28 วัน เมื่อผลทดสอบกำลั้งอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลนำมาเปรียบเทียบกับ
คอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ พบว่ากำลั้งอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมี
ค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ กำลั้งอัดของคอนกรีตแปรผกผันกับค่าการสูญเสีย
น้ำหนักของมวลรวมหยาบจากการขัดสีด้วยวิธีลอสแอนเจลีส การใช้เศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวม
ละเอียดในคอนกรีตส่งผลให้กำลั้งอัดของคอนกรีตลดลงอย่างมาก ดังนั้น การเลือกใช้เศษอิฐมวล
เบาที่จะใช้แทนที่ทรายต้องคำนึงถึงปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ได้กำลั้งอัดตามที่ต้องการ

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

CHUTIPONG EUATHITAPORN : A STUDY OF ULTIMATE
COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE USING CONCRETE AND
LIGHTWEIGHT BRICK WASTES AS AGGREGATES. THESIS ADVISOR
: PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., 85 PP.

WASTE CONCRETE/WAST LIGHTWEIGHT BRICK/RECYCLED

This research aims to study the ultimate compressive strength of concrete using wastes of concretes and light weight brick as aggregates. The mix proportions of concretes were prepared with cement : fine aggregate : coarse aggregate ratio of 1 : 2 : 4 by weight and water to cement ratios of 0.40, 0.50, and 0.60. Compressive strengths of concretes were determined at the ages of 7, 14, and 28 days. The testing results of the concretes with recycled aggregates were compared with those of concretes with natural aggregates. The results revealed that compressive strength of concrete with recycled concrete was lower than that of concrete with natural aggregates. The compressive strength was inversely proportional to the Los Angeles abrasion loss of coarse aggregate. Use of lightweight brick in concrete in concrete caused the reduction of compressive strength of concrete. Therefore, the lightweight brick content must be properly designed in order to attain the required concrete strength.

School of Civil Engineering

Academic Year 2012

Student's signature _____

Advisor's signature _____

Co-Advisor's signature _____

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข และดร.รัฐพล สมณา อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าให้คำปรึกษา ให้คำสอน ข้อชี้แนะ ข้อแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ในทุกขั้นตอนในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ตลอดมา ขอขอบคุณกรรมการสอบทุกท่าน ซึ่งได้แก่อาจารย์ ที่สละเวลาอันมีค่ามาสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่ซึ่งเป็นประโยชน์ ขอขอบคุณ กรมโยธาธิการและผังเมืองที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการวิจัย เครื่องมือ รวมถึงอุปกรณ์ในการวิจัย และขอขอบคุณน้องๆฝึกงานซึ่งได้เป็นผู้ช่วยในการวิจัย ช่วยเหลือในการวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาของผู้วิจัยซึ่งได้ให้กำเนิด ให้การอุปการะเลี้ยงดูผู้ศึกษา โดยให้คำสั่งสอน แนวคิดและการปฏิบัติตัวทำให้ผู้วิจัยมีวันนี้ รวมถึงหลายๆ คำลงใจจากญาติพี่น้อง เพื่อน ๆ ทุกท่านที่เป็นกำลังใจอย่างยิ่ง ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นสถาบันการศึกษาที่เปิดหลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ทำให้ผู้วิจัยได้เข้ามาเข้ามศึกษาจนสำเร็จในวันนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้ทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามและหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเสริมสร้างความรู้ และความเข้าใจ ตลอดจนส่งเสริมการริใช้เคล็ดลับคอนกรีตแทนมวลรวมจากธรรมชาติ ซึ่งจะช่วยลดปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากปริมาณคอนกรีตที่เหลือใช้จำนวนมากที่ไม่ก่อเกิดประโยชน์มาเป็นสิ่งที่มีประโยชน์และสร้างคุณค่าในงานคอนกรีตต่อไป

ชุตติพงศ์ เอื้อจิตาภรณ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 คอนกรีต	4
2.2 คอนกรีตที่ใช้เป็นโครงสร้าง	5
2.2.1 คอนกรีตล้วน (Plain Concrete)	5
2.2.2 คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete)	5
2.2.3 คอนกรีตอัดแรง (Pre-stressed Concrete)	5
2.3 กำลังอัดของคอนกรีต	5
2.3.1 ธรรมชาติของกำลังอัดของคอนกรีต	5
ก. กำลังมอร์ต้า	5
ข. กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม	5
ค. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต้ากับมวลรวม	6
2.4 ประเภทของมวลรวม	6

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.1 ประเภทของมวลรวม	7
ก. มวลรวมที่เกิดจากธรรมชาติ (Natural Mineral Aggregate)	7
ข. มวลรวมที่มนุษย์ทำขึ้น (Artificial Aggregate)	7
2.4.2 การเก็บรักษามวลรวม	7
2.5 น้ำ	8
2.6 การบ่มคอนกรีต	9
2.6.1 กรรมวิธีการบ่ม	10
2.6.2 การบ่มที่อุณหภูมิปกติ	10
ก. การเพิ่มความชื้น	10
ข. การป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต	11
2.6.3 ระยะเวลาการบ่ม	16
2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.7.1 อัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีต	17
2.7.2 หน่วยน้ำหนักและช่องว่างของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล	18
2.7.3 ขนาดผลของมวลรวมที่ใช้ในการผสมคอนกรีต	19
2.7.4 ความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมที่ได้จากการย่อยคอนกรีตเก่า	19
2.7.5 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจาก การย่อยคอนกรีตเก่า	20
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	21
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	21
3.2 ตัวแปรและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา	21
3.3 การหาคุณสมบัติของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและ เศษอิฐมวลเบา	22
3.3.1 วิเคราะห์การกระจายขนาดและค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวม ด้วยตะแกรง	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2 ทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีต	22
3.3.3 ทดสอบความถ่วงจำเพาะ	23
3.3.4 ทดสอบค่าการสึกหรอด้วยเครื่องลอสมองเจลิส	23
3.3.5 ทดสอบหน่วยน้ำหนักของมวลรวม และปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวม	23
3.4 ส่วนผสมคอนกรีต	23
3.5 การกำหนดค่าความยุบตัว (Slump Test) ของคอนกรีต	24
3.6 การผสม การเก็บตัวอย่าง และการบ่ม คอนกรีต	25
3.6.1 การผสมคอนกรีต	25
3.6.2 การเก็บตัวอย่าง	25
3.7 อัตราส่วนของคอนกรีต	26
3.8 การทดสอบกำลังอัดประลัย	27
3.9 การหาค่ากำลังรับแรงกด (Compressive Strength)	28
3.10 การความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสึกหรอของเศษคอนกรีตกับค่ากำลังอัดของ คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล	28
4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	29
4.1 คุณสมบัติของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและอิฐมวลเบา	29
4.1.1 ลักษณะรูปร่างและการกระจายขนาดของมวลรวม	30
4.1.2 ความถ่วงจำเพาะและอัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวม	32
4.1.3 หน่วยน้ำหนักของมวลรวมและช่องว่างระหว่างมวลรวม	33
4.1.4 ความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบ	33
4.2 กำลังอัดของคอนกรีต	34
4.2.1 กำลังต้านทานแรงอัดและร้อยละกำลังต้านทานแรงอัดอัด ของคอนกรีตปกติ	34
4.2.2 กำลังต้านทานแรงอัดและร้อยละกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต ที่ใช้ทรายธรรมชาติร่วมกับมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต	35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษอิฐมวลเบา เป็นมวลรวมละเอียดและใช้หินปูนย่อยและเศษคอนกรีตเป็น มวลรวมหยาบ	37
4.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหรือของมวลรวมหยาบกับค่ากำลังอัด ของคอนกรีตโดยใช้มวลรวมละเอียดธรรมชาติ	40
4.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการวิจัย	41
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	44
5.1 สรุปผลการทดลอง	44
5.1.1 ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อย เศษอิฐมวลเบา	44
5.1.2 ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต	44
5.1.3 กำลังต้านทานแรงอัดมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต	44
5.1.4 ความสามารถต้านทานแรงอัดการนำเศษอิฐมวลเบา มาใช้เป็นมวลรวมละเอียด	44
5.2 ข้อเสนอแนะ	45
รายการอ้างอิง	46
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ตารางและรูปแสดงคุณสมบัติจำเพาะของมวลรวมธรรมชาติ มวลรวม ละเอียดที่ได้จากการย่อยอิฐมวลเบาและมวลรวมหยาบที่ได้ จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัย	50
ภาคผนวก ข. ตารางแสดงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	65
ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา	76
ประวัติผู้เขียน	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณที่ยอมให้ของสารเจือปนในน้ำ	9
2.2 วิธีการบ่มโดยเพิ่มความชื้น	12
2.3 วิธีป้องกันการสูญเสียจากเนื้อคอนกรีต	14
2.4 เวลาขั้นต่ำในการบ่มคอนกรีต	16
2.5 อัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมจากงานวิจัยที่ผ่านมา	17
2.6 การดูดซึมน้ำเทียบกับความหนาแน่น	18
2.7 โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบที่ใช้ผสมคอนกรีต	19
2.8 ความเปลี่ยนแปลงของการสึกกร่อนด้วยเครื่องทดสอบลอสแอนเจลิส ตามกำลังอัดของคอนกรีต	20
3.1 ค่ายุบตัวที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตโครงสร้างประเภทต่างๆ	25
3.2 ตารางแสดงสัญลักษณ์ของอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่นำมาวิจัย	26
3.3 อัตราส่วนผสมคอนกรีต	26
4.1 คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ในการวิจัย	29
4.2 กำลังต้านทานแรงอัดคอนกรีตที่แต่ละอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ และใช้มวลรวมจากธรรมชาติทั้งหมด	35
4.3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ $w/c = 0.4$	36
4.4 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ $w/c = 0.5$	36
4.5 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ $w/c = 0.6$	37
4.6 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ $w/c = 0.4$	39
4.7 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ $w/c = 0.5$	39
4.8 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ $w/c = 0.6$	40

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเก็บรักษามวลรวม	8
3.1 แนวการวิจัยในการผสมตัวอย่างคอนกรีตที่จะใช้ในการทำวิจัย	24
4.1 รูปร่างและการกระจายขนาดมวลรวม	30
4.2 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียดทั้ง 2 ชนิด เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 33	31
4.3 การกระจายตัวของมวลรวมหยาบ ทั้ง 3 ชนิด เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 33	32
4.4 กำลังต้านทานแรงอัดต่อเวลาของคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด และเศษคอนกรีตเป็นมวลรวมหยาบ	37
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสึกหรอของมวลรวมหยาบ กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตโดยใช้มวลรวมละเอียดธรรมชาติ ของอายุ 14 และ 28 วัน	41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

การเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคมทำให้เกิดสิ่งก่อสร้างจำพวกอาคาร ถนน และโครงสร้างพื้นฐาน อย่างรวดเร็ว คอนกรีตเป็นวัสดุโครงสร้างที่นิยมใช้กันอย่างมากในประเทศไทยเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุก่อสร้างอื่น เช่น อิฐ ไม้ และเหล็ก เมื่อถึงเวลาที่สิ่งก่อสร้างชำรุด หรือสิ้นสุดอายุการใช้งาน หรือต้องการเปลี่ยนลักษณะการใช้งาน ก็จะมีการรื้อถอนเพื่อสร้างสิ่งก่อสร้างใหม่ทดแทน เศษวัสดุก่อสร้างจากการทำลายสิ่งก่อสร้างไม่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจและถูกขนย้ายไปกำจัด

Somna et al. (2012a) ได้แสดงให้เห็นว่าเศษคอนกรีตสามารถนำกลับมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมหยาบในงานคอนกรีตได้ แต่เมื่ออัตราส่วนที่ติดกับเนื้อมวลรวมหยาบจะทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีหน่วยน้ำหนักต่ำกว่า ความดูดซึมน้ำสูงกว่า และความพรุนสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ แม้ว่ากำลังอัดจะมีค่าต่ำกว่าก็จริง แต่การใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีประโยชน์อย่างมากในด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม นอกจากการใช้เศษคอนกรีตเป็นมวลรวมหยาบแล้ว เศษอิฐมวลเบาที่เหลือจากการทำลายผนังก็สามารถนำกลับมาใช้เป็นมวลรวมละเอียดในงานคอนกรีตได้ การนำเศษอิฐมวลเบากลับมาเป็นวัสดุมวลรวมละเอียดยังมีการศึกษาวิจัยไม่มากนัก งานวิจัยด้านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลส่วนใหญ่ทำการศึกษาโดยใช้ทรายจากธรรมชาติเป็นมวลรวมละเอียด (Somna et al., 2012a, b, c; Tangchirapat et al., 2012)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเป็นมวลรวมหยาบ และเศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียด เปรียบเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสึกหรอของเศษคอนกรีตต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเป็นมวลรวมหยาบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเศษคอนกรีต และอิฐมวลเบามาใช้เป็นมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีต

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของความลึกหรือของมวลหยาบรีไซเคิล ที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล

1.2.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหรือของเศษคอนกรีต กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีต และเศษอิฐมวลเบาทำเป็นมวลรวมหยาบและมวลละเอียด ตามลำดับ

1.2.4. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในใช้เศษคอนกรีตมาใช้เป็นมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีต โดยเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหรือของเศษคอนกรีตกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีต และเศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมหยาบและมวลละเอียดเพื่อกำหนดคอนกรีตจากมวลรวมรีไซเคิล

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตการทำงานไว้เป็นข้อ ดังนี้

1.3.1 ปูนซีเมนต์ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

1.3.2 มวลรวมหยาบรีไซเคิลได้จากเศษคอนกรีตที่เหลือจากการทดสอบ ที่ออกแบบกำลังอัดไว้ที่ 240 (Cube) และ 350 (Cylinder) กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร นำมาย่อยสลายโดยการทุบเลือกใช้มวลรวมหยาบที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 และขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว

1.3.3 มวลรวมละเอียดรีไซเคิลที่ได้จากเศษอิฐมวลเบานำมาย่อยให้มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือสามารถลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร หรือไม่ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมที่ทำทดสอบ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ โมดูลัสความละเอียด การกระจายขนาด ให้น้ำหนักของมวลรวมช่องว่างระหว่างมวลรวม และค่าการสึกกร่อนด้วยเครื่องทดสอบเจลีส (เฉพาะมวลรวมหยาบ)

1.3.4 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัย แบ่งออกเป็น 8 กลุ่ม

1. คอนกรีตที่ใช้หินปูนจากธรรมชาติและทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด (C_S)
2. คอนกรีตที่ใช้หินปูนจากธรรมชาติและเศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียดรีไซเคิล (C_RS)
3. คอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัด 240 กก/ชม² (Cube) เป็นมวลรวมหยาบและทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด (C240_S) คอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัด 240 กก/ชม² (Cube) เป็นมวลรวมหยาบและเศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียดรีไซเคิล (C240_RS)
4. คอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัด 350 กก/ชม² (Cylinder) เป็นมวลรวมหยาบและทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด (C350_S)

5. คอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัด 350 กก/ชม² (Cylinder) เป็นมวลรวมหยาบและเศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียดรีไซเคิล (C350_RS)

1.3.5 การเก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ทำตามมาตรฐานอังกฤษ BS 1881 : PART3 สักส่วนผสมโดยปริมาตร โดยใช้อัตราส่วนผสม ปูน : มวลรวมละเอียด : มวลรวมหยาบ เท่ากับ 1 : 2 : 4 ของน้ำหนัก ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4, 0.5 และ 0.6 และค่ายุบตัว (Slump) ระหว่าง 5 ถึง 10 มิลลิเมตร โดยใช้สารลดน้ำประเภท A ตามมาตรฐาน ASTM C 494 Specification for Chemical Admixtures for Concrete ช่วยในการปรับค่าการยุบตัว

1.3.6 คอนกรีตบ่มแบบแช่น้ำประปา

1.3.7 ทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน วัน ตามมาตรฐานอังกฤษ BS 1881 : PART4

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการใช้เศษคอนกรีตและเศษอิฐมวลเบาเป็นวัสดุรีไซเคิลในงานคอนกรีต

1.4.2 ได้ทราบถึงความแตกต่างด้านของกำลังของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ

1.4.3 ได้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสึกหรอของเศษคอนกรีตและเศษอิฐมวลเบา กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล

1.4.4 ลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และลดซากคอนกรีตที่ก่อให้เกิดขยะ และมลภาวะ

บทที่ 2

เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีสมบัติเปรียบเทียบกับเสมือนหิน ที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นมาใช้งาน โครงสร้าง คอนกรีตได้จากการผสมปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นตัวประสาน กับ ทราย หินหรือกรวด ซึ่งเป็น วัสดุผสมละเอียดและหยาบ ตามลำดับ กับน้ำซึ่งจะทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ น้ำทำให้ปูนซีเมนต์ แทรกตามเม็ดทรายและก้อนหิน รวมตัวเป็นก้อนคอนกรีตที่มีรูปร่างลักษณะตามแบบหล่อ แข็งตัว เมื่ออายุประมาณ 24 ชั่วโมง และทนแรงอัดได้เพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม

เนื้อคอนกรีตอาจแยกออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือ วัสดุผสม (Aggregates) และซีเมนต์เพสต์ (Paste) วัสดุผสมคอนกรีตแบ่งเป็นสองพวกคือ วัสดุผสมละเอียดและวัสดุผสมหยาบ วัสดุผสมละเอียด หมายถึง วัสดุที่มีขนาดเล็กที่สามารถรูดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ซึ่งได้แก่ ทราย วัสดุผสมหยาบหมายถึง วัสดุผสมที่มีก้อนโตไม่ผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ได้แก่ หินหรือ กรวด ซีเมนต์เพสต์ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ และอากาศ (วินิต, 2527)

โดยทั่วไป คอนกรีตที่ไม่ได้สารกระจายฟองอากาศจะมีปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ประมาณ ร้อยละ 25 – 40 โดยเป็นปริมาตรของปูนซีเมนต์ร้อยละ 7 – 15 น้ำร้อยละ 14 – 21 และมีปริมาตร ของอากาศที่แทรกอยู่ในช่องว่างประมาณร้อยละ 0.5 – 3 ส่วนที่เหลือเป็นปริมาตรของวัสดุผสม เนื่องจากเนื้อคอนกรีตมีวัสดุผสมอยู่ประมาณร้อยละ 60 – 80 ของปริมาตรทั้งหมด ดังนั้นการ เลือกใช้วัสดุผสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง วัสดุที่จะใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต ต้องแข็งแรงรับ แรงอัดได้ดี ทนทาน ไม่ขยายตัว และสะอาดโดยไม่มีสารจำพวกที่จะก่อให้เกิดการเสื่อมคุณภาพต่อ คอนกรีต นอกจากนี้ วัสดุผสมต้องมีส่วนขนาดคละ (Gradation) ที่ดี เพื่อช่วยให้คอนกรีตมีเนื้อแน่น สม่าเสมอและมีช่องว่าง (Void) น้อย (ทำให้ใช้ซีเมนต์เพสต์น้อยลง)

ซีเมนต์เพสต์เป็นสารที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำและทำหน้าที่เป็นตัว ประสาน โดยการไปเคลือบหรือหุ้มเม็ดทรายและก้อนหินทั้งหมดให้ยึดติดกันเป็นก้อนแข็ง รวมทั้งอุดช่องว่างระหว่างหินและทราย ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น ความแข็งแรงของคอนกรีต จึงขึ้นอยู่กับคุณภาพของซีเมนต์เพสต์ด้วย

คุณภาพของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (Water-cement ratio) ที่ใช้ใน ส่วนผสม ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เรียกว่า ไฮเดรชัน (Hydration) ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง

ปูนซีเมนต์กับน้ำขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิ และความชื้น ปฏิกริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะช้าลงตามลำดับในช่วงหลัง

2.2 คอนกรีตที่ใช้เป็นโครงสร้าง

อาจแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

2.2.1 คอนกรีตล้วน (Plain Concrete) เป็นคอนกรีตที่ไม่มีวัสดุอื่นมาเสริมประกอบ คอนกรีตประเภทนี้เหมาะกับโครงสร้างแรงอัดเพียงอย่างเดียว เช่น ฐานเครื่องจักรที่หนามากๆ

2.2.2 คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) เป็นคอนกรีตที่ใช้เหล็กเส้นเสริมแรงดึง ร่วมกับคอนกรีตคอนกรีตเสริมเหล็กเหมาะกับโครงสร้างที่ต้องแรงอัดและแรงดึง

2.2.3 คอนกรีตอัดแรง (Pre-stressed Concrete) เป็นคอนกรีตที่มีการอัดแรงก่อนใช้งาน ซึ่งเหมาะกับชิ้นส่วนสำเร็จรูป

2.3 กำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดหรือความสามารถต้านทานต่อแรงอัด เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของคอนกรีต กำลังต้านทานอื่น เช่น กำลังต้านทานแรงเฉือน และกำลังยึดเหนี่ยว ล้วนเป็นสัดส่วนกับกำลังอัดทั้งสิ้น กำลังอัดของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่สำคัญยิ่งที่มีผลต่อความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีต ดังนั้น ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีต ข้อกำหนดที่สำคัญสำหรับการออกแบบอันหนึ่งคือกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

2.3.1 ธรรมชาติของกำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

ก. กำลังอัดมอร์ต้า

กำลังของมอร์ต้ามีบทบาทอย่างมากต่อกำลังของคอนกรีต กำลังของมอร์ต้าขึ้นอยู่กับความพรุน (Porosity) ภายในเนื้อมอร์ต้า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water Cement Ratio) และ Degree of Hydration แต่ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของมอร์ต้ากับความพรุนจะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า กำลังของมอร์ต้าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เป็นสำคัญ

ข. กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม

เมื่อกำหนดให้กำลังของมอร์ต้าเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง กำลังของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังของหินและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต้ากับมวลรวม แต่โดยทั่วไป กำลังของมวลรวมจะสูง

กว่ากำลังของมอร์ต้ามาก ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวจะเป็นตัวควบคุมการแตกของคอนกรีต สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่กำหนดให้ค่าหนึ่ง กำลังของคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้หินขนาดใหญ่ เพราะหินขนาดใหญ่จะก่อให้เกิดน้ำได้หินมากขึ้น ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต้ากับหินลดลง

ขนาดของมวลรวม จะมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำหรือปานกลาง มากกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง การเพิ่มปริมาณของมวลรวมในส่วนผสม จะเป็นการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต รวมทั้งถ้าใช้หินที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นสูง จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตดีขึ้น

ค. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต้ากับมวลรวม

แรงยึดเหนี่ยวนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีในเนื้อของมวลรวม ลักษณะทางกายภาพ เช่น รูปร่างลักษณะผิวของมวลรวม ส่วนลักษณะทางเคมี คือปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับแร่ธาตุต่างๆ ในเนื้อมวลรวม (ชัชวาลย์, 2536)

2.4 ประเภทของมวลรวม

มวลรวมหรือวัสดุผสม (Aggregate) คือวัสดุเฉื่อย อันได้แก่ หิน ทราย กรวด มวลรวมเป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีต เนื่องจากมีปริมาตรร้อยละ 70 – 80 ของปริมาณ ของส่วนผสมทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่น่าเป็นที่สงสัยเลยว่า ทำไมคุณภาพของมวลรวม จึงมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีตและจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องให้ความสนใจในเรื่องนี้อย่างมาก

ในอดีต มวลรวมถูกคิดว่าเป็นเพียงวัสดุเฉื่อย ที่ใช้เป็นตัวแทรกประสาน โดยกระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์เท่านั้น ในปัจจุบันนี้พบว่า มวลรวมยังทำหน้าที่อื่นที่สำคัญอีก ประการแรกเนื่องจากมวลรวมเป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่มีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นในส่วนผสมของคอนกรีตจึงควรใช้ปริมาณมวลรวมให้พอเหมาะเพื่อที่จะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ประการต่อมาคุณสมบัติของมวลรวม จะช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน (Durability) และปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก (Volume Stability) รวมทั้งมวลรวมยังทำหน้าที่ต้านทานน้ำหนักที่กดลงบนคอนกรีตด้วย กำลังและคุณสมบัติทางกายภาพอีกหลายประการของมวลรวมมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ทั้งในสภาพที่เป็นคอนกรีตเหลวและคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ดังนั้น การเลือกใช้มวลรวมที่เหมาะสมไม่เพียงแต่เป็นการประหยัด แต่ยังช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้นด้วย มวลรวมที่ดีที่จะส่งให้คอนกรีตมีความทนทานสูง ควรมีคุณสมบัติพื้นฐานที่ดีดังนี้ คือ ต้องมีความคงทนไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อเสถียรภาพทางปริมาตรของคอนกรีต และมวลรวมต้องไม่มีสิ่งเจือปนสารที่มีผลเสียต่อกำลังและความคงตัวของซีเมนต์เพสต์ คุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ขึ้นอยู่กับขบวนการย่อยแปรสภาพของมวลรวม

2.4.1 ประเภทของมวลรวม

มวลรวมสามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

ก. มวลรวมที่เกิดจากธรรมชาติ (Natural Mineral Aggregate) เกิดจากขบวนการกัดกร่อนและเสียดสีตามธรรมชาติ

ข. มวลรวมที่มนุษย์ทำขึ้น (Artificial Aggregate) เช่น มวลรวมเบาบางประเภทที่ได้จากการเผาดิน เป็นต้น

ถ้าแบ่งมวลรวมตามความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักจะแบ่งได้ 3 กลุ่มคือ

ก. มวลรวมเบา (Lightweight Aggregate) มีความหนาแน่นตั้งแต่ 300 – 1,100 กก./ลบ.ม.

ข. มวลรวมปกติ (Normal Weight Aggregate) มีความหนาแน่นตั้งแต่ 2,400 – 3000 กก./ลบ.ม.

ค. มวลรวมหนัก (Heavyweight Aggregate) มีความหนาแน่นมากกว่า 4,000 กก./ลบ.ม. หรือ ถ้าแบ่งมวลรวมตามขนาด เราสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม

กลุ่มแรกคือ มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ได้แก่ หินกรวดที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มม. ขึ้นไป หรือค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 กลุ่มที่สอง คือ มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ได้แก่ ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มม. หรือ สามารถผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มม. หรือ ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 ส่วนที่มีขนาดเล็กกว่ามวลรวมละเอียดซึ่งมีอยู่จำนวนน้อยมากในส่วนผสมคอนกรีต สามารถแบ่งได้เป็น Silt (ขนาดประมาณ 0.07 มม.) และดินเหนียว (ขนาดอยู่ช่วง 0.00 – 0.06 มม.)

2.4.2 การเก็บรักษามวลรวม

ระหว่างการขนย้ายและกองเก็บมวลรวมไว้รอการใช้งานหรือขนย้ายต่อไป อาจเกิดผลเสียคือ การแยกแยะของมวลรวมขนาดต่างๆ กัน และการแตกหักของมวลรวม การแยกแยะเกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของมวลรวมในระนาบเอียง มวลรวมขนาดใหญ่ที่หนักกว่า มักไหลลงปกรวมกันใกล้เชิงระนาบเอียง ส่วนมวลรวมขนาดเล็กกว่าคงติดค้างอยู่ตอนบนของระนาบเอียง นอกจากนี้ควรระมัดระวังการเทมวลรวมเมื่อมีลมแรง เพราะลมสามารถพัดพามวลรวมขนาดเล็กไปได้ไกลกว่าขนาดใหญ่กว่า วิธีการป้องกันที่ดีก็โดยการแยกเก็บมวลรวม ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเก็บรักษามวลรวม

2.5 น้ำ

น้ำ เป็นปัจจัยที่สำคัญยิ่งในการทำคอนกรีต ปริมาณและคุณภาพของน้ำมีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต น้ำรวมเข้ากับปูนซีเมนต์ทำให้เกิดปฏิกิริยา เกิดการก่อตัว และแข็งตัวตามลำดับ น้ำที่มีคุณภาพดีจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้อย่างสมบูรณ์ และให้กำลังของคอนกรีตสูง น้ำที่ไม่สะอาดและมีแร่ธาตุเจือปนมาก อาจทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงถึงร้อยละ 30 – 40 (ภิกพ, 2543) ซึ่งเป็นอันตรายต่อโครงสร้างอย่างมาก

น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตต้องสะอาด มีความขุ่นไม่เกิน 2000 ppm (วินิต, 2529) ปราศจากกรด ด่าง น้ำมัน และสารอินทรีย์อื่นๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีตหรือเหล็กเสริมโดยปกติ น้ำประปา และน้ำจืดตามธรรมชาติส่วนใหญ่ ซึ่งไม่มีส่วนผสมของน้ำเสียจากอาคารบ้านเรือนหรือจากโรงงานอุตสาหกรรมถือว่ามีความปลอดภัย สำหรับงานคอนกรีต

หน้าที่ของน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต คือ

1. ทำหน้าที่เคลือบหินและทรายให้เปียกเพื่อปูนซีเมนต์ จะเข้าเกาะโดยรอบและแข็งตัวยึดให้ติดกันได้
2. ทำหน้าที่หล่อลื่นในวัสดุทั้ง 3 อย่าง คือ ปูนซีเมนต์ มวลรวมหยาบ และ มวลรวมละเอียด เกิดความเหลว สามารถเทและกระทุ้งหรือเขย่าเข้าแบบหล่อให้เป็นรูปร่างตามแบบ
3. ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์ เกิดเป็นวุ้นซีเมนต์ และซีเมนต์เหนียว ซึ่งเป็นตัวประสานผิวระหว่างเม็ดของวัสดุผสมให้เกาะยึดกันแน่นเมื่อแข็งตัว

ปริมาณสารต่างๆ ที่เจือปนอยู่ในน้ำจะต้องไม่เกินกว่าปริมาณที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณที่ยอมให้ของสารเจือปนในน้ำ

สารที่เจือปน	ปริมาณที่ยอมให้สูงสุดส่วนต่อล้าน
เกลือ	
โซเดียมคาร์บอเนต และ โพแทสเซียมคาร์บอเนต	1,000
แคลเซียมและแมกนีเซียมคาร์บอเนต	400
แมกนีเซียมซัลเฟตและคลอไรด์	40,000
โซเดียมคลอไรด์	20,000
โซเดียมซัลเฟต	10,000
กรด	
เกลือของแร่เหล็ก	40,000
ฝุ่นหรือผงหรืออนุภาคลอยตัว	2,000
น้ำทะเล	35,000
น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม	4,000
น้ำโสโครก	400
น้ำตาล	500
ตะไคร่น้ำ	1,000

ที่มา : วินิต ช่อวิเชียร (2539)

2.6 การบ่มคอนกรีต

การบ่ม (Curing) คือชื่อเฉพาะของวิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง วิธีการทำโดยให้น้ำแก่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว หน้าที่สำคัญของการบ่มคอนกรีตมีด้วยกัน 2 ประการ คือ ประการแรก คือ ป้องกันการสูญเสียความชื้นจากเนื้อคอนกรีต และประการที่สองคือรักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม วัตถุประสงค์ที่สำคัญของการบ่มคอนกรีต คือ

1. เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังและความทนทาน
2. เพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต โดยรักษาระดับอุณหภูมิให้เหมาะสม และลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุด

การบ่มอาจหมายถึงการควบคุมอุณหภูมิของคอนกรีตด้วย ทั้งนี้ เพราะอุณหภูมิที่สูงจะเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อันทำให้คุณภาพของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก อย่างไรก็ตาม การเร่งนี้อาจก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในระยะยาว

2.6.1 กรรมวิธีการบ่ม

กรรมวิธีการบ่มแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามสภาพอุณหภูมิที่ใช้บ่ม คือ การบ่มที่อุณหภูมิปกติ การบ่มที่อุณหภูมิและความดันสูง การพัฒนากำลังอัดเนื่องจากอิทธิพลของการบ่มสรุปได้ดังนี้

ก. กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงวันแรกๆ ถ้าได้รับการบ่ม ซึ่งชี้ถึงความสำคัญของการบ่มในระยะแรก

ข. กำลังของคอนกรีตมีโอกาสดำเนินเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หลังอายุ 28 วัน โดยอัตราการเพิ่มของกำลังจะช้าลง แต่ก็ยังเพิ่มขึ้นตลอดเวลา หากได้รับการบ่มที่ดี

หากขาดความชื้น กำลังคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นสักระยะหนึ่งเพราะความชื้นที่เหลืออยู่ แต่หลังจากนั้นกำลังจะไม่เพิ่มขึ้นอีก เช่น กำลังของคอนกรีตที่ได้รับการบ่ม 3 วัน มีกำลังเพียงร้อยละ 75 – 80 ของกำลังคอนกรีตที่บ่มขึ้นครบ 28 วัน

ดังนั้นจึงควรบ่มคอนกรีตให้นานที่สุดเท่าที่จะทำได้ นั่นคือ บ่มจนกว่าคอนกรีตมีกำลังสูงตามที่ต้องการ ในทางปฏิบัติ มักไม่สามารถบ่มคอนกรีตได้นานนัก เนื่องจากข้อจำกัดในการก่อสร้างและค่าใช้จ่าย รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าการบ่มคอนกรีตจนถึง 7 วัน ทำให้กำลังของคอนกรีตสูงทัดเทียมกับกำลังของคอนกรีตที่บ่มและทดสอบในสภาพชื้นถึง 28 วัน ตามมาตรฐานอเมริกาแนะนำให้ใช้เวลาบ่มชื้น 7 วัน สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป หรือเวลาที่จำเป็นเพื่อให้ได้กำลังร้อยละ 70 ของกำลังอัดหรือกำลังคัดที่กำหนดแล้วแต่ว่าเวลาไหนน้อยกว่ากัน แต่สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณมากๆ เช่น ฐานรากแผ่นขนาดใหญ่ จำเป็นต้องบ่มนานถึงอย่างน้อย 2 สัปดาห์ ในกรณีที่มีการบ่มต้องหยุดชะงักไประยะเวลาหนึ่งด้วยเหตุผลใดๆ ก็ตาม เมื่อคอนกรีตได้รับความชื้นปฏิกิริยาไฮเดรชันก็สามารถเกิดขึ้นต่อไป ทำให้กำลังของคอนกรีตสูงเพิ่มขึ้นไปอีก

2.6.2 การบ่มที่อุณหภูมิปกติ

การบ่มจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ การเพิ่มความชื้นและการป้องกันการเสียความชื้น

ก. การเพิ่มความชื้น คือการให้ความชื้นต่อผิวหน้าของคอนกรีตโดยตรงในระยะแรก ที่คอนกรีตแข็งตัว วิธีนี้นอกจากจะเป็นวิธีบ่มที่ดีแล้วยังสามารถช่วยลดอุณหภูมิที่ผิวของคอนกรีต

ลงด้วย จึงเหมาะกับคอนกรีตที่เทในอากาศร้อน การบ่มแบบนี้ทำได้หลายวิธีตารางที่ 2.2 แสดงข้อดี และข้อเสียของการบ่มคอนกรีตในแต่ละวิธี

ข. การป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต วิธีนี้เป็นการป้องกันความชื้นจากผิวคอนกรีตมิให้เล็ดลอดออกสู่ภายนอก การป้องกันความชื้นวิธีนี้ ได้แก่ การใช้กระดาษกันน้ำ ผ้าพลาสติก หรือ สารเคมี เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ไม้แบบที่ยังไม่ถอดก็สามารถป้องกันการเสียน้ำความชื้นได้เช่นกัน วิธีการบ่มแบบนี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3



ตารางที่ 2.2 วิธีการบ่มโดยเพิ่มความชื้น

วิธีการบ่ม	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
1. การขังน้ำ เหมาะสมกับงานคอนกรีตที่มีพื้นราบเช่นแผ่นพื้นทั่วไป คาดฟ้า พื้นสะพาน ถนนทางเท้า สนามบิน วิธีการ ทำโดยใช้ดินเหนียว หรือ ก่ออิฐทำเป็นคันโดยรอบของงานคอนกรีตที่จะบ่ม ข้อควรระวัง อย่าให้น้ำใช้บ่มมีอุณหภูมิต่ำกว่าคอนกรีตเกิน 10 °C	1. ทำได้สะดวก ง่าย ราคาถูก 2. วัสดุหาได้ง่าย เช่นดินเหนียว และน้ำ 3. ใช้คนงานระดับกรรมกรทำได้ 4. ช่อมแซมได้สะดวกรวดเร็ว และประหยัด ค่าใช้จ่าย ตัวอย่างเช่น ทำคันดินเหนียวและพังก็สามารถซ่อมได้ทันที	1. ต้องหมั่นตรวจดูรอยแตกร้าวของดินเหนียวที่นำมาใช้อยู่เสมอ มิฉะนั้นน้ำจะซึมหนี 2. ต้องเก็บทำความสะอาดบริเวณคอนกรีตที่บ่มเสร็จ
2. โดยการฉีดน้ำหรือพรมน้ำ 1. วิธีการ ใช้ได้ทั้งแนวราบและแนวดิ่ง เช่นผนัง กำแพง และพื้น	1. ทำได้สะดวก ได้ผลดี 2. ค่าใช้จ่ายถูก 3. ใช้คนงานระดับกรรมกรได้ 4. ไม่ต้องดูแลตลอดเวลา	1. ไม่เหมาะสมกับสถานที่ที่หาน้ำได้ยาก 2. ไม่สะดวกกับการฉีดกับกำแพงในแนวดิ่ง เพราะน้ำจะแห้งเร็ว

ตารางที่ 2.2 วิธีการบ่มโดยเพิ่มความชื้น (ต่อ)

วิธีการบ่ม	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
3. โดยการใช้วัสดุเปียกขึ้นคลุม วิธีการ เช่น นำผ้าใบ ครอบคลุมซึ่งอุ้มน้ำได้ ถ้าเป็นผ้าใบควรเป็นสีขาวเพราะสะท้อนความร้อนได้ดีและรอยต่อต้องเหลื่อมกันให้มาก ถ้าใช้ฟางหรือจี้เลื่อยคลุมควรหนาไม่น้อยกว่า 15 ซม. คลุมให้ทั่วและรดน้ำให้ชุ่มอยู่เสมอ	1. ได้ผลดีมาก ราคาไม่สูงเกินกว่าที่จะทำ 2. ทำได้ทั้งแนวราบและแนวตั้ง ในกรณีที่ใช้ผ้าใบและกระสอบ 3. ใช้คนงานระดับกรรมกรทำได้ 4. สามารถหาวัสดุมาใช้ได้ง่าย	1. ถ้าอากาศร้อนจะแห้งเร็ว 2. ถ้าที่กว้างๆ ถ้าใช้ผ้าใบคลุมจะเสียค่าใช้จ่าย มาก 3. ต้องรดน้ำให้ชุ่มอยู่เสมอ 4. ต้องพิจารณาก่อนที่จะนำมาใช้ ว่าวัสดุนั้นเป็นอันตรายต่อซีเมนต์หรือผิวคอนกรีตหรือไม่



ตารางที่ 2.3 วิธีป้องกันการสูญเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต

วิธีการบ่ม	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
1. การใช้กระดาษกันน้ำซึมได้คลุมกระดาษนี้ทำด้วยกระดาษเหนียวยึดติดกันด้วยกาวยางมะตอย และเสริมความเหนียวด้วยใยแก้ว และมีคุณสมบัติยึดหดตัวไม่มากวิธีการใช้ รอยต่อควรเหลื่อมกันให้มากพอสมควร และรอยต่อระหว่างแผ่นต้องผนึกติดแน่นด้วยกาวยาง เทป หรือทรายก็ได้	1. ทำให้สะดวก รวดเร็ว 2. ป้องกันคอนกรีตไม่ให้แห้งได้เร็วแต่ต้องคอยรดน้ำไว้ด้วย 3. ใช้คนงานระดับกรรกรทำได้	1. ราคาแพง 2. ไม่สะดวกในการปฏิบัติงาน 3. ไม่สะดวกในการเก็บรักษาต่อไป เมื่อนำมาใช้งาน
2. การใช้แผ่นพลาสติกคลุม เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา และสามารถใช้คลุมงานคอนกรีตที่จะบ่มได้ทันทีที่ต้องการ	1. มีน้ำหนักเบา ปฏิบัติงานง่าย 2. ได้ผลดีในการป้องกันน้ำระเหยออกไปจากคอนกรีต 3. ไม่ต้องรดน้ำให้ชุ่มอยู่ภายใน	1. บางมาก ชำรุดง่าย 2. ต้องการของหนักทับเพิ่มเพื่อกันปลิว 3. ราคาแพง ถ้าใช้ในการคลุมงานคอนกรีตที่กว้าง

ตารางที่ 2.3 วิธีป้องกันการสูญเสียจากเนื้อคอนกรีต (ต่อ)

วิธีการบ่ม	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
3. การบ่มด้วยน้ำยาเคมีเคลือบผิวคอนกรีต มีหลายสีด้วยกันเช่น ใส ขาว เทาอ่อน และดำ สำหรับสีขาว จะเหมาะสมกว่าเพราะสะท้อนความร้อนและแสงได้ดีกว่าโดยใช้พ่นคลุมผิวคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็วๆ เช่น ลานบิน หลังคากว้างๆ งานพิเศษต่างๆ หรือตึกสูงๆ ที่ส่งน้ำขึ้นได้ลำบาก	1. สะดวก รวดเร็ว 2. ได้ผลดีพอสมควร ถ้าน้ำยานั้นเป็นของแท้ และมีความเข้มข้นตามมาตรฐานของผู้ผลิต 3. ไม่ต้องคอยรดน้ำ	1. ค่าใช้จ่ายสูง 2. ต้องจัดเตรียมเครื่องมือสำหรับพ่นทุกครั้ง 3. ต้องใช้บุคลากรที่มีประสบการณ์ 4. น้ำเคมีที่ใช้พ่นอาจทำอันตรายต่อผู้ที่อยู่อาศัยในระยะใกล้เคียงได้
4. การบ่มโดยใช้แบบ ต้องให้การพ่นน้ำใส่ไม้แบบให้มีความชื้นอยู่เสมอแบบจะป้องกันการเสียความชื้นได้ดีมากฉะนั้นควรรักษาไม้แบบไว้ให้นานที่สุดหลังจากถอดแบบแล้วจึงใช้วิธีอื่นต่อไป	1. ทำได้สะดวก 2. ใช้คนงานระดับกรรมกรทำได้	1. ต้องใช้ไม้แบบจำนวนมาก 2. ซ้ำเพราะต้องนำไม้แบบไปใช้งานอื่นต่อไป 3. ถ้าเป็นไม้แบบเก่า ต้องเสียเวลาทำความสะอาด ไม้แบบ

2.6.3 ระยะเวลาการบ่ม

โดยทั่วไป ระยะเวลาการบ่มคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญหลายประการ อาทิเช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ อัตราส่วนของคอนกรีต กำลังของคอนกรีตที่ต้องการ ขนาดและรูปร่างของแท่งคอนกรีต อุณหภูมิที่ใช้บ่ม และความชื้นในขณะบ่ม เป็นต้น องค์ประกอบเหล่านี้ถือได้ว่า มีผลต่อระยะเวลาของการบ่มคอนกรีต ซึ่งอาจจะถึง 1 เดือน สำหรับคอนกรีตที่ใช้ทำเขื่อน หรือเพียง 3 วัน สำหรับคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ในปริมาณสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดเกิดกำลังสูงเร็ว

งานโครงสร้างทั่วไป ส่วนใหญ่กำหนดระยะเวลาในการบ่มไว้ตั้งแต่ 3 วัน จนถึง 2 สัปดาห์ ซึ่งกำหนดเวลาดังกล่าวขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยปกตินิยมกำหนดระยะเวลาการบ่มไว้ประมาณ 1 สัปดาห์ สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ระยะเวลาของการบ่มคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งผลิตขึ้นในประเทศไทยได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เวลาขั้นต่ำในการบ่มคอนกรีต

ประเภทของงาน	คอนกรีตที่ใช้		
	ปูนซีเมนต์ผสม	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3
งานธรรมดา			
เสา คาน และกำแพง	7 วัน	7 วัน	4 วัน
พื้นบ้าน พื้นถนนในบ้าน ฯลฯ	8 วัน	8 วัน	4 วัน
ถนนชั้นหนึ่ง ลานจอดหรือทางวิ่งของเครื่องบิน	-	14 วัน	7 วัน
เสาเข็มสำหรับนำไปตอกคอนกรีตเป็นฐานราก	21 วัน	14 วัน	7 วัน
งานพิเศษ			
แผ่นพื้นบางๆ	14 วัน	14 วัน	7 วัน
รูปหล่อที่เล็กบาง ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ผสมมาก	-	21 วัน	7 วัน

2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 อัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีต

โดยทั่วไป มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยคอนกรีตเก่าจะมีอัตราการดูดซึมน้ำสูงกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ประมาณ 3 ถึง 12 เท่า ขึ้นอยู่กับขนาดและคุณภาพของมวลรวมหยาบ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 อัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมจากงานวิจัยที่ผ่านมา

References	Water Absorption (%)			
	Recycled Concrete Aggregate		Natural Aggregate	
	Coarse	Fine	Coarse	Fine
Hansen and Narud(1983)	3.8 – 5.0	8.7	0.8 – 1.8	3.7
Hasaba (1981)	7.0	11.0	-	-
Ravindrarah and Tam (1985)	5.7	6.2	0.3	0.6
Kikuchi et al. (135)	4.0 – 5.7	7.3 – 10.0	0.5 – 1.6	1.2
Kakizaki et al. Ibid.135	3.5 – 6.3	9.4 – 11.8	1.4	3.3
Mukai et al. 32nd Review	6.7	9.4	0.8	1.0
Ikeda. Ibid 135	5.7	11.1 – 11.7	0.9	1.4
Hansen and Marga. Ibid 135	3.3 – 10.0	11.4 – 13.1	0.6 – 1.1	2.4
Yanagi. Ibid	4.5 – 5.3	4.5 – 9.7	0.6	1.8
B.C.S.J. (1978)	3.6 – 8.0	8.3 – 12.1	-	-

Nixon (1997) ได้ทำการเปรียบเทียบมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยคอนกรีตเก่าและมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ พบว่ามวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยคอนกรีตเก่ามีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ Hasaba (1981) พบว่ามวลรวมหยาบขนาด 5 – 25 มม. มีความสามารถในการดูดซึมน้ำประมาณร้อยละ 7 Hansen and Narud (1983) พบว่ามวลรวมขนาด 4 – 8 มม. สามารถดูดซึมน้ำได้ร้อยละ 8.7 และมวลรวมขนาด 16–32 มม. สามารถดูดซึมน้ำได้ร้อยละ 3.7 Kreijger ได้ศึกษาถึงการดูดซึมน้ำกับความหนาแน่นของคอนกรีต ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การดูดซึมน้ำเทียบกับความหนาแน่น

Densities of the WCA	Water Absorption of the WCA %	หมายเหตุ
2400 kg/m ³	3.8	Waste Concrete Aggregates (WCA)
1900 kg/m ³	9.7	
1700 kg/m ³	12.8	
1300 kg/m ³	22.2	

มาตรฐาน Building Contractors Society of Japan – B.C.S.J., 1978 กำหนดว่ามวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยคอนกรีตเก่าสามารถนำมาใช้แทนมวลรวมจากธรรมชาติในการทำคอนกรีตได้ เมื่ออัตราการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 7 และร้อยละ 13 ตามลำดับ Turanli.,1993พบว่าอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 5.02 สำหรับมวลรวมหยาบที่มีขนาด 15 – 30 มม. TopÇu and Sengel (1995) พบว่ามวลรวมหยาบที่จะนำมาผสมคอนกรีตควรมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 5.5 ความหนาแน่นเท่ากับ 2470 กก./ม³ และการซึมซับน้ำภายใน 30 นาที เท่ากับร้อยละ 7

2.7.2 หน่วยน้ำหนักและช่องว่างของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล

Hansen and Narud (1983) ได้ทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพอัดตัวผิวแห้งที่ผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลขนาด 4 – 8 มม. มีค่าประมาณ 2340 กก./ม³. และขนาด 16 – 32 มม. มีค่าประมาณ 2490 กก./ม³. ในขณะที่ คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติขนาด 4 – 8 มม. มีค่าหน่วยน้ำหนักประมาณ 2500 กก./ม³. และขนาด 16–32 มม. มีค่าหน่วยน้ำหนักประมาณ 2610 กก./ม³ Narud (1981) พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์ 0.7 จะได้ค่าหน่วยน้ำหนัก 2297 กก./ม³. B.C.S.J. (1978) กล่าวว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลในสภาพอัดตัวผิวแห้งมีค่าประมาณ 2120 – 2480 กก./ม³. Turanli (1993) กล่าวว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลขนาด 15 – 30 มม. มีค่า 2410 กก./ม³. และเมื่อสภาพอัดตัวผิวแห้ง มีค่า 2570 กก./ม³. Ravindrarajah and Tam (1985_ สรุปว่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยคอนกรีตเก่ามีค่าต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ เนื่องจากมีซีเมนต์เพสต์ติดอยู่กับมวลรวมหยาบ ซึ่งมีหน่วยน้ำหนักเบากว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ

2.7.3 ขนาดผลของมวลรวมที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

Rasheeduzzafar and Khan.A (1984) ได้ทำการวิจัยความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยคอนกรีตเก่าขนาดต่างๆ และสรุปว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยคอนกรีตเก่ามีค่าความสามารถในการเทได้ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา สุรศักดิ์ ภูสันติพงษ์ (2002) ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ถูกทำลายเพื่อมาใช้ทดแทนมวลรวมในการผสมคอนกรีต โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่าดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบที่ใช้ผสมคอนกรีต (สุรศักดิ์ ภูสันติพงษ์, 2002)

Properties	Crushed Limestone	ค่ากำลังของ Coarse Recycled Aggregate			SIZE OF CONCRETE Ø 15 ซม. สูง 30 ซม.
		180–250 kg/cm ²	200 – 400 kg/cm ²	400 – 500 kg/cm ²	
Fineness Modulus	6.85	6.78	6.81	6.78	

2.7.4 ความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมที่ได้จากการย่อยคอนกรีตเก่า

Hansen and Narud, H (1983) พบว่า การสึกกร่อนของมวลรวมหยาบจากการย่อยคอนกรีตเก่าที่ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเองเจลีส มีค่าประมาณร้อยละ 22.4 สำหรับมวลรวมหยาบที่มีขนาด 16 – 32 มม. ที่ได้จากคอนกรีตที่มีกำลังสูง และร้อยละ 41.4 สำหรับมวลรวมหยาบจากการย่อยคอนกรีตเก่าที่มีขนาด 4 – 8 มม. ที่ได้จากคอนกรีตที่มีกำลังต่ำ การสึกกร่อนมีค่าประมาณร้อยละ 23 สำหรับมวลรวมหยาบที่มีขนาด 5 – 25 มม. ที่ได้จากการย่อยคอนกรีตเก่าที่มีกำลังอัดสูง และร้อยละ 24.6 สำหรับมวลรวมหยาบที่มีขนาด 5–25 มม. ที่ได้จากการย่อยคอนกรีตเก่าที่มีกำลังอัดต่ำ (Hasaba, 1981 และ B.C.S.J, 1978) พบว่าการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยคอนกรีตเก่า โดยการทดสอบจากเครื่อง

ทดสอบบดเองเจลีส มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 21.5 – 35.1 Yoshikane (1995) แสดงการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยคอนกรีตเก่าด้วยเครื่องทดสอบเองเจลีสตามกำลังอัดดังตารางที่ 2.8 และ Sayamipak (1995) พบว่าการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่า โดยทดสอบจากเครื่องทดสอบบดเองเจลีสมีค่าร้อยละ 43.4

ตารางที่ 2.8 ความเปลี่ยนแปลงของการสึกกร่อนด้วยเครื่องทดสอบลอสเองเจลิส ตามกำลังอัด
ของคอนกรีต (Yoshikane, 1995)

Concrete Specimen Code	C	A	B	E	F	D
Compressive Strength (MPa)	15	16	21	30	38	40
Los Angeles Abrasion Loss Ratio (%)	28.7	27.3	27.0	25.6	22.9	20.1

2.7.5 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยคอนกรีตเก่า

Buck (1973) พบว่าการใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยคอนกรีตที่มีกำลังต่ำมาทำคอนกรีต ไม่ส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตมากนัก Yoshio et al. (1995), Ravindrarajah and Tam, 1985) และ Building Contractors Society of Japan (1978) สรุปว่ามวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยคอนกรีตเก่ามีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตใหม่ ได้แก่ ความทนทาน ความพรุน การดูดซึมน้ำ และการใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยคอนกรีตเก่าแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติร้อยละ 20 ไม่ส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต ถ้าใช้มวลรวมหยาบเก่าแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ร้อยละ 100 จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงร้อยละ 8 – 40 งานวิจัยของ Kashino and Takahashi, Ibid, Eef 135, Kawakami and Sazukawa (1989) และ Ching (1991) พบว่าถ้าใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยคอนกรีตเก่าแทนมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ไม่เกินร้อยละ 30 จะไม่ทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตใหม่เปลี่ยนไปจากคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมโดยใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ในขณะที่ Rasheeduzzafar and Khan (1984) ได้พยายามทำคอนกรีตกำลังอัดสูง ขนาด 40 เมกะปาสกาล โดยใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยคอนกรีตที่มีกำลังอัด 23 เมกะปาสกาล พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้มีค่าต่ำกว่ากำลังอัดคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากัน Malhotra (1976) และ Soshiroda (1983) สรุปว่าการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยคอนกรีตเก่าและทราย มีลักษณะคล้ายกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ และการใช้มวลรวมละเอียดจากการย่อยคอนกรีตเก่าแทนที่ทรายธรรมชาติ จะให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง B.C.S.J. (1978) พบว่าคอนกรีตมีกำลังอัดลดลงร้อยละ 14-32 เมื่อใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยคอนกรีตเก่ามาผสมทำคอนกรีต Nixon (1997) พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยคอนกรีตเก่าผสมทำคอนกรีตใหม่จะมีกำลังลดลงประมาณร้อยละ 20 Gerardu and Hendriks (1985) พบว่าการใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยคอนกรีตเก่าและทรายธรรมชาติผสมทำคอนกรีตใหม่จะมีกำลังอยู่ระหว่างร้อยละ 80 – 95 ของคอนกรีตปกติ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความสามารถในการนำวัสดุเหลือใช้จากการรีดอลิ่งก่อสร้าง (เศษคอนกรีตและเศษอิฐมวลเบา) มาเป็นมวลรวมในการผลิตคอนกรีต คุณสมบัติทางกายภาพของเศษคอนกรีตและเศษอิฐมวลเบาจะใช้เป็นตัวกำหนดอัตราส่วนผสมของคอนกรีต ผู้วิจัยจะสร้างความความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสึกหรอของมวลรวมหายากับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหายาปริไซเคิล ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เท่ากับ 0.4, 0.5 และ 0.6 และค่ายุบตัว (Slump) ระหว่าง 5 ถึง 10 มิลลิเมตร ถ้าค่ายุบตัว (Slump) มีค่าไม่ได้ตามที่กำหนด จะทำการเติมสารลดน้ำ (Water Reducers) ตัวอย่างทดสอบเป็นรูปทรงลูกบาศก์ หลังจากบ่มในอากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผู้วิจัยจะถอดแบบแล้วนำไปบ่มในน้ำประปาจนได้อายุครบ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน และทำการทดสอบกำลังอัด พร้อมสรุปผลการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

เพื่อกำหนดเป็นขอบเขตทางด้านการคัดเลือกวัสดุ วัสดุที่ใช้ในการวิจัยนี้ประกอบด้วย ทรายจากแหล่งภายในจังหวัดนครราชสีมา ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1-2547 (ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1-2547) วัสดุมวลหายาปริไซเคิลได้จากบดย่อยลูกปูนคอนกรีตที่มีกำลังต้านทานแรงอัด 240 (Cube) และ 350 (Cylinder) กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เศษคอนกรีตจะนำมาย่อยให้มีขนาดเล็กลงจนมีขนาดโตสุดไม่เกิน 3/4 นิ้ว มวลรวมละเอียดปริไซเคิลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากการรีดอลิ่งอิฐมวลเบาและนำมาย่อยให้มีขนาดเล็กลงจนมีขนาดโตสุดไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตร

3.2 ตัวแปรและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

ตัวที่ใช้หมายถึงมวลรวมหายา จะมีทั้งหมด 3 ตัวอย่าง

C หมายถึง หินปูนธรรมชาติ ที่ใช้เป็นมวลรวมหายามีขนาด 3/4 นิ้ว

C240 หมายถึง คอนกรีตเก่าที่ผ่านการทดสอบจากห้องทดสอบ ที่ออกแบบกำลังอัดไว้ที่ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทรงสี่เหลี่ยม นำมาบดให้มีขนาด 3/4 นิ้ว

C350 หมายถึง คอนกรีตเก่าที่ผ่านการทดสอบจากห้องทดสอบ ที่ออกแบบกำลังอัดไว้ที่ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทรงกระบอก นำมาบดให้มีขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว

ตัวที่ใช้หมายถึงมวลรวมละเอียด จะมีทั้งหมด 2 ตัวอย่าง

S หมายถึง ทรายแม่น้ำธรรมชาติ ที่ใช้เป็นมวลรวมละเอียด

RS หมายถึง เศษอิฐมวลเบาที่นำย่อยให้มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือสามารถลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200

ตัวที่ใช้หมายถึงส่วนผสมของมวลรวม จะมีทั้งหมด 6 ตัวอย่าง

C_S หมายถึง คอนกรีตที่ใช้หินปูนจากธรรมชาติเป็นมวลรวมหยาบและทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด

C_RS หมายถึง คอนกรีตที่ใช้หินปูนจากธรรมชาติเป็นมวลรวมหยาบและเศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียดรีไซเคิล

C240_S หมายถึง คอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตที่มีกำลังอัด 240 กก/ชม² (cube) เป็นมวลรวมหยาบและทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด

C240 _RS หมายถึง คอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตที่มีกำลังอัด 240 กก/ชม² (cube) เป็นมวลรวมหยาบและเศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียดรีไซเคิล

C350 _S หมายถึง คอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตที่มีกำลังอัด 350 กก/ชม² (Cylinder) เป็นมวลรวมหยาบและทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด

C350 _RS หมายถึง คอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตที่มีกำลังอัด 350 กก/ชม² (Cylinder) เป็นมวลรวมหยาบและเศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียดรีไซเคิล

3.3 การหาคุณสมบัติของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและเศษอิฐมวลเบา

3.3.1 วิเคราะห์การกระจายขนาด และค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมด้วยตะแกรงตามมาตรฐาน ASTM C 136 (American Society for Testing and Materials, 2001) เพื่อวิเคราะห์ขนาดกระจายตัวและขนาดโดยเฉลี่ยของมวลรวม โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 33 (American Society for Testing and Materials, 2001)

3.3.2 ทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 127 (American Society for Testing and Materials, 2001) การดูดซึมน้ำของมวลรวมเป็นค่าที่แสดงถึงการดูดซึมน้ำเข้าไปเก็บไว้ในมวลรวม

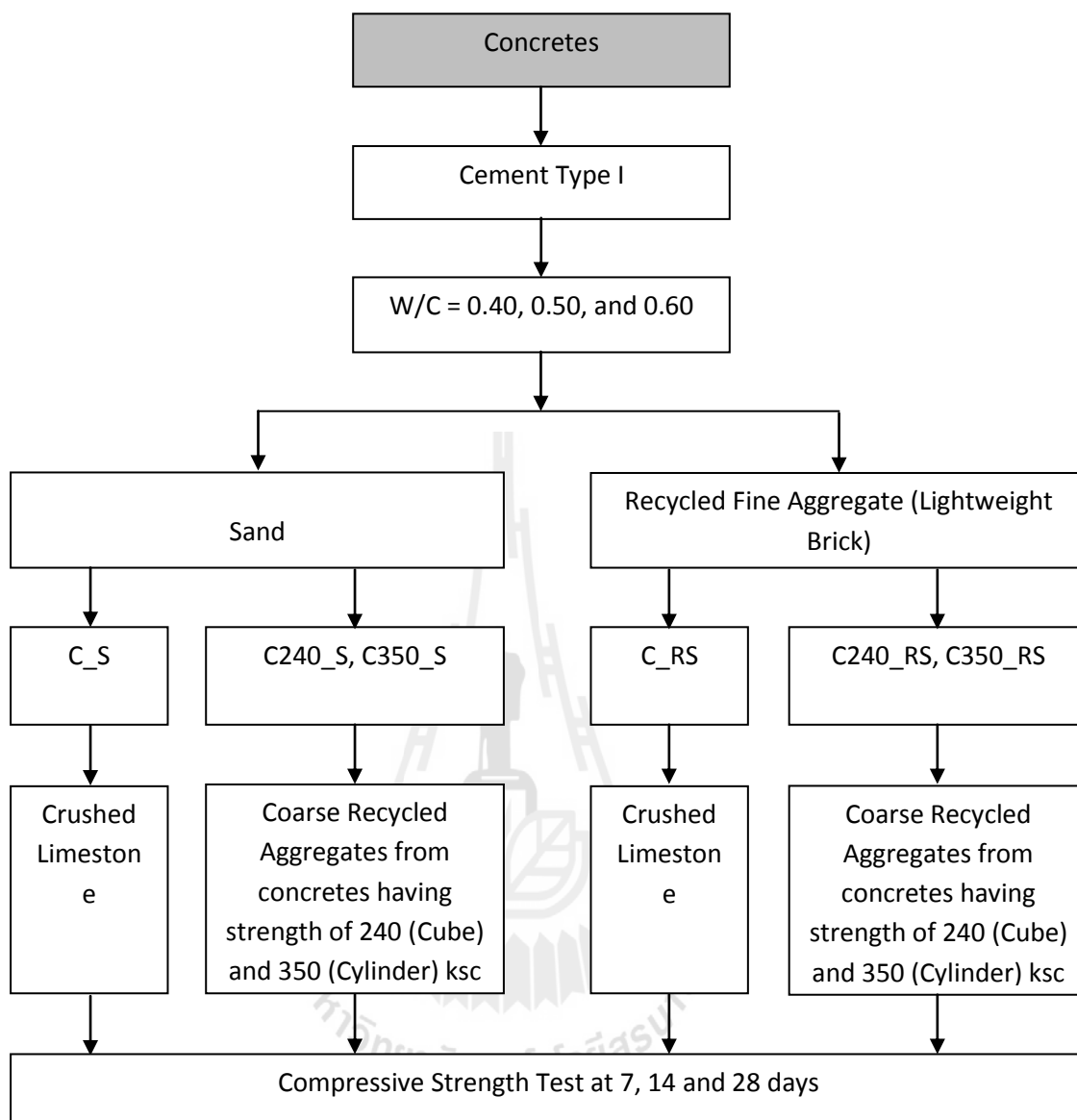
3.3.3 ทดสอบความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C 128 (American Society for Testing and Materials, 2001) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรของวัสดุนั้น

3.3.4 ทดสอบค่าการสึกหรอด้วยเครื่องลอสมองเจลิสตามมาตรฐาน ASTM C 33 (American Society for Testing and Materials, 2001) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบน้ำหนักของมวลรวมทั้งก่อนและหลังการทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM C 33 (American Society for Testing and Materials, 2001) กำหนดให้มวลรวมหยาบมีค่าการสึกหรอไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

3.3.5 ทดสอบหน่วยน้ำหนักของมวลรวม และปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C 29 (American Society for Testing and Materials, 2001) โดยหน่วยน้ำหนักของมวลรวม คือน้ำหนักของมวลรวมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตร ส่วนปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวม คือร้อยละของช่องว่างต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

3.4 ส่วนผสมคอนกรีต

เมื่อคัดเลือกวัสดุทั้งหมดที่นำมาดำเนินงานได้แล้ว และได้ค่าคุณสมบัติของมวลรวมรีไซเคิล และคุณสมบัติมวลรวมธรรมชาติแล้ว กำหนดอัตราส่วนผสมของคอนกรีตโดยปริมาตร ที่อัตราส่วนผสม ปูนซีเมนต์ : ทราย : มวลรวมหยาบ เป็น 1 : 2 : 4 โดยน้ำหนัก และกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เป็น 0.4, 0.5 และ 0.6 และปรับค่าการดูดซึมของมวลรวมอีกครั้ง จะได้อัตราส่วนผสมและปริมาณน้ำที่ใช้จริงในการผสม แผนการดำเนินการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แนวการวิจัยในการผสมตัวอย่างคอนกรีตที่จะใช้ในการทำวิจัย

3.5 การกำหนดค่าความยุบตัว (Slump Test) ของคอนกรีต

กำหนดค่าความยุบตัวของคอนกรีต ให้มีค่าเท่ากับ 5 เซนติเมตร เพราะเป็นค่าเฉลี่ยกลางของงานก่อสร้างโดยทั่วไป ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่ายุบตัวที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตโครงสร้างประเภทต่างๆ

ประเภทโครงสร้าง	ค่ายุบตัว	
	มิลลิเมตร	นิ้ว
คอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เป็น กำแพงกันดินและฐานราก	20 - 80	1 - 3
คอนกรีตล้วนที่ใช้ฐานราก, แบบหล่อได้น้ำ	20 - 100	1 - 3
คานและผนังคอนกรีตเสริม เหล็ก	20 - 100	1 - 4
เสาอาคาร	20 - 80	1 - 3
ถนนและพื้นทั่วไป	20 - 80	1 - 2
คอนกรีตหลา	20 - 80	1 - 3

* ค่ายุบตัวสูงสุดอาจเพิ่มขึ้นได้อีก 20 มิลลิเมตร สำหรับการเขย่าอัดแน่นด้วยมือ

ที่มา : สถาบันคอนกรีตของอเมริกาเสนอค่ายุบตัวที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตโครงสร้างประเภทต่างๆ (ACI 211L-81)

3.6 การผสม การเก็บตัวอย่าง และการบ่ม คอนกรีต

3.6.1 การผสมคอนกรีต เริ่มต้นด้วยการตวงวัสดุละเอียดในกระบะแล้ว เกลี่ยให้แบนและเททับด้วยปูนซีเมนต์ แล้วคลุกแห้งด้วยจอบหรือพลั่วจนปูนซีเมนต์และวัสดุผสมละเอียดเข้ากัน (เป็นสีเดียวกัน) ถ้ามีปูนจับตัวเป็นก้อน ต้องบี้ให้แตกเป็นผงเสียก่อน เกลี่ยส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และมวลรวมหยาบให้แบน แล้วตวงวัสดุผสมหยาบทับลง และผสมแห้งอีกจนเคล้ากันดี แล้วก็เกลี่ยให้แบน ต่อไปอีกค่อยๆ โรยน้ำลงไปให้ทั่ว ปล่อยให้ น้ำซึมซาบชั่วขณะ แล้วลงมือผสมจนคอนกรีตเข้าเนื้อกันดีเป็นสีเดียวกันทั้งหมด เมื่อผสมแล้ว ต้องใช้ให้หมดภายใน 30 นาที ถ้าเหลือหามนำไปใช้อีก

3.6.2 การเก็บตัวอย่าง เมื่อผสมตามระยะเวลาที่กำหนดแล้ว ก่อนนำคอนกรีตบรรจุในแบบเก็บตัวอย่าง ต้องทำการทดสอบค่าการยุบตัว (Slump Test) จากนั้นนำคอนกรีตไปบรรจุลงในแบบหล่อ รูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร เพื่อเก็บตัวอย่าง การเก็บตัวอย่างให้เป็นไปตามมาตรฐานอังกฤษ BS 1881 : Part 3 (Method of Making and Curing Specimens) ทุกประการ จำนวนตัวอย่างทั้งหมดของการศึกษาครั้งนี้เท่ากับ 144 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็น 6 กรณีดังตารางที่ 3.2 เพื่อให้ผลการศึกษา มีความน่าเชื่อถือ ในแต่ละส่วนผสมระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อ

ซีเมนต์ มวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด และอายุบ่ม จำนวนตัวอย่างทดสอบที่ใช้ไม่น้อยกว่า 3 ตัวอย่าง เมื่อได้อายุครบตามที่กำหนดไว้ของคอนกรีตตัวอย่าง ก็นำไปทดสอบกำลังอัดประลัยต่อไป

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงสัญลักษณ์ของอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่นำมาวิจัย

ลำดับ	มวลรวมหยาบ	มวลรวมละเอียด	W/C = 0.4	W/C = 0.5	W/C = 0.6
1.	C	S	0.4_C_S	0.5_C_S	0.6_C_S
2.	C	RS	0.4_C_RS	0.5_C_RS	0.6_C_RS
3.	C240	S	0.4_C240_S	0.5_C240_S	0.6_C240_S
4.	C240	RS	0.4_C240_RS	0.5_C240_RS	0.6_C240_RS
5.	C350	S	0.4_C350_S	0.5_C350_S	0.6_C350_S
6.	C350	RS	0.4_C350_RS	0.5_C350_RS	0.6_C350_RS

3.7 อัตราส่วนของคอนกรีต

อัตราส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 3.3 กำหนดอัตราส่วนระหว่างปูน: มวลรวมละเอียด: มวลรวมหยาบ เท่ากับ 1: 2: 4 ซึ่งนิยมในทางปฏิบัติ อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4, 0.5 และ 0.6 และการยุบตัวของคอนกรีตสดควบคุมให้มีค่าอยู่ในช่วง 5 – 10

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Sample	Mix Proportion of Concrete (kg/m ³)								W/ C	Slump (mm)
	Cement	Fine Aggregate		Coarse Aggregate			Mixing Water	Effective Water		
		Natural	Recycle	Natural I	Recycle le 240	Recycle le 350				
0.4_C_S	282.99	665.74	-	1,264.5	-	-	113.19	8.70	0.4	50-100
0.5_C_S	275.20	647.42	-	1,229.7	-	-	137.60	8.46	0.5	50-100
0.6_C_S	267.83	630.08	-	1,196.7	-	-	160.70	8.23	0.6	50-100
0.4_C_RS	311.30	-	366.87	1,391.0	-	-	124.52	202.34	0.4	50-100
0.5_C_RS	301.90	-	355.79	1,349.0	-	-	150.95	196.23	0.5	50-100
0.6_C_RS	293.05	-	345.37	1,309.5	-	-	175.83	190.48	0.6	50-100

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมคอนกรีต (ต่อ)

Sample	Mix Proportion of Concrete (kg/m ³)								W/ C	Slump (mm)
	Cement	Fine Aggregate		Coarse Aggregate			Mixing Water	Effective Water		
		Natural	Recycle	Natural	Recycle 240	Recycle 350				
0.4_C240_S	237.30	558.25	-	-	883.68	-	94.92	49.19	0.4	50-100
0.5_C240_S	231.80	545.31	-	-	863.20	-	115.90	48.05	0.5	50-100
0.6_C240_S	226.55	532.96	-	-	843.64	-	135.93	46.96	0.6	50-100
0.4_C240_RS	256.89	-	302.75	-	956.64	-	102.76	212.33	0.4	50-100
0.5_C240_RS	250.46	-	295.16	-	932.68	-	125.23	207.01	0.5	50-100
0.6_C240_RS	244.34	-	287.95	-	909.89	-	146.60	201.96	0.6	50-100
0.4_C350_S	240.71	566.29	-	-	-	911.56	96.28	51.80	0.4	50-100
0.5_C350_S	235.05	552.98	-	-	-	890.13	117.53	50.59	0.5	50-100
0.6_C350_S	229.66	540.28	-	-	-	869.69	137.79	49.43	0.6	50-100
0.4_C350_RS	260.90	-	307.47	-	-	987.99	104.36	217.71	0.4	50-100
0.5_C350_RS	254.26	-	299.65	-	-	962.87	127.13	212.18	0.5	50-100
0.6_C350_RS	247.96	-	292.22	-	-	938.99	148.78	206.92	0.6	50-100

3.8 การทดสอบกำลังอัดประลัย

นำตัวอย่างที่หล่อที่ครบอายุออกจากบ่อเพื่อวัดขนาด (กว้าง ยาว และสูง) และชั่งน้ำหนักขนาดของก้อนตัวอย่างวัดเฉพาะด้านที่เรียบ ซึ่งจะใช้รับแรงกด ส่วนด้านไม่เรียบให้อยู่ด้านข้าง ทำเครื่องหมายในด้านที่รับแรงกด บันทึกขนาดและน้ำหนักของตัวอย่างลงตารางบันทึกผล

3.9 การหาค่ากำลังรับแรงกด (Compressive Strength)

3.9.1 วางตัวอย่างลงบนเครื่องกด Compressive Machine

3.9.2 เพิ่มแรงกระทำบนตัวอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วสม่ำเสมอจนถึงแรงกดสูงสุด

3.9.3 บันทึกค่าแรงอัดสูงสุดที่ได้และลักษณะการวิบัติ

3.10 การความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกหรือของเศษคอนกรีตกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล

หลังจากทำการทดสอบกำลังอัดปลายคอนกรีตตัวอย่างทุกตัวอย่างจนเสร็จสิ้น นำค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่ได้ไปสร้างความสัมพันธ์กับความลึกหรือของเศษคอนกรีตและเศษอิฐมวลเบา ความสัมพันธ์นี้จะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาแนวทางการออกแบบคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล



บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

บทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมธรรมชาติและมวลรวมรีไซเคิล (ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและย่อยเศษอิฐมวลเบา) ความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติและมวลรวมรีไซเคิล และวิเคราะห์ผลกระทบจากการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและเศษอิฐมวลเบาทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุบ่มต่าง ๆ

4.1 คุณสมบัติของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและอิฐมวลเบา

คุณสมบัติจำเพาะของมวลรวมเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญ ที่ใช้ในการออกแบบและกำหนดอัตราส่วนผสมของคอนกรีต และยังเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติด้านกำลังต้านทานแรงอัดและความคงทนของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัว มวลรวมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย มวลรวมละเอียดที่ได้จากทรายแม่น้ำและการย่อยเศษอิฐมวลเบา และมวลรวมหยาบที่ได้จากหินปูนย่อยและการย่อยเศษคอนกรีต คุณสมบัติของมวลรวมทั้งหมด แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ในการวิจัย

Properties	River sand	Crushed Limestone	Recycled Aggregate		
			Fine (RS)	Coarse (C240)	Coarse (C350)
Fineness Modulus	2.30	6.45	1.16	6.48	6.12
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.60	3.33	2.05	4.02	3.75
Absorption (%)	1.48	1.44	42.96	2.91	1.33
Dry-Rodded Weight(kg/m ³)	1647	1564	825	1303	1325
Abrasion Loss (%)	-	14.62	-	39.70	21.57

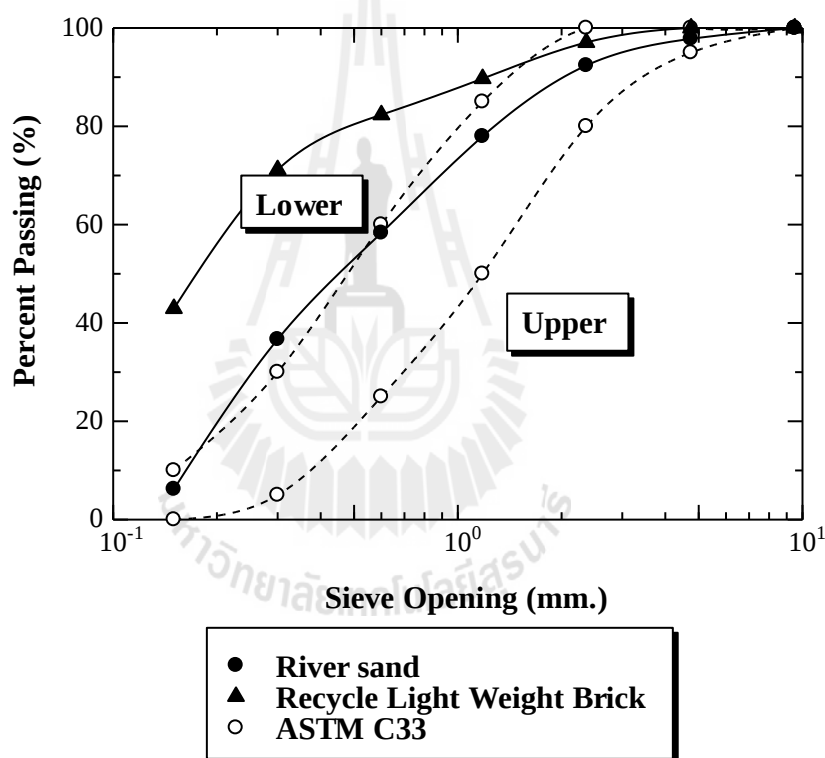
4.1.1 ลักษณะรูปร่างและการกระจายขนาดของมวลรวม



รูปที่ 4.1 A : มวลรวมละเอียดที่ใช้ทรายแม่น้ำ B : มวลรวมละเอียดที่ใช้เศษอิฐมวลเบา
C : มวลรวมหยาบที่ใช้หินธรรมชาติ E : มวลรวมหยาบที่ใช้เศษคอนกรีตที่มีกำลัง
อัด 240 กก/ชม² และ D : มวลรวมหยาบที่ใช้เศษคอนกรีตที่มีกำลังอัด 350 กก/ชม²

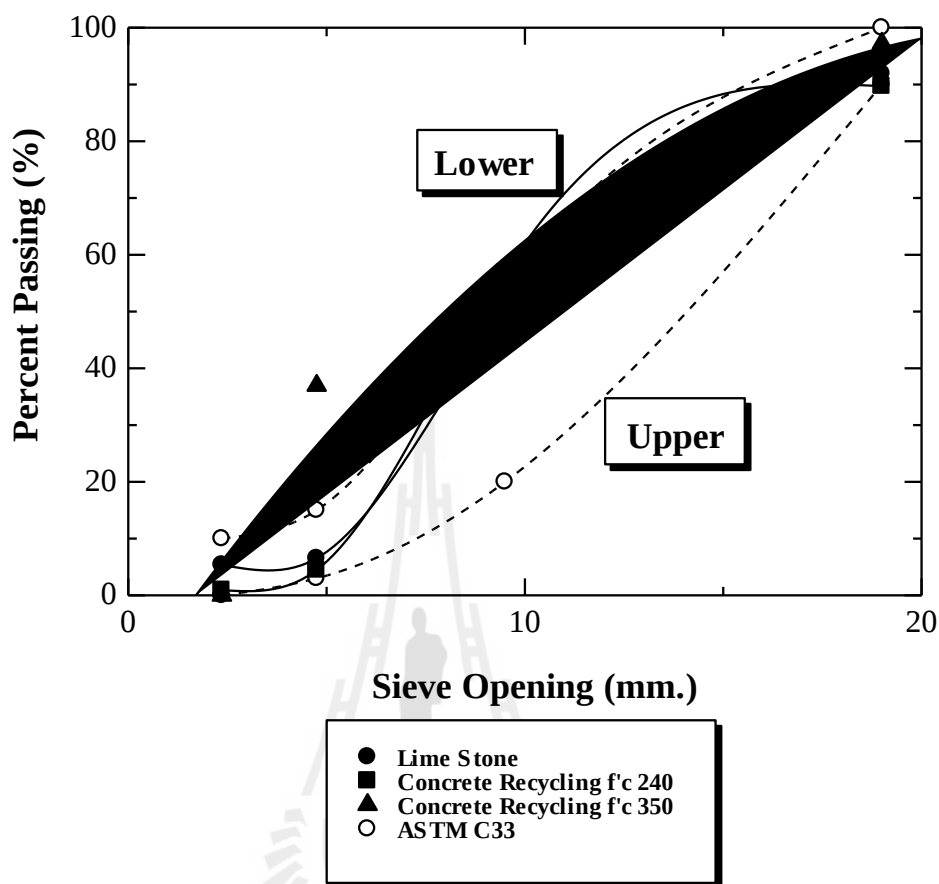
ดังภาพ 4.1 A และ B แสดงลักษณะรูปร่างของเศษอิฐมวลเบาและมวลรวมละเอียดจากธรรมชาติ (ทรายแม่น้ำ) เศษอิฐมวลเบามีความละเอียดสูง และมีขนาดเล็กกว่าทรายแม่น้ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากเศษอิฐมวลเบาประกอบด้วย ทรายละเอียด ซีเมนต์ ปูนขาว และขี้ขี้ ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้มีอนุภาคที่ละเอียดมาก จึงทำให้มีการดูดซึมน้ำสูงกว่าทรายแม่น้ำถึงร้อยละ 42 ค่าโมดูลัสความละเอียดของเศษอิฐมวลเบาและทรายแม่น้ำ มีค่าเท่ากับ 1.16 และ 2.30 รูปที่ 4.1 C D และ E แสดงลักษณะรูปร่างของหินปูนและเศษคอนกรีต เศษคอนกรีตมีลักษณะรูปร่างโดยทั่วไปใกล้เคียงกับหินปูนย่อย คือมีความเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน ผิวเศษคอนกรีตส่วนใหญ่จะมีมอร์ตาร์

เกาะอยู่ ตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเศษคอนกรีตมีค่าโมดูลัสความละเอียดใกล้เคียงกับหินปูนธรรมชาติ โดยโมดูลัสความละเอียดของหินปูน และเศษคอนกรีต 240 กก/ชม² (Cube) และ 350 กก/ชม² (Cylinder) มีค่าเท่ากับ 6.45 6.48 และ 6.12 ตามลำดับ รูปที่ 4.2 แสดงการกระจายขนาดทรายธรรมชาติและเศษอิฐมวลเบา เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 33 (American Society for Testing and Materials, 2001) ทรายแม่น้ำมีความละเอียดได้ตามมาตรฐาน ASTM C 33 ขณะที่ เศษอิฐมวลเบา มีขนาดเล็กกว่าทรายแม่น้ำมาก และไม่สอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM C 33 ทั้งนี้เพราะเศษอิฐมวลเบา มีความแข็งแรงน้อยและมีความพรุนสูงเมื่อถูกนำมาบดหรือทำลาย จึงได้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก



รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียดทั้ง 2 ชนิด เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 33

การกระจายขนาดของหินปูนธรรมชาติ และเศษคอนกรีตทั้ง 2 ชนิด (240 กก/ชม² (Cube) และ 350 กก/ชม² (Cylinder)) แสดงดังรูปที่ 4.3 เปรียบเทียบกับมาตรฐานของ ASTM C 33 ขนาดเฉลี่ย (Average size, D_{50}) ของเศษคอนกรีตมีค่าน้อยกว่าขนาดเฉลี่ยของหินปูนเล็กน้อย ทั้งหินปูนและเศษคอนกรีตมีการกระจายตัวใกล้เคียงและสอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM C 33 (American Society for Testing and Materials, 2001)



รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของมวลรวมหยาบ ทั้ง 3 ชนิด เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 33

4.1.2 ความถ่วงจำเพาะและอัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวม

มวลรวมละเอียดธรรมชาติ (ทรายแม่น้ำ) และเศษอิฐมวลเบามีความถ่วงจำเพาะที่สถานะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.60 และ 2.05 ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะของเศษอิฐมวลเบามีค่าน้อยกว่าทรายแม่น้ำ เพราะอิฐมวลเบามีส่วนประกอบ ทราย ซีเมนต์ ปูนขาว ยิปซัม และผงอลูมิเนียม ซึ่งแต่ละส่วนประกอบมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ หินปูนย่อยและเศษคอนกรีต 240 กก/ชม² (Cube) และ 350 กก/ชม² (Cylinder) มีความถ่วงจำเพาะที่สถานะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.65, 2.29 และ 2.43 ตามลำดับ ซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าที่ยึดเกาะที่ผิวของเศษคอนกรีตมีความพรุนและมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าหินปูนย่อย (Chen et al. 2003) ส่งผลให้เศษคอนกรีตมีค่าความถ่วงจำเพาะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hansen and Narud (1983) และ รักษ์ บูรณสิงค์ (2547)

4.1.3 หน่วยน้ำหนักของมวลรวมและช่องว่างระหว่างมวลรวม

หินปูนย่อยและเศษคอนกรีต 240 กก/ชม² (Cube) และ 350 กก/ชม² (Cylinder) มีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1586.48 กก/ม³ 1341.31 กก/ม³ และ 1343.05 กก/ม³ ตามลำดับ ขณะที่ทรายแม่น้ำและเศษอิฐมวลเบา มีค่าเท่ากับ 1671.157 กก/ม³ และ 1179.359 กก/ม³ ตามลำดับ เศษคอนกรีตมีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำกว่าหินปูนย่อยอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากความพรุนของซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ที่ยึดเกาะที่ผิวของเศษคอนกรีตมีน้ำหนักเบา ส่งผลให้น้ำหนักของเศษคอนกรีตลดลงเมื่อเทียบกับหินปูนย่อยที่ปริมาตรเท่ากัน ลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอนและเป็นเหลี่ยมมุมสูงทำให้เศษคอนกรีตมีปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมสูงกว่าหินปูนย่อย เศษคอนกรีต 240 กก/ชม² (Cube) และ 350 กก/ชม² (Cylinder) มีปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมประมาณร้อยละ 52.87, 67.46 และ 64.53 ตามลำดับ ทรายแม่น้ำและเศษอิฐมวลเบา มีปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมประมาณร้อยละ 36.44 และ 42.11 ตามลำดับ ค่าปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมของเศษคอนกรีตมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต ทั้งนี้เนื่องจากเศษคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากการย่อยด้วยแรงงานคน (ไม่ใช่เครื่องจักร) จึงมีเหลี่ยมและมุมมาก สุรศักดิ์ ภู่อันติพงษ์ (2545) พบว่ามวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมอยู่ในช่วงร้อยละ 34.21 ถึง 35.74 และ 39.99 ถึง 41.48 ตามลำดับ รัชบุรณสิงห์ (2547) พบว่ามวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมร้อยละ 35.88 และ 41.40 ตามลำดับ ปกป้อง รัตนชู (2551) พบว่ามวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมร้อยละ 40.40

4.1.4 ความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบ

เศษคอนกรีต 240 กก/ชม² (Cube) และ 350 กก/ชม² (Cylinder) มีค่าการสึกกร่อนที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องลอสแองเจลิส ตามมาตรฐาน ASTM C 131 (American Society for Testing and Materials, 2001) เท่ากับร้อยละ 39.70 และ 21.57 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tavakoli and Soroushian (1996) ที่พบว่ามวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าการสึกกร่อนอยู่ในช่วงร้อยละ 26.4 ถึง 41.7 โดยน้ำหนัก ขณะที่ การสึกกร่อนของหินปูนย่อยมีค่าประมาณร้อยละ 14.62 ความต้านทานต่อการสึกกร่อนที่สูงกว่าของเศษคอนกรีตมีสาเหตุมาจากความแข็งแรงที่ต่ำของซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ที่ยึดเกาะที่ผิวของเศษคอนกรีต เมื่อทำการทดสอบลอสแองเจลิส ซีเมนต์เพสต์จึงแตกออกจากเนื้อของมวลรวมหยาบและถูกบดเป็นผงได้ง่าย นอกจากนี้ เศษคอนกรีตยังผ่านกระบวนการย่อยมาแล้ว ซึ่งอาจส่งผลให้ความแข็งแรงของมวลรวมลดลง แต่อย่างไรก็ตาม ทั้งมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและหินปูนย่อยยังคงมีค่าการสึกกร่อนไม่เกินกว่ามาตรฐาน ASTM C 131 (American Society for Testing and

Materials, 2001) ที่กำหนดไว้สำหรับการผลิตคอนกรีต (ไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของมวลรวม)

4.2 กำลังอัดของคอนกรีต

4.2.1 กำลังต้านทานแรงอัดและร้อยละกำลังต้านทานแรงอัดอัดของคอนกรีตปกติ

ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดและร้อยละกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตปกติ ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานและหินปูนย่อยเป็นมวลรวม แสดงในตารางที่ 4.2 โดยสรุปได้ดังนี้

1. ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 คอนกรีตปกติมีกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 264, 317 และ 334 กก/ซม² ตามลำดับ
2. ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 คอนกรีตปกติมีกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 227, 274 และ 314 กก/ซม² ตามลำดับ
3. ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.6 คอนกรีตปกติมีกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 211, 249 และ 379 กก/ซม² ตามลำดับ

ผลการทดสอบพบว่าการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตปกติจะแปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้น (ก่อน 7 วัน) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยจะทำให้กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่สูง อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตตามอายุมีค่าประมาณคงที่สำหรับทุกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต (Nagaraj and Zahida Banu, 1996; Horpibulsuk et al., 2003, 2006, 2011a, b และ 2012) กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของการวิจัยนี้อยู่ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 (ดูตารางที่ 4.2)

ตารางที่ 4.2 กำลังต้านทานแรงอัดคอนกรีตที่แต่ละอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์และใช้มวลรวมจากธรรมชาติทั้งหมด

Concrete	Average Compressive Strength (kg / cm ²) / Normalized Compressive Strength (%)		
	7 - D	14 - D	28 - D
0.4_C_S	264 / 100	317 / 120	334 / 126
0.5_C_S	227 / 100	281 / 121	314 / 139
0.6_C_S	211 / 100	250 / 118	279 / 133

4.2.2 กำลังต้านทานแรงอัดและร้อยละกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ทราย

ธรรมชาติร่วมกับมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต

ตารางที่ 4.3 4.4 และ 4.5 แสดงผลทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด และเศษคอนกรีต 240 กก/ชม² (Cube) และ 350 กก/ชม² (Cylinder) เป็นมวลรวมหยาบ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง (0.4_C240_S) ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 213, 252 และ 270 กก/ชม² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 81, 80 และ 81 ของคอนกรีตปกติ (0.4_C_S)
2. ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง (0.5_C240_S) ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 177, 217 และ 240 กก/ชม² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 78, 79 และ 76 ของคอนกรีตปกติ (0.5_C_S)
3. ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.6 กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง (0.6_C240_S) ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 165, 198 และ 224 กก/ชม² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 78, 79 และ 80 ของคอนกรีตปกติ (0.6_C_S)
4. ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง (0.4_C350_S) ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 242, 290 และ 301 กก/ชม² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 92, 91 และ 90 ของคอนกรีตปกติ (0.4_C_S)
5. ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง (0.5_C350_S) ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 208, 249 และ 272 กก/ชม² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 92, 91 และ 87 ของคอนกรีตปกติ (0.5_C_S)

6. ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.6 กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง (0.6_C350_S) ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 186, 213 และ 233 กก/ซม² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 88 85 และ 83 ของคอนกรีตปกติ (0.6_C_S)

ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเป็นมวลรวมหยาบมีกำลังต้านทานแรงอัดทุกอายุบ่มต่ำกว่าคอนกรีตปกติ เนื่องจากซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าจากเศษคอนกรีตเดิมที่ยึดเกาะผิวของมวลรวมมีความแข็งแรงน้อยกว่าหินปูนย่อย ดังจะเห็นได้จากค่าต้านทานการสึกกร่อนของเศษคอนกรีต 240 กก/ซม² (Cube) 350 กก/ซม² (Cylinder) ที่เท่ากับร้อยละ 39.7 และ 21.57 ซึ่งสูงกว่าหินปูนย่อยร้อยละ 25.08 และ 6.95 ตามลำดับ นอกจากนี้ มวลรวมดังกล่าวยังมีความหนาแน่นและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมสูงกว่าหินปูนย่อยทำให้ต้องใช้เพสต์เพื่ออุดช่องว่างดังกล่าวมากขึ้น ผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่า กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีต 350 กก/ซม² มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบมาก ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.4 กำลังต้านทานแรงอัดคอนกรีตต่ออายุบ่ม 28 วัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้เศษคอนกรีต 350 กก/ซม² (Cylinder) เป็นมวลรวมหยาบนอกจากจะให้กำลังอัดของคอนกรีตที่สูงมากพอแล้ว ยังเป็นการประยุกต์ใช้วัสดุเหลือใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ตารางที่ 4.3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ $w/c = 0.4$

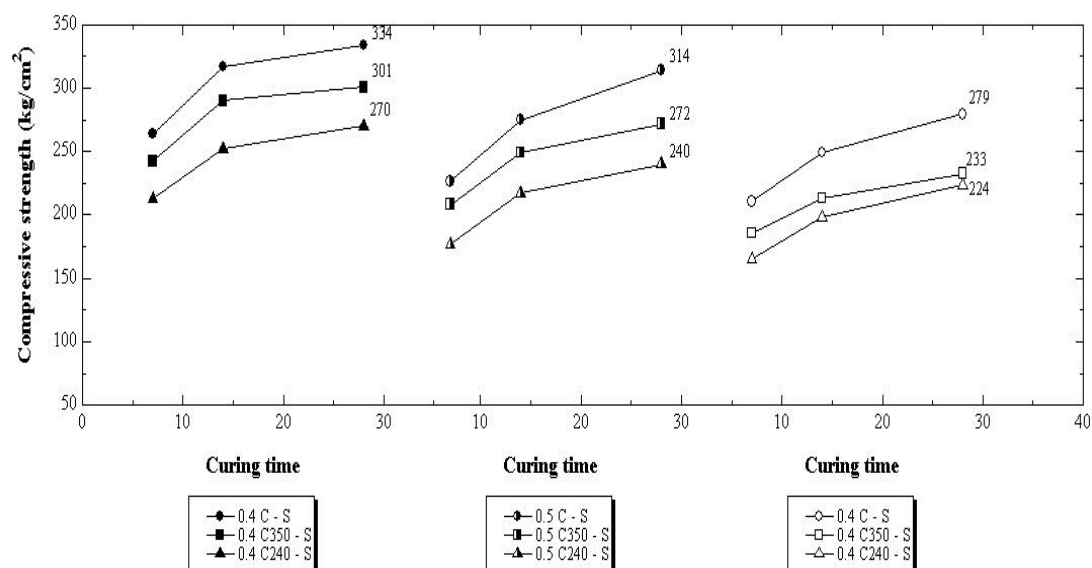
Concrete	Average Compressive Strength (kg / cm ²) / Normalized Compressive Strength (%)		
	7 - D	14 - D	28 - D
0.4_C_S	264 / 100	317 / 100	333 / 100
0.4_C240_S	213 / 81	252 / 80	270 / 81
0.4_C350_S	242 / 92	290 / 91	301 / 90

ตารางที่ 4.4 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ $w/c = 0.5$

Concrete	Average Compressive Strength (kg / cm ²) / Normalized Compressive Strength (%)		
	7 - D	14 - D	28 - D
0.5_C_S	227 / 100	275 / 100	314 / 100
0.5_C240_S	177 / 78	217 / 79	240 / 76
0.5_C350_S	208 / 92	249 / 91	272 / 87

ตารางที่ 4.5 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ $w/c = 0.6$

Concrete	Average Compressive Strength (kg / cm^2) / Normalized Compressive Strength (%)		
	7 - D	14 - D	28 - D
0.6_C_S	211 / 100	249 / 100	279 / 100
0.6_C240_S	165 / 78	198 / 79	224 / 80
0.6_C350_S	185 / 88	213 / 85	233 / 83



รูปที่ 4.4 กำลังต้านทานแรงอัดต่อเวลาของคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด และเศษคอนกรีต 240 กก/ชม² (Cube) และ 350 กก/ชม² (Cylinder) เป็นมวลรวมหยาบ

4.2.3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียดและใช้หินปูนย่อยและเศษคอนกรีตเป็นมวลรวมหยาบ

ตารางที่ 4.6 ถึง 4.8 แสดงผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียด ซึ่งสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1. ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง (0.4_C_RS) ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 111, 135 และ 143 กก/ชม² ตามลำดับ

2. ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง (0.5_C_RS) ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 91, 110 และ 117 กก/ซม² ตามลำดับ
3. ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.6 กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง (0.6_C_RS) ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 54, 63 และ 69 กก/ซม² ตามลำดับ
4. ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง (0.4_C240_RS) ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 92, 110 และ 120 กก/ซม² ตามลำดับ
5. ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง (0.5_C240_RS) ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 70, 87 และ 92 กก/ซม² ตามลำดับ
6. ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.6 กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง (0.6_C240_RS) ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 43, 53 และ 57 กก/ซม² ตามลำดับ
7. ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง (0.4_C350_RS) ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 102, 122 และ 131 กก/ซม² ตามลำดับ
8. ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง (0.5_C350_RS) ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 79, 98 และ 106 กก/ซม² ตามลำดับ
9. ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.6 กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง (0.6_C350_RS) ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 49, 57 และ 62 กก/ซม² ตามลำดับ

ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้เศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียดมีกำลังอัดทุกอายุบ่มต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียดมาก เนื่องจากเศษอิฐมวลเบามีความละเอียดมากกว่าแม่น้ำ และมีหน่วยน้ำหนักต่ำกว่าทรายแม่น้ำประมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาผสมทำคอนกรีตจึงมีหน่วยน้ำหนักที่ต่ำ คอนกรีตที่ใช้เศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียดมีน้ำหนักที่เบากว่าประมาณ 100 กก./ลบ.ม. กำลังต้านทานแรงอัดคอนกรีตที่ใช้เศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียดที่อายุ 28 วัน ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 (0.4_C_RS) จะต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด (0.4_C_S) ถึงร้อยละ 44 ที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 จะต่ำกว่าร้อยละ 41 และที่ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ 0.6 จะต่ำกว่าร้อยละ 27 โดยสรุปการนำเศษอิฐมวลเบามาใช้แทนทรายธรรมชาติจะช่วยลดน้ำหนักของคอนกรีตได้ แต่ก็มีข้อจำกัดด้วยกำลังต้านทานแรงอัดคอนกรีตที่จะต่ำกว่าถึงร้อยละ 27 ของคอนกรีตปกติ ในงานคอนกรีตที่ไม่รับแรงอัด เช่น อิฐบล็อกมวลรวมละเอียดรีไซเคิลอาจพิจารณานำมาใช้งานได้

ตารางที่ 4.6 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ $w/c = 0.4$

Concrete	Average Compressive Strength (kg / cm^2) / Normalized Compressive Strength (%)		
	7 - D	14 - D	28 - D
0.4_C_S	264 / 100	317 / 100	334 / 100
0.4_C_RS	118 / 45	142 / 45	151 / 45
0.4_C240_S	213 / 100	252 / 100	270 / 100
0.4_C240_RS	87 / 41	97 / 39	120 / 44
0.4_C350_S	242 / 100	290 / 100	301 / 100
0.4_C350_RS	102 / 40	122 / 35	131 / 43

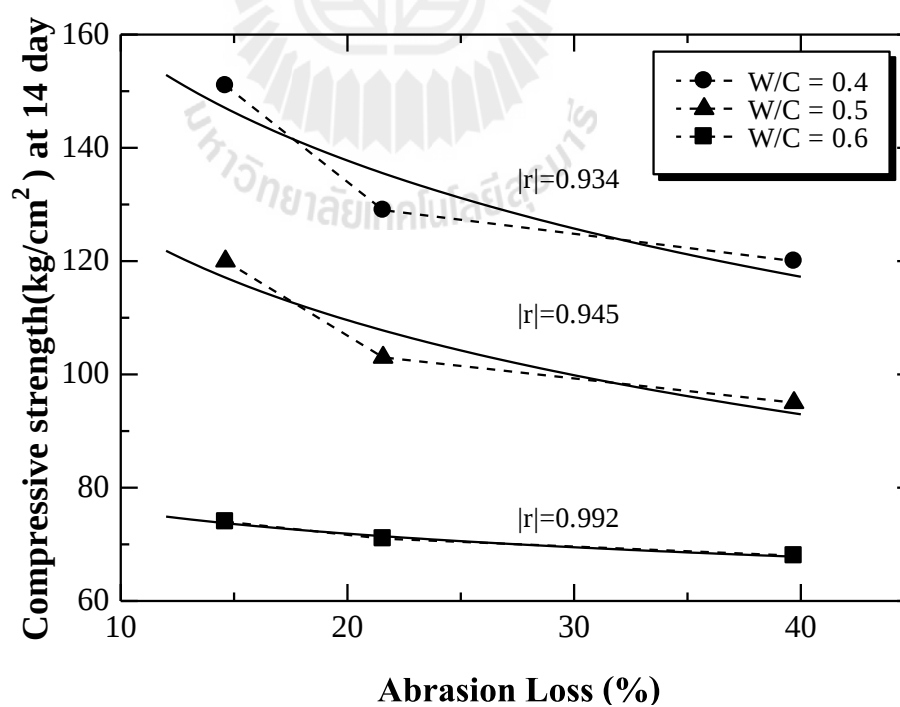
ตารางที่ 4.7 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ $w/c = 0.5$

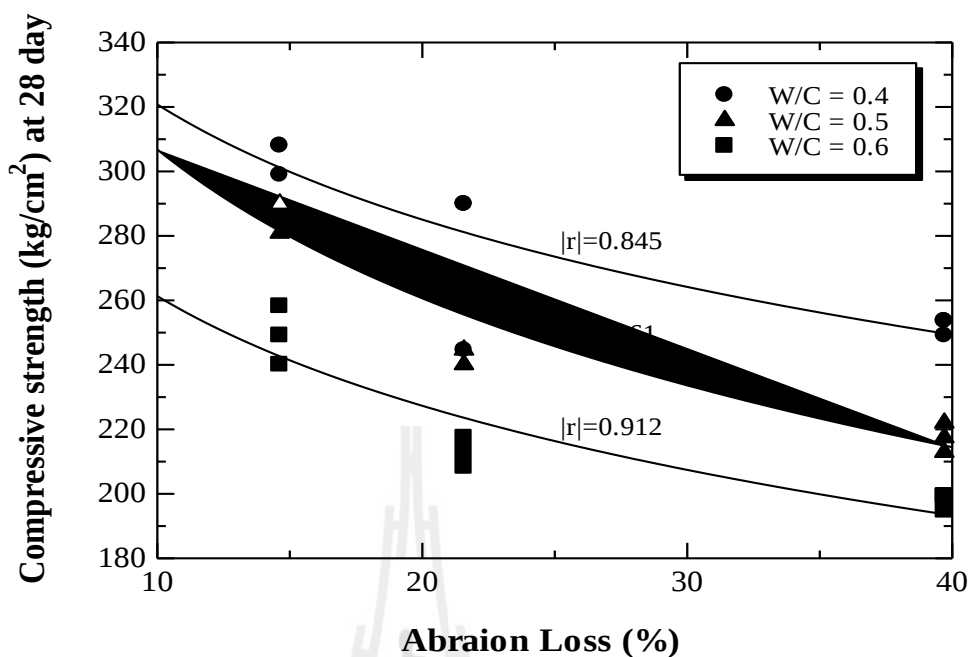
Concrete	Average Compressive Strength (kg / cm^2) / Normalized Compressive Strength (%)		
	7 - D	14 - D	28 - D
0.5_C_S	227 / 100	275 / 100	314 / 100
0.5_C_RS	91 / 40	116 / 42	120 / 38
0.5_C240_S	177 / 100	217 / 100	240 / 100
0.5_C240_RS	79 / 45	84 / 39	95 / 40
0.5_C350_S	208 / 100	249 / 100	272 / 100
0.5_C350_RS	84 / 40	92 / 37	103 / 38

ตารางที่ 4.8 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ $w/c = 0.6$

Concrete	Average Compressive Strength (kg / cm^2) / Normalized Compressive Strength (%)		
	7 - D	14 - D	28 - D
0.6_C_S	211 / 100	249 / 100	279 / 100
0.6_C_RS	43 / 20	56 / 22	60 / 22
0.6_C240_S	165 / 100	198 / 100	224 / 100
0.6_C240_RS	50 / 30	58 / 29	66 / 29
0.6_C350_S	186 / 100	213 / 100	233 / 100
0.6_C350_RS	52 / 28	60 / 28	72 / 31

4.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสึกหรอของมวลรวมหยาบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้มวลรวมละเอียดธรรมชาติ





รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสึกหรอของมวลรวมหยาบกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตโดยใช้มวลรวมละเอียดธรรมชาติของอายุ 14 และ 28 วัน

4.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการวิจัย

คอนกรีตเป็นวัสดุผสม (Composite material) ระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวม ดังนั้น กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตแปรผันตามความแข็งแรงของซีเมนต์เพสต์และมวลรวม ซีเมนต์เพสต์จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างมวลรวม โดยทำหน้าที่เป็นพันธะ (Cementation bond) เชื่อมจุดสัมผัสระหว่างมวลรวมหยาบ (Contact points) ความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสานแปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ขณะที่ ความแข็งแรงของมวลรวมหยาบแปรผันตามหินต้นกำเนิด การวิบัติของคอนกรีตอาจจะเกิดขึ้นตามแนวจุดสัมผัสหรือเกิดในเนื้อของมวลรวม สำหรับคอนกรีตกำลังอัดต่ำ (กำลังอัดน้อยกว่า 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) มวลรวมหยาบมักมีความแข็งแรงกว่าซีเมนต์เพสต์ ส่งผลให้การวิบัติมักเกิดตามแนวจุดสัมผัส นอกจากความแข็งแรงของซีเมนต์เพสต์แล้ว ความต้านทานแรงเฉือนที่ผิวของมวลรวมก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ควบคุมความแข็งแรงที่จุดสัมผัส ความต้านทานแรงเฉือนที่ผิวของมวลรวมหยาบไม่สามารถประมาณได้จากกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตก่อนถูกบดย่อย (240 และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) เนื่องจากความรุนแรงของการย่อยคอนกรีตไม่สามารถระบุได้จากค่ากำลังต้านทานแรงอัดเริ่มต้น

ในทางปฏิบัติ ความต้านทานแรงเฉือนที่ผิวของมวลรวมหยาบอาจสามารถประมาณได้จากค่าการสึกหรอ รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตและค่าการสึกหรอ ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ค่าหนึ่ง กำลังอัดของคอนกรีตแปรผันตามค่าการสึกหรอ กำลังต้านทานแรงอัดมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่าการสึกหรอในฟังก์ชัน Logarithm สำหรับทุกอายุบ่ม ความสัมพันธ์นี้สามารถใช้ในการประมาณกำลังอัดของคอนกรีตที่มีค่าการสึกหรอต่างๆ นอกจากค่าการสึกหรอแล้ว อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ก็มีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต ที่ค่าการสึกหรอเดียวกัน กำลังอัดของคอนกรีตที่มีค่าลดลงอย่างมากตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

ที่ค่าการสึกหรอและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ค่าหนึ่ง อัตราส่วนระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเป็นมวลรวมหยาบต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้หินปูนธรรมชาติเป็นมวลรวมหยาบมีค่าประมาณคงที่สำหรับทุกอายุบ่ม (ตารางที่ 3.3 ถึง 3.5) ทั้งนี้เนื่องจากกำลังของพันธะเชื่อมประสานที่เพิ่มขึ้นตามอายุต่างก็แปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมทั้งสองประเภท หากเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์อาจเขียนได้ดังนี้

$$\text{Strength} = \text{Strength due to abrasion} + \text{Time dependent strength due to w/c}$$

โดยสรุป อัตราส่วนระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบหินปูนธรรมชาติแปรผันตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และค่าการสึกหรอ โดยแทบจะไม่ขึ้นอยู่กับอายุบ่ม

มวลรวมละเอียดมีหน้าที่อุดช่องว่างระหว่างมวลรวม ทำให้คอนกรีตมีความแน่นและมีกำลังต้านทานแรงอัดสูง แต่อย่างไรก็ตาม หากใช้มวลรวมละเอียดที่มีความแข็งแรงต่ำและมีขนาดเล็กเกินไป (เกินกว่ามาตรฐานของ ASTM) ดังเช่นในงานวิจัยนี้ (ใช้เศษอิฐมวลเบา) จะมีผลทางลบต่อกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต มวลรวมละเอียดที่มีขนาดเล็กเกินข้อกำหนดแม้ว่าจะสามารถอุดช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบได้ แต่ด้วยพื้นผิวที่มากเกินไป มวลรวมละเอียดจึงมีความต้องการปริมาณพันธะเชื่อมประสานที่มาก (จุดสัมผัสมาก) เพื่อเชื่อมประสานมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดเข้าด้วยกัน ที่อายุบ่มและอัตราค่าการสึกหรอค่าหนึ่ง อัตราส่วนระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียดและกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียดแปรผันตรงกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เนื่องจากเป็นตัวแปรที่ควบคุมความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสานที่จุดสัมผัส (ตารางที่ 3.6 ถึง 3.8) สิ่งที่น่าสนใจมากกว่านั้นคือ ค่าการสึกหรอของมวลรวมหยาบเป็นตัวส่งเสริมอิทธิพลลบของมวลรวมละเอียด อัตราการสึกหรอที่สูง อัตราส่วนระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียดและกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียดยังมีค่าลดลง เช่นเดียวกันกับการใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดธรรมชาติ พันธะเชื่อมประสานที่จุดสัมผัสแปรผันตาม

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ด้วยเหตุนี้เอง ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ค่าหนึ่ง อัตราส่วนระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียดและกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด จึงมีค่าคงที่ สำหรับทุกอายุบ่ม



บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาลอคงงานวิจัยนี้ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ค่าความถ่วงจำเพาะ ของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษอิฐมวลเบา มี หน่วยน้ำหนักในสถานะอิ่มตัวผิวแห้งต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ และมีการดูดซึมน้ำสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ

5.1.2 ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมี หน่วยน้ำหนักในสถานะอิ่มตัวผิวแห้งต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ มีการดูดซึมน้ำสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ และมีการสึกหรอสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ

5.1.3 กำลังต้านทานแรงอัด การใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตจะมีที่ต่ำกว่ามวลจากธรรมชาติเป็นเพราะ ซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าจากเศษคอนกรีตเดิมที่ยึดเกาะผิวของมวลรวมมีความแข็งแรงน้อยกว่าหินปูนย่อย โดยเมื่อพิจารณาจากค่าต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมที่ทดสอบด้วยเครื่องลอสแองเจลิส และมวลรวมดังกล่าวยังมีความหนาแน่นและปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมสูงกว่าหินปูนย่อยทำให้ต้องใช้เพสต์เพื่ออุดช่องว่างดังกล่าวมากขึ้น อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมดก็ยังมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ใกล้เคียงกับหินปูนย่อยโดยเฉพาะจากการย่อยเศษคอนกรีต 350 กก/ชม² (Cylinder)

5.1.4 ความสามารถต้านทาน การนำเศษอิฐมวลเบามาใช้เป็นมวลรวมละเอียดจะทำให้ความสามารถต้านทานแรงอัดลดลงมาก เป็นเพราะว่ามวลรวมละเอียดที่ได้จากเศษอิฐมวลเบา มีขนาดที่เล็กกว่ามวลรวมธรรมชาติและมีพื้นผิวที่มากกว่ามวลรวมละเอียดธรรมชาติ จึงทำให้มีความต้องการซีเมนต์ที่มากเพื่อไปจับและเกาะติดกับหินทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ทำให้ซีเมนต์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวและช่องว่างที่เป็นรอยต่อของหินน้อยลงเพราะซีเมนต์บางส่วนต้องไปทำหน้าที่ช่วยยึดติดกับเศษอิฐมวลเบา

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการวิจัยครั้งนี้ศึกษาการรับกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตของคอนกรีตมวลรวมธรรมดาและมวลรวมรีไซเคิล แต่ก็มีควรเก็บอายุมากกว่านี้ เพราะจะทำให้เห็นถึงแนวโน้มของการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดที่อายุมากกว่านี้ ว่ามีผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดคอนกรีตมากน้อยเพียงใด

5.2.2 ในการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้เครื่องที่เป็นเครื่องกดที่เป็นระบบเข็มจึงอาจทำให้มีการผิดพลาดจากสายตาที่ทำการอ่านค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตผิดพลาดบ้างเล็กน้อย ควรจะใช้จะเครื่องมือที่มีตัวเลขดิจิทัลในการอ่านค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตมากกว่าจะทำให้ไม่เกิดค่าที่ผิดพลาดจะการอ่านค่า



รายการอ้างอิง

- Hansen, T.C. and Narud, H., (1983), **Strength of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate**, Concrete International – Design and Construction, Vol. 5, No.1, pp. 79-83.
- Hasaba, S., Kawamura, M. and Toriik, K., (1981), **Drying Shrinkage and Durability of Concrete Made of Recycled Concrete Aggregates**, Japan Concrete Institute, pp. 55-60.
- Narud, H., (1981), Recycled Concrete in Low-Strength Concrete with Fly Ash, **Technical Report 110/82**, Building Materials Laboratory, Technical University of Denmark, Lyngby.
- Revindrarajah, R.S. and Tam, T.C. (1985), Properties of Concrete Made with Crushed Concrete as Coarse Aggregate, **Magazine of Concrete Research**, Vol.37, p.130.
- Kikuchi, M., Mukai, T. and Kozumi, H., **Properties of Concrete Products Containing Recycled Aggregate**, Ibid. 135, pp. 595-604.
- Kakizaki, M., Harada, M. and Motoyasu, H., **Manufacturing of Recovered Aggregate Through Disposal and Recovery of Demolished Concrete Structure**, Ibid.135, pp.699-708.
- Mukai, T., **Study on the Properties of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate**. Cement Association of Japan, 32nd Review.
- Ikeda, I., Yamane, S. and Sakamoto, A., **Strength of Concrete Containing Recycled Aggregate**, Ibid. 135, pp.585-594.
- Hansen, T.C. and Marga, M., **Strength of Recycled Concrete Made From Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregate**, Ibid. 135, pp.605-612.
- Yanagi, K., et al., “Effect of Impurities”, in **Recycled Coarse Aggregate upon a Few Properties of the Concrete Product with It**, Ibid. 135, pp.613-620.
- B.S.C.J., (1978), “Study on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete, Buiding Contractors Society of Japan, Committee on Disposal and reuse of Construction Waste,”**Summary in Concrete Journal**, Japan, Vol.16, No.7, pp.18-31.

- American Society for Testing and Materials, (1995), ASTM C 128-93 : Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, in **1995 Annual Book of ASTM Standards**, Vol.04.02, Philadelphia, ASTM, pp.69-73.
- CPAC คอนกรีตเทคโนโลยี, (2000), **คู่มือการทดสอบ หิน ทราย และคอนกรีต (C)**, 101 หน้า.
- P.C. Kreijger, (1983), **Hergebruikvan Bouw-en Sloopafval als Toeslagmaterial in Beton**, Theindhoven afdeling Bouwkunde, Rapport M83-1.
- Nik. D. Oikonomou, (2005), Recycled Concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites**, Vol.27, p.p. 315 -318
- B.S.C.J., (1977), **Propose Standard for the Use of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete**, Building Contractors Society of Japan. Committee on Disposal and Reuse of Construction Waste.
- American Society for Testing and Materials, (1995) ,ASTM C 33-93 : Standard Specification for Concrete Aggregates, in **1995 Annual Book of ASTM Standards**, Vol.04.02, Philadelphia, ASTM, pp.10-16.
- Yoshikane, T., (1995), Present Status of Recycling Waste Cement Concrete in Japan.,**Private Communication Research Laboratory**, Taiyu Kensetsu Co.Ltd., Japan.
- Kashino, N. and Takahashi, Y., **Experimental Studies on Placement of Recycled Aggregate Concrete**, Ibid, Ref 135, pp.557-564.
- Kawakami M., Wada S. and Sazukawa K., (1989), Effect of Chemical Admixtures on Collodial Underwater Concrete, **Superplasticizer-Third International Conference**, Ottawa, Canada, SP-119, ACI, pp. 493-516.
- L.Ch., (1991), **Influence of Aggregate Content on Strengths and Workabilities of High-Strength Concrete**, Master of Engineering Thesis, Civil Engineering Program, Asian Institute of Technology, p.109.
- Buck, A.D., (1973), **Recycled Concrete**, Highway Research Record, No.430, pp. 1-8.
- Kasai, Y., and Fujii, (1989), **Demolition and Reuse of Concrete and Masonry**, Concrete International, Vol.11, No.3, pp. 24-28.
- Rasheeduzzafar, and Khan, A., (1984), Recycled Concrete a Source of New Aggregate, **Cement Concrete and Aggregates (ASTM)**, Vol.6, No.1, pp. 17-27.

- Malhotra, V.M., 1976, "Use of Recycled Concrete as a New Aggregate", **Canada Centre for Mineral and Energy Technology**, Ottawa, Canada, pp.76-78.
- Soshiroda, T., (1983), Recycled Concrete, **Proceedings 9th Congress of CIB**, Stockholm.
- รัชวาลย์ เศรษฐบุตร, (2540), **คอนกรีตเทคโนโลยี**, พิมพ์ครั้งที่ 4, บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม.
- Nixon, P.J., (1997), Recycled Concrete as an aggregate for Concrete, **Material and Structures (RILEM)**, Vol.65, pp.371-378
- Sayamipuk, S., (1995), **Use of Rubbles as Coarse Aggregate in Concrete Containing fly Ash and Superplasticizer**, Master of Engineering Thesis, Civil Engineering Program, Asian Institute of Technology, p. 106.
- Turanli L., (1993), **Turkish Cham**, of CE., Technical Congress Declarations Book (in urkish), pp.19-132 .
- American Society for Testing and Materials, (1995), ASTM C 127-88 : Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate, in **1995 Annual Book of ASTM Standards**, Vol.04.02, Philadelphia, ASTM, pp.64-68.
- TopÇu I.B. and Sengel S., **Submitted to J**, Osmangazi Unity, Eng. & Arch. Fac.
- American Society for Testing and materials, (1995), "ASTM C 136-95a : Standard Test Method for Seive Analysis of Fine and Coarse Aggregate," in **1995 Annual Book of ASTM Standards**, Vol.04.02, Philadelphia, ASTM, pp.78-82.
- American Society for Testing and Materials, (1995), "ASTM C 131-89 : Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine," in **1995 Annual Book of ASTM Standards**, Vol.04.02, Philadelphia, ASTM, pp.74-77.
- สุรศักดิ์ ภู่อันติพงษ์, (2545), **การศึกษาคอนกรีตที่ถูกทำลายมาใช้ทดแทนมวลรวมในคอนกรีต**. วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- 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.
- Tangchirapat, W., Khamklai, S. and Jaturapitakkul, C. (2012), “Use of ground palm oil fuel ash to improve strength, sulfate resistance, and water permeability of concrete containing high amount of recycled aggregates”, *Materials and Design*, Vol.41, pp.150-157.
- มาตรฐานงานช่างกรรมโยธาธิการ (มยผ.) ปี 2538
- Nagaraj, T.S. & Zahida Banu. 1996. Generalization of Abrams’ law Cement and Concrete Research Journal, Pergamon press, USA. 26(6):933-942.
- Horpibulsuk, S.**, Miura, N., and Nagaraj, T.S. (2003), “Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams’ law as a basis”, *Geotechnique*, Vol.53, No.4, pp.439-444.
- Horpibulsuk, S., Katkan, W., Sirilerdwattana, W., and Rachan, R. (2006), “Strength development in cement stabilized low plasticity and coarse grained soils : Laboratory and field study”, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.3, pp.351-366.
- Horpibulsuk, S.**, Rachan, R., Suddeepong, A., and Chinkulkijniwat, A. (2011b), “Strength development in cement admixed Bangkok clay: laboratory and field investigations”, *Soils and Foundations*, Vol.51, No.2, pp.239-251.
- Horpibulsuk, S.**, Rachan, R., and Suddeepong, A. (2011a), “Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay”, *Construction and Building Materials*, Vol.25, No.4, pp.1521-1531.
- Horpibulsuk, S.**, Phochan, W., Suddeepong, A., Chinkulkijniwat, A. and Liu, M.D. (2012), “Strength development in blended cement admixed saline clay”, *Applied Clay Science*, Vol.55, No.1, pp.44-52.

ภาคผนวก ก

ตารางและรูปแสดงคุณสมบัติจำเพาะของมวลรวมธรรมชาติ มวลรวมละเอียดที่
ได้จากการย่อยอิฐมวลเบาและมวลรวมหยาบที่ได้จากการการย่อย
เศษคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ ก.1 ค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของทรายแม่น้ำ

Materials Identification	Sample 1	Sample 2	Average
Weight of Flask + Water, B (g)	653.12	654.87	
Weight of Sand in SSD , S (g)	500.21	500.11	
Weight of Flask+Water+Sand , C (g)	962.45	961.51	
Weight of Sand in Oven-Dry , A (g)	493.40	492.38	
Bulk Specific Gravity (Oven-Dry) : $A/(B+S-C)$	2.58	2.54	2.56
Bulk Specific Gravity (SSD) : $S/(B+S-C)$	2.62	2.58	2.60
Apparent Specific Gravity : $A/(A+B-C)$	2.68	2.65	2.67
Absorption : $(S-A)/A \times 100$ (%)	1.38	1.57	1.48

ตารางที่ ก.2 ค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการการย่อยอิฐมวลเบา

Materials Identification	Sample 1	Sample 2	Average
Weight of Flask + Water, B (g)	653.10	654.75	
Weight of Sand in SSD , S (g)	500.00	500.00	
Weight of Flask+Water+Sand , C (g)	908.55	910.51	
Weight of Sand in Oven-Dry , A (g)	350.00	349.50	
Bulk Specific Gravity (Oven-Dry) : $A/(B+S-C)$	1.43	1.43	1.43
Bulk Specific Gravity (SSD) : $A/(B+S-C)$	2.04	2.05	2.05
Apparent Specific Gravity : $A/(A+B-C)$	3.70	3.73	3.72
Absorption : $(S-A)/A \times 100$ (%)	42.86	43.06	42.96

ตารางที่ ก.3 ค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหินธรรมชาติ

Materials Identification	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Average
Weight of Limestone in SSD , B (kg)	3.00	2.93	2.93	
Weight of Limestone in Water , C (kg)	1.87	1.84	1.84	
Weight of Limestone in Oven-Dry , A (kg)	3.00	2.87	2.86	
Bulk Specific Gravity (Oven-Dry) : $A/(B - C)$	2.66	2.65	2.64	2.65
Bulk Specific Gravity (SSD) : $B/(B - C)$	3.38	3.29	3.31	3.33
Apparent Specific Gravity : $A/(A+B - C)$	8.74	13.24	12.73	11.57
Absorption : $(B-A)/A \times 100$ (%)	0.04	2.03	2.25	1.44

ตารางที่ ก.4 ค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบที่ได้จากการการย่อยเศษ
คอนกรีต 240 ksc (Cube)

Materials Identification	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Average
Weight of Limestone in SSD , B (kg)	2.95	3.00	3.00	
Weight of Limestone in Water , C (kg)	1.72	1.75	1.69	
Weight of Limestone in Oven-Dry , A (kg)	2.88	2.96	2.86	
Bulk Specific Gravity (Oven-Dry) : $A/(B - C)$	2.33	2.36	2.19	2.29
Bulk Specific Gravity (SSD) : $B/(B - C)$	3.80	3.85	4.39	4.02
Apparent Specific Gravity : $A/(A+B - C)$	5.22	4.93	4.26	4.80
Absorption : $(B-A)/A \times 100$ (%)	2.51	1.44	4.78	2.91

ตารางที่ ก.5 ค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหายาบที่ได้จากการการย่อยเศษ

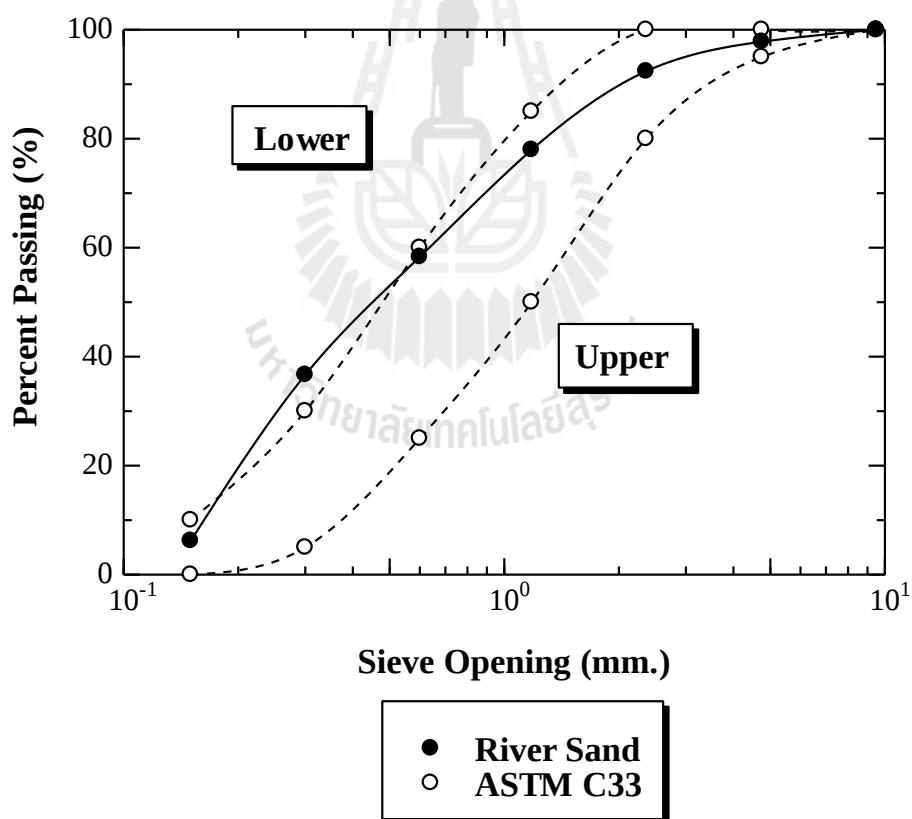
คอนกรีต 350 ksc (Cube)

Materials Identification	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Average
Weight of Limestone in SSD , B (kg)	3.00	3.00	3.00	
Weight of Limestone in Water , C (kg)	1.79	1.78	1.77	
Weight of Limestone in Oven-Dry , A (kg)	2.94	2.98	2.96	
Bulk Specific Gravity (Oven-Dry) : $A/(B - C)$	2.43	2.43	2.42	2.43
Bulk Specific Gravity (SSD) : $B/(B - C)$	3.80	3.70	3.76	3.75
Apparent Specific Gravity : $A/(A+B-C)$	5.70	5.47	5.44	5.53
Absorption : $(B-A)/A \times 100 (\%)$	1.99	0.69	1.31	1.33



ตารางที่ ก.6 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียดที่ได้จากทรายแม่น้ำ

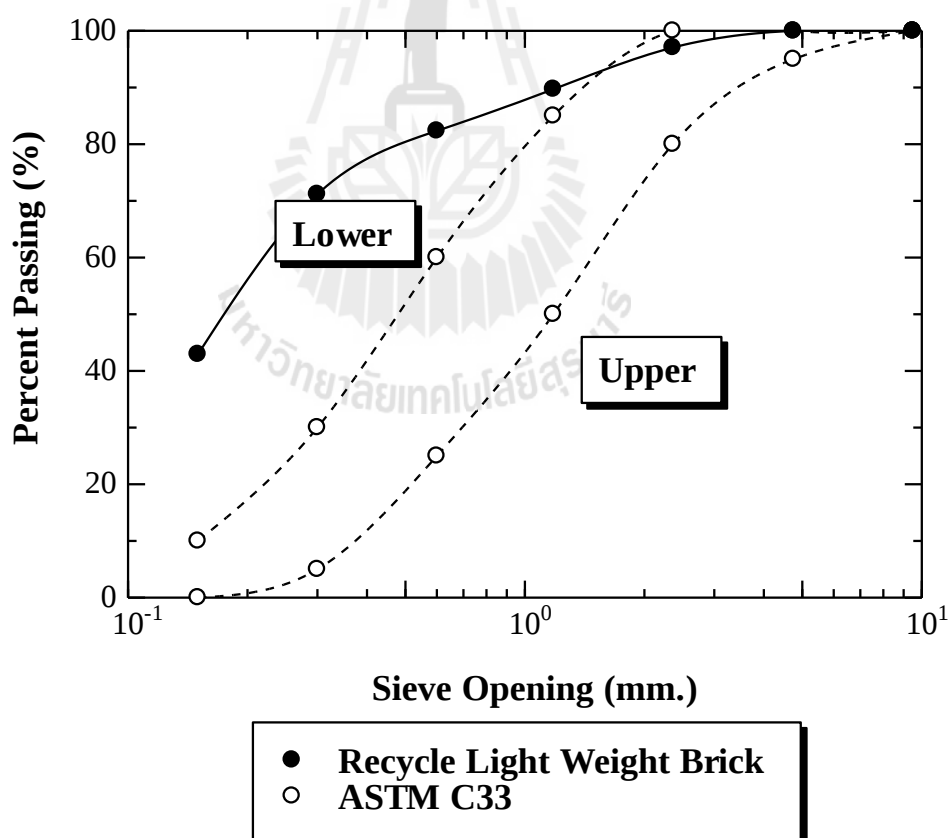
Sieve No.	Sieve Opening (mm.)	Sieve Weight (g)	Sieve and Fine Agg. (g)	Fine Agg. Retained (%)	Percent Retined (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Passing (%)
#4	4.75	0.54	0.55	0.01	2.20	2.20	97.80
#8	2.36	0.50	0.53	0.03	5.41	7.62	92.38
#16	1.18	0.46	0.53	0.07	14.43	22.04	77.96
#30	0.60	0.43	0.53	0.10	19.64	41.68	58.32
#50	0.30	0.39	0.50	0.11	21.64	63.33	36.67
#100	0.15	0.38	0.53	0.15	30.46	93.79	6.21
pan	-	0.53	0.56	0.03	6.21	-	0.00
Sum				0.499	100.000	230.661	
Fineness Modulus =				2.30			



รูปที่ ก.6 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียดที่ได้จากทรายแม่น้ำ

ตารางที่ ก.7 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษอิฐมวลเบา

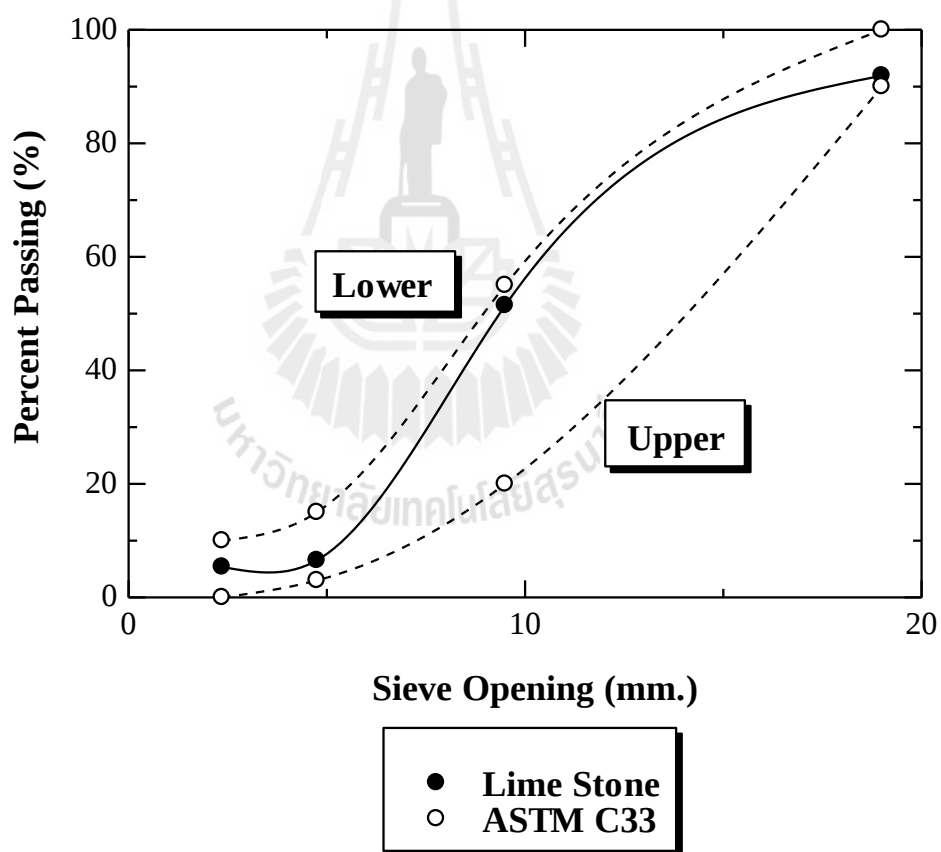
Sieve No.	Sieve Opening (mm.)	Sieve Weight (g)	Sieve and Fine Agg. (g)	Fine Agg. Retained (%)	Percent Retined (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Passing (%)
#4	4.75	0.54	0.54	0.00	0.00	0.00	100.00
#8	2.36	0.51	0.52	0.01	2.94	2.94	97.06
#16	1.18	0.46	0.49	0.03	7.35	10.29	89.71
#30	0.60	0.43	0.46	0.03	7.35	17.65	82.35
#50	0.30	0.39	0.43	0.04	11.18	28.82	71.18
#100	0.15	0.38	0.47	0.10	28.24	57.06	42.94
pan	-	0.53	0.68	0.15	42.94	-	0.00
Sum				0.340	100.000	116.765	
Fineness Modulus				= 1.16			



รูปที่ ก.7 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษอิฐมวลเบา

ตารางที่ ก.8 การกระจายตัวของหินธรรมชาติ

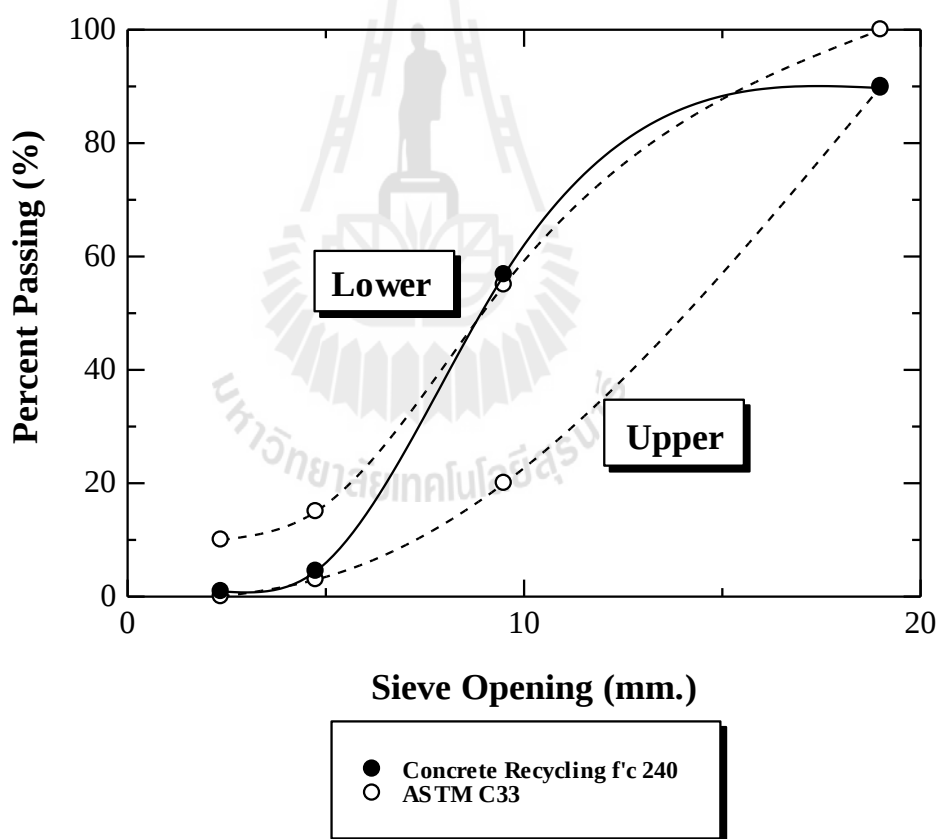
Sieve No.	Sieve Opening (mm.)	Sieve Weight (g)	Sieve and Fine Agg. (g)	Line Stone Retained (g)	Percent Retined (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Passing (%)
3/4"	19.00	0.64	0.76	0.12	8.08	8.08	91.92
3/8"	9.50	0.72	1.32	0.60	40.46	48.55	51.45
#4	4.75	0.74	1.41	0.67	44.93	93.47	6.53
#8	2.36	0.52	0.54	0.02	1.16	94.63	5.37
pan	-	0.49	0.57	0.08	5.37	-	0.00
Sum				1.48	100.00	244.73	
Fineness Modulus = 6.45							



รูปที่ ก.8 การกระจายตัวของหินธรรมชาติ

ตารางที่ ก.9 การกระจายตัวของมวลรวมหายาที่ได้จากการการย่อยเศษคอนกรีต 240 ksc (Cube)

Sieve No.	Sieve Opening (mm.)	Sieve Weight (g)	Sieve and Fine Agg. (g)	Agg. Retained (%)	Percent Retined (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Passing (%)
3/4"	19.00	0.64	0.75	0.11	10.28	10.28	89.72
3/8"	9.50	0.72	1.07	0.35	32.91	43.19	56.81
#4	4.75	0.74	1.30	0.56	52.33	95.52	4.48
#8	2.36	0.52	0.56	0.04	3.55	99.08	0.92
pan	-	0.49	0.50	0.01	0.92	-	0.00
Sum				1.07	100.00	248.07	
Fineness Modulus = 6.48							

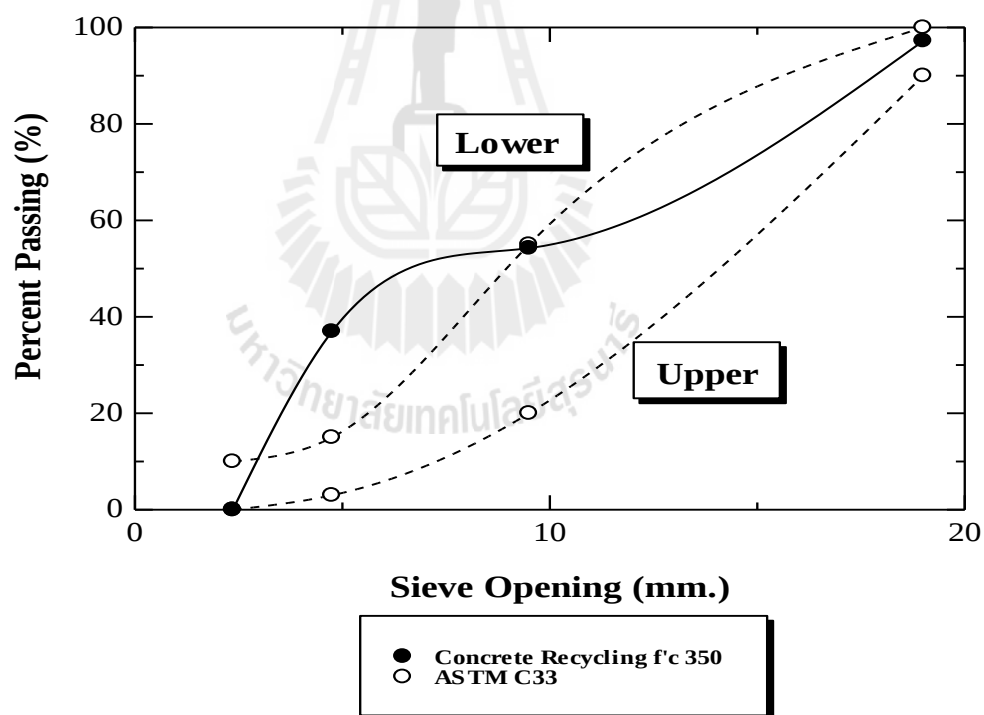


รูปที่ ก.9 การกระจายตัวของมวลรวมหายาที่ได้จากการการย่อยเศษคอนกรีต 240 ksc (Cube)

ตารางที่ ก.10 การกระจายตัวของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต 350 ksc

(Cylindrical)

Sieve No.	Sieve Opening (mm.)	Sieve Weight (g)	Sieve and Fine Agg. (g)	Fine Agg. Retained (%)	Percent Retined (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Passing (%)
3/4"	19.00	0.64	0.68	0.04	2.76	2.76	97.24
3/8"	9.50	0.72	1.42	0.70	42.99	45.75	54.25
#4	4.75	0.74	1.03	0.28	17.28	63.03	36.97
#8	2.36	0.52	1.13	0.60	36.97	100.00	0.00
pan	-	0.50	0.50	0.00	0.00	-	0.00
Sum				1.63	100.00	211.54	
Fineness Modulus = 6.12							



รูปที่ ก.10 การกระจายตัวของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต 350 ksc

(Cylindrical)

ตารางที่ ก.11 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมละเอียดของทรายแม่น้ำ

Materials Identification	Sample 1	Sample 2	Average
Weight of Measuring Cylinder (kg)	7.550	7.530	
Weight of Measuring Cylinder + Water (kg)	21.950	22.000	
Temperature of Water ($^{\circ}\text{C}$)	28	28	
Unit Weight of water (kg/l)	0.997	0.997	
Weight of water (kg)	14.400	14.470	
Volume of Measuring Cylinder (m^3)	0.01445	0.01452	
Weight of Measuring Cylinder + Sand (kg)	31.333	31.457	
Weight of Sand (kg)	23.783	23.927	
Unit Weight of Sand , M (kg/m^3)	1645.785	1647.785	1646.785
Water Absorption , A (%)	1.480	1.480	
Bulkspecific Gravity (Oven-Dry) , s	2.600	2.600	
Unit Weight in SSd condition : $M[1+(A/100)]$, kg/m^3	1670.143	1672.172	1671.157
Void Content : $100[(S \times W) - M] / (S \times W)$, (%)	36.478	36.401	36.440

ตารางที่ ก.12 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษอิฐ

มวลเบ

Materials Identification	Sample 1	Sample 2	Average
Weight of Measuring Cylinder (kg)	7.550	7.550	
Weight of Measuring Cylinder + Water (kg)	21.950	22.000	
Temperature of Water ($^{\circ}\text{C}$)	28	28	
Unit Weight of water (kg/l)	0.997	0.997	
Weight of water (kg)	14.400	14.450	
Volume of Measuring Cylinder (m^3)	0.01445	0.01450	
Weight of Measuring Cylinder + Sand (kg)	19.467	19.517	
Weight of Sand (kg)	11.917	11.967	
Unit Weight of Sand , M (kg/m^3)	824.654	825.261	824.958
Water Absorption , A (%)	42.960	42.960	
Bulkspecific Gravity (Oven-Dry) , s	1.430	1.430	
Unit Weight in SSd condition : $M[1+(A/100)]$, kg/m^3	1178.925	1179.793	1179.359
Void Content : $100[(S \times W) - M] / (S \times W)$, (%)	42.129	42.087	42.108

ตารางที่ ก.13 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบของหินธรรมชาติ

Materials Identification	Sample 1	Sample 2	Average
Weight of Measuring Cylinder (kg)	7.550	7.550	
Weight of Measuring Cylinder + Water (kg)	21.950	22.000	
Temperature of Water ($^{\circ}\text{C}$)	28	28	
Unit Weight of water (kg/l)	0.997	0.997	
Weight of water (kg)	14.400	14.450	
Volume of Measuring Cylinder (m^3)	0.01445	0.01450	
Weight of Measuring Cylinder + Sand (kg)	30.162	30.217	
Weight of Sand (kg)	22.612	22.667	
Unit Weight of Sand , M (kg/m^3)	1564.773	1563.148	1563.961
Water Absorption , A (%)	1.440	1.440	
Bulkspecific Gravity (Oven-Dry) , s	3.330	3.330	
Unit Weight in SSd condition : $M[1+(A/100)]$, kg/m^3	1587.306	1585.657	1586.482
Void Content : $100[(S \times W) - M] / (S \times W)$, (%)	52.845	52.894	52.869

ตารางที่ ก.13 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบที่ได้จากการเศษคอนกรีต

240 ksc (Cube)

Materials Identification	Sample 1	Sample 2	Average
Weight of Measuring Cylinder (kg)	7.550	7.550	
Weight of Measuring Cylinder + Water (kg)	21.950	22.000	
Temperature of Water ($^{\circ}\text{C}$)	28	28	
Unit Weight of water (kg/l)	0.997	0.997	
Weight of water (kg)	14.400	14.450	
Volume of Measuring Cylinder (m^3)	0.01445	0.01450	
Weight of Measuring Cylinder + Sand (kg)	26.373	26.462	
Weight of Sand (kg)	18.823	18.912	
Unit Weight of Sand , M (kg/m^3)	1302.549	1304.214	1303.382
Water Absorption , A (%)	2.910	2.910	
Bulkspecific Gravity (Oven-Dry) , s	4.020	4.020	
Unit Weight in SSd condition : $M[1+(A/100)]$, kg/m^3	1340.453	1342.167	1341.310
Void Content : $100[(S \times W) - M] / (S \times W)$, (%)	67.484	67.443	67.464

ตารางที่ ก.13 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบที่ได้จากการแยกคอนกรีต

350 ksc (Cylindrical)

Materials Identification	Sample 1	Sample 2	Average
Weight of Measuring Cylinder (kg)	7.550	7.550	
Weight of Measuring Cylinder + Water (kg)	21.950	22.000	
Temperature of Water ($^{\circ}\text{C}$)	28	28	
Unit Weight of water (kg/l)	0.997	0.997	
Weight of water (kg)	14.400	14.450	
Volume of Measuring Cylinder (m^3)	0.01445	0.01450	
Weight of Measuring Cylinder + Sand (kg)	26.703	26.770	
Weight of Sand (kg)	19.153	19.220	
Unit Weight of Sand , M (kg/m^3)	1325.410	1325.430	1325.420
Water Absorption , A (%)	1.330	1.330	
Bulkspecific Gravity (Oven-Dry) , s	3.750	3.750	
Unit Weight in SSd condition : $M[1+(A/100)]$, kg/m^3	1343.038	1343.058	1343.048
Void Content : $100[(S \times W) - M] / (S \times W)$, (%)	64.532	64.531	64.531

ตารางที่ ก.14 ความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบหินธรรมชาติ

Materials Identification	Sample 1	Sample 2	Sample 3
Total Weight of Aggregate (kg)	5	5	5
Weight of Agg. Retain No.12 (kg)	0.705	0.749	0.739
Weight of Agg. passing No.12 (kg)	4.295	4.251	4.261
Abrasion Loss (%)	14.100	14.980	14.780
Average Abrasion Loss (%)	14.62		

ตารางที่ ก.14 ความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบที่ได้จากการเศษคอนกรีต 240 ksc
(Cube)

Materials Identification	Sample 1	Sample 2	Sample 3
Total Weight of Aggregate (g)	5.00	5.00	5.00
Weight of Agg. Retain No.12 (g)	1.948	2.009	1.998
Weight of Agg. passing No.12 (g)	3.052	2.991	3.002
Abrasion Loss (%)	38.960	40.180	39.960
Average Abrasion Loss (%)	39.7		

ตารางที่ ก.14 ความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบที่ได้จากการเศษคอนกรีต 350 ksc
(Cylindrical)

Materials Identification	Sample 1	Sample 2	Sample 3
Total Weight of Aggregate (g)	5.00	5.00	5.00
Weight of Agg. Retain No.12 (g)	1.055	1.102	1.079
Weight of Agg. passing No.12 (g)	3.945	3.898	3.921
Abrasion Loss (%)	21.100	22.040	21.580
Average Abrasion Loss (%)	21.57		

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวภายใต้แรงอัด 0.4_C_S

Concrete : 0.4_C_S

W/C : 0.4

Slump = 5.00 - 10.00 cm

Age (days)	Sample No.	Weight	Load (kN)		Comp. Strength(ksc)		Distance collapse. (mm.)	
7	1	8.150	580	582.500	262.770	263.903	0.65	0.765
	2	8.170	585		265.036		0.88	
	3	-	-		-			
14	1	7.903	710	700.000	321.667	317.137	1.04	1.094
	2	7.973	700		317.137		1.11	
	3	7.816	690		312.606		1.14	
28	1	7.998	730	736.667	330.728	333.749	1.08	0.976
	2	7.905	750		339.789		0.92	
	3	8.024	730		330.728		0.93	

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวภายใต้แรงอัด 0.5_C_S

Concrete : 0.5_C_S

W/C : 0.5

Slump = 5.00 - 10.00 cm

Age (days)	Sample No.	Weight	Load (kN)		Comp. Strength(ksc)		Distance collapse. (mm.)	
7	1	8.155	490	500.000	221.996	226.526	1.24	1.110
	2	8.161	510		231.057		0.98	
	3	-	-		-			
14	1	8.008	600	606.667	271.831	274.852	1.09	1.019
	2	8.102	600		271.831		1.05	
	3	8.054	620		280.893		0.91	
28	1	8.175	700	693.333	317.137	314.116	0.99	1.028
	2	8.309	690		312.606		1.10	
	3	8.152	690		312.606		0.99	

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวภายใต้แรงอัด 0.6_C_S

Concrete : 0.6_C_S

W/C : 0.6

Slump = 5.00 - 10.00 cm

Age (days)	Sample No.	Weight	Load (kN)		Comp. Strength(ksc)		Distance collapse. (mm.)	
7	1	8.172	460	465.000	208.404	210.669	0.9	0.865
	2	8.084	470		212.935		0.83	
	3	-	-		-			
14	1	8.107	550	550.000	249.179	249.179	1.16	1.034
	2	8.027	530		240.118		0.91	
	3	8.031	570		258.240		1.04	
28	1	8.002	620	616.667	280.893	279.382	0.97	0.947
	2	8.068	630		285.423		0.96	
	3	7.998	600		271.831		0.90	

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวภายใต้แรงอัด 0.4_C240_S

Concrete : 0.4_C_RS

W/C : 0.4

Slump = 5.00 - 10.00 cm

Age (days)	Sample No.	Weight	Load (kN)		Comp. Strength(ksc)		Distance collapse. (mm.)	
7	1	7.756	480	470.000	217.465	212.935	1.36	1.240
	2	7.660	460		208.404		1.12	
	3	-	-		-			
14	1	7.793	550	556.667	249.179	252.199	1.06	1.029
	2	7.723	560		253.709		0.95	
	3	7.599	560		253.709		1.07	
28	1	7.691	620	596.667	280.893	270.321	1.06	0.984
	2	7.731	590		267.301		0.93	
	3	7.683	580		262.770		0.96	

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวภายใต้แรงอัด 0.5_C240_S

Concrete : 0.5_C_RS

W/C : 0.5

Slump = 5.00 - 10.00 cm

Age (days)	Sample No.	Weight	Load (kN)		Comp. Strength(ksc)		Distance collapse. (mm.)	
7	1	7.376	380	390.000	172.160	176.690	1.44	1.410
	2	7.417	400		181.221		1.38	
	3	-	-		-			
14	1	7.345	470	480.000	212.935	217.465	0.95	0.958
	2	7.385	480		217.465		0.92	
	3	7.355	490		221.996		1.01	
28	1	7.542	510	530.000	231.057	240.118	1.12	1.144
	2	7.347	550		249.179		1.16	
	3	7.345	530		240.118		1.15	

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวภายใต้แรงอัด 0.6_C240_S

Age (days)	Sample No.	Weight	Load (kN)		Comp. Strength(ksc)		Distance collapse. (mm.)	
7	1	7.351	370	365.000	167.629	165.364	1.31	1.240
	2	7.327	360		163.099		1.17	
	3	-	-		-			
14	1	7.349	440	436.667	199.343	197.833	1.00	1.069
	2	7.435	440		199.343		1.10	
	3	7.395	430		194.813		1.10	
28	1	7.485	480	493.333	217.465	223.506	1.17	1.135
	2	7.459	490		221.996		1.15	
	3	7.537	510		231.057		1.08	

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวภายใต้แรงอัด 0.4_C350_S

Concrete : 0.4_C240_S

W/C : 0.4

Slump = 5.00 - 10.00 cm

Age (days)	Sample No.	Weight	Load (kN)		Comp. Strength(ksc)		Distance collapse. (mm.)	
7	1	7.778	530	535.000	240.118	242.383	0.87	0.898
	2	7.674	540		244.648		0.93	
	3	-	-		-			
14	1	7.695	640	640.000	289.954	289.954	1.17	1.066
	2	7.590	640		289.954		0.91	
	3	7.749	640		289.954		1.11	
28	1	7.584	650	663.333	294.484	300.525	0.90	0.947
	2	7.760	660		299.015		0.92	
	3	7.788	680		308.076		1.01	

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวภายใต้แรงอัด 0.5_C350_S

Concrete : 0.5_C240_S

W/C : 0.5

Slump = 5.00 - 10.00 cm

Age (days)	Sample No.	Weight	Load (kN)		Comp. Strength(ksc)		Distance collapse. (mm.)	
7	1	7.545	460	460.000	208.404	208.404	0.93	0.995
	2	7.469	460		208.404		1.06	
	3	-	-		-			
14	1	7.620	580	550.000	262.770	249.179	0.96	1.022
	2	7.618	540		244.648		1.15	
	3	7.583	530		240.118		0.95	
28	1	7.646	580	600.000	262.770	271.831	0.98	0.987
	2	7.655	600		271.831		0.99	
	3	7.733	620		280.893		0.99	

ตารางที่ ข.9 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวภายใต้แรงอัด 0.6_C350_S

Concrete : 0.6_C240_S

W/C : 0.6

Slump = 5.00 - 10.00 cm

Age (days)	Sample No.	Weight	Load (kN)		Comp. Strength(ksc)		Distance collapse. (mm.)	
7	1	7.640	400	410.000	181.221	185.752	1.03	1.075
	2	7.725	420		190.282		1.12	
	3	-	-		-			
14	1	7.556	480	470.000	217.465	212.935	1.06	1.085
	2	7.591	460		208.404		1.04	
	3	7.593	470		212.935		1.15	
28	1	7.559	520	513.333	235.587	232.567	1.03	1.023
	2	7.598	520		235.587		1.12	
	3	7.575	500		226.526		0.92	

ตารางที่ ข.10 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวภายใต้แรงอัด 0.4_C_RS

Concrete : 0.4_C240_RS

W/C : 0.4

Slump = 5.00 - 10.00 cm

Age (days)	Sample No.	Weight	Load (kN)		Comp. Strength(ksc)		Distance collapse. (mm.)	
7	1	7.197	270	260.000	122.324	117.794	1.1	1.125
	2	7.327	250		113.263		1.15	
	3	-	-		-		-	
14	1	7.595	320	313.333	144.977	141.956	1.3	1.117
	2	7.470	310		140.446		1.1	
	3	7.263	310		140.446		0.95	
28	1	7.471	330	333.333	149.507	151.017	1	0.950
	2	7.582	340		154.038		0.9	
	3	7.352	330		149.507		0.95	

ตารางที่ ข.11 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวภายใต้แรงอัด 0.5_C_RS

Concrete : 0.5_C240_RS

W/C : 0.5

Slump = 5.00 - 10.00 cm

Age (days)	Sample No.	Weight	Load (kN)		Comp. Strength(ksc)		Distance collapse. (mm.)	
7	1	7.205	200	200.000	90.610	90.610	0.8	0.8
	2	7.042	200		90.610		0.8	
	3	-	-		-			
14	1	7.346	280	256.667	126.855	116.283	1.3	1.617
	2	7.246	250		113.263		2.2	
	3	7.194	240		108.733		1.35	
28	1	7.174	265	265.000	120.059	120.059	0.7	0.717
	2	7.265	250		113.263		0.8	
	3	7.435	280		126.855		0.65	

ตารางที่ ข.12 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวภายใต้แรงอัด 0.6_C_RS

Concrete : 0.6_C240_RS

W/C : 0.6

Slump = 5.00 - 10.00 cm

Age (days)	Sample No.	Weight	Load (kN)		Comp. Strength(ksc)		Distance collapse. (mm.)	
7	1	6.846	100	95.000	45.305	43.040	0.6	0.900
	2	6.735	90		40.775		1.2	
	3	-	-		-			
14	1	7.098	120	123.333	54.366	55.876	0.48	0.893
	2	6.724	125		56.632		1.1	
	3	6.743	125		56.632		1.1	
28	1	6.937	140	133.333	63.427	60.407	0.8	0.690
	2	7.082	140		63.427		0.77	
	3	6.914	120		54.366		0.5	

ตารางที่ ข.13 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวภายใต้แรงอัด 0.4_C240_RS

Concrete : 0.4_C240_RS

W/C : 0.4

Slump = 5.00 - 10.00 cm

Age (days)	Sample No.	Weight	Load (kN)		Comp. Strength (ksc)		Distance collapse. (mm.)	
7	1	6.585	195	192.500	88.345	87.213	1.4	1.300
	2	6.734	190		86.080		1.2	
	3	-	-		-			
14	1	6.854	210	215.000	95.141	97.406	1.7	1.350
	2	6.745	225		101.937		1.25	
	3	6.883	210		95.141		1.1	
28	1	6.903	270	265.000	122.324	120.059	0.98	1.095
	2	6.752	260		117.794		1.27	
	3	6.714	265		120.059		1.035	

ตารางที่ ข.14 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวภายใต้แรงอัด 0.5_C240_RS

Concrete : 0.5_C350_S

W/C : 0.5

Slump = 5.00 - 10.00 cm

Age (days)	Sample No.	Weight	Load (kN)		Comp. Strength(ksc)		Distance collapse. (mm.)	
7	1	6.482	170	175.000	77.019	79.284	1	0.950
	2	6.630	180		81.549		0.9	
	3	-	-		-		-	
14	1	6.808	185	185.000	83.815	83.815	1.25	1.133
	2	6.815	180		81.549		1.15	
	3	6.712	190		86.080		1	
28	1	6.787	200	210.000	90.610	95.141	0.98	0.960
	2	6.881	220		99.672		0.8	
	3	6.733	210		95.141		1.1	

ตารางที่ ข.15 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวภายใต้แรงอัด 0.6_C240_RS

Concrete : 0.6_C240_S

W/C : 0.6

Slump = 5.00 - 10.00 cm

Age (days)	Sample No.	Weight	Load (kN)		Comp. Strength(ksc)		Distance collapse. (mm.)	
7	1	6.630	110	110.000	49.836	49.836	0.9	1.075
	2	6.570	110		49.836		1.25	
	3	-	-		-		-	
14	1	6.615	140	141.667	63.427	64.182	1.1	1.167
	2	6.843	150		67.958		1.2	
	3	6.368	135		61.162		1.2	
28	1	6.611	140	145.000	63.427	65.693	1.15	1.147
	2	6.663	145		65.693		1.2	
	3	6.565	150		67.958		1.09	

ตารางที่ ข.16 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวภายใต้แรงอัด 0.4_C350_RS

Concrete : 0.4_C350_RS

W/C : 0.6

Slump = 5.00 - 10.00 cm

Age (days)	Sample No.	Weight	Load (kN)		Comp. Strength(ksc)		Distance collapse. (mm.)	
7	1	7.158	220	215.000	99.672	97.406	1.6	1.500
	2	6.968	210		95.141		1.4	
	3	-	-		-		-	
14	1	6.938	225	225.000	101.937	101.937	1.2	1.167
	2	6.982	220		99.672		1.1	
	3	6.835	230		104.202		1.2	
28	1	6.917	280	285.000	126.855	129.120	0.9	1.100
	2	6.940	280		126.855		1.3	
	3	6.987	295		133.650		1.1	

ตารางที่ ข.17 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวภายใต้แรงอัด 0.5_C350_RS

Concrete : 0.5_C350_RS

W/C : 0.5

Slump = 5.00 - 10.00 cm

Age (days)	Sample No.	Weight	Load (kN)		Comp. Strength(ksc)		Distance collapse. (mm.)	
7	1	6.650	190	185.000	86.080	83.815	1	1.075
	2	6.711	180		81.549		1.15	
	3	-	-		-		-	
14	1	6.719	200	203.333	90.610	92.121	1.6	1.450
	2	6.724	180		81.549		1.15	
	3	6.596	230		104.202		1.6	
28	1	6.640	240	228.333	108.733	103.447	1.5	1.310
	2	6.499	245		110.998		0.83	
	3	6.511	200		90.610		1.6	

ตารางที่ ข.18 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวภายใต้แรงอัด 0.6_C350_RS

Concrete : 0.6_C350_RS

W/C : 0.6

Slump = 5.00 - 10.00 cm

Age (days)	Sample No.	Weight	Load (kN)		Comp. Strength(ksc)		Distance collapse. (mm.)	
7	1	6.694	120	115.000	54.366	52.101	0.8	1.075
	2	6.665	110		49.836		1.35	
	3	-	-		-		-	
14	1	6.553	140	131.667	63.427	59.652	1.2	1.367
	2	6.689	130		58.897		1.5	
	3	6.503	125		56.632		1.4	
28	1	6.488	150	158.333	67.958	71.733	1.4	1.100
	2	6.576	160		72.488		0.8	
	3	6.514	165		74.754		1.1	



ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

ชุติพงษ์ เอื้อธัญธารณ์, สุขสันต์ หอพิบูลสุข , รัฐพล สมณา (2556) กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษอิฐ
มวลเบาเป็นมวลรวมละเอียด วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระ
นครเหนือ ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน 2557 , 7 หน้า

กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียด

รัฐพล สมณา¹ จุติพงษ์ เอื้อธวัชกรณิ² และสุชนันต์ หอทิบุลสุข^{3*}

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียดเปรียบเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เศษอิฐมวลเบาในการผลิตคอนกรีต ตัวอย่างคอนกรีตทดสอบที่ใช้มวลรวมละเอียดทั้งสองประเภท เตรียมที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.40, 0.50 และ 0.60 และการชุบตัวในช่วง 5 ถึง 10 ซม. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทดสอบกระทำที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น การใช้เศษอิฐมวลเบาในคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงอย่างมาก การลดลงของกำลังอัดแปรผันตามการเพิ่มขึ้นของ W/C และแทบไม่แปรผันตามอายุปูน การลดลงของกำลังอัดเท่ากับร้อยละ 55 สำหรับ W/C เท่ากับ 0.4 และเท่ากับร้อยละ 80 สำหรับ W/C เท่ากับ 0.6

คำสำคัญ: คอนกรีต, กำลังอัด, อิฐมวลเบา, รีไซเคิล

¹ อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ ศาสตราจารย์ หลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้เขียนประจำตำแหน่ง โทรศัพท์ 0-4422-4322, E-mail: suksunat@e.sut.ac.th

Compressive strength of concrete using recycled lightweight brick as fine

Rattapon Somna¹ Chutipong Euathitaporn² and Suksun Horpibulsuk^{3,*}

Abstract

The compressive strengths of concrete using recycled lightweight brick as fine aggregate are compared to those using river sand as fine aggregate in this paper to investigate the possibility of usage of recycled lightweight brick for manufacturing concrete. Both concrete samples were prepared at water to cement ratios (W/C) of 0.40, 0.50, and 0.60 with the slump in the range of 5 to 10 cm. The compressive strengths of concrete samples were measured after 7, 14, and 28 days of curing. The results reveal that compressive strengths decrease as the W/C ratio increases. Usage of RS in concrete results in a significant reduction in compressive strength. The strength reduction is mainly dependent upon W/C, regardless of curing time i.e., it is 55% for W/C of 0.4 and 80% for W/C of 0.6.

Keywords : Concrete, Compressive Strength, Lightweight Brick, Recycle

¹ Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan

² M.Eng Scholar, Construction and Infrastructure Management Program, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

³ Professor, Construction and Infrastructure Management Program, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

* Corresponding Author Tel:0-4422-4322, E-mail: suksun@ig.sut.ac.th

1. บทนำ

การใช้วัสดุรีไซเคิลกำลังได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากการใช้วัสดุรีไซเคิลเป็นการลดการทำลายธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม รวมถึงเป็นการนำของเหลือทิ้งกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์แทนที่จะทิ้งให้กลายเป็นขยะจำนวนมาก เศษคอนกรีตจัดเป็นขยะจากอุตสาหกรรมก่อสร้างประเภทหนึ่งที่มีปริมาณและวิสัยเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปของมวลรวมหยาบในการผลิตคอนกรีต งานวิจัยส่วนใหญ่พบว่ามวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีความแข็งแรงที่ต่ำกว่าและมีการดูดซึมน้ำที่สูงกว่ามวลรวมหยาบธรรมชาติ [1-3] การใช้เศษคอนกรีตในการผลิตคอนกรีต ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 20 ถึง 30 โดยน้ำหนัก แทบไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต [4-6]

งานวิจัยในอดีตแสดงให้เห็นว่าการใช้เศษคอนกรีตส่งผลกระทบต่ออย่างมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ยกตัวอย่างเช่น ทำให้คอนกรีตต้องการปริมาณน้ำในการผสมเพิ่มขึ้นและทำให้คอนกรีตสูญเสียค่าการยุบตัวเร็ว [7] เนื่องจากมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูง นอกจากนี้ยังทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงอย่างมาก เนื่องจากการที่มวลรวมละเอียดมีมอร์ตาร์และฝุ่นปะปนอยู่จำนวนมาก [8]

นอกจากการใช้เศษคอนกรีตแล้ว ยังมีงานวิจัยที่นำเศษอิฐดินเหนียวมาเป็นมวลละเอียด [6] งานวิจัยที่นำเศษอิฐมาใช้ในการผลิตคอนกรีตยังมีอยู่ในวงจำกัด ในขณะที่ การรีดลอนอาคารที่ใช้อิฐมวลเบาทำผนังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอนาคตอันใกล้ ดังนั้นบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้เศษอิฐมวลเบาที่ผ่านการย่อยเป็นมวลรวมละเอียดต่อกำลังอัดของคอนกรีต อันนำมาซึ่งความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เศษอิฐมวลเบาในการผลิตคอนกรีต เพื่อประโยชน์ในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

2. วัสดุและวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- ทรายแม่น้ำ (S) ดังแสดงในรูปที่ 1
- มวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษอิฐมวลเบา ซึ่งมีขนาดโตสุดไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตร หรือสามารถผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 (RS) ดังแสดงในรูปที่ 2
- หินปูนย่อยที่มีขนาดโตสุดไม่เกิน 19 มม. (C)



รูปที่ 1 ทรายแม่น้ำ



รูปที่ 2 มวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษอิฐมวลเบา

2.2 วิธีการเตรียมตัวอย่างและทดสอบ

งานวิจัยนี้กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในการผสมคอนกรีต 3 ค่า คือ 0.40, 0.50 และ 0.60 และกำหนดการยุบตัวของคอนกรีตสดในช่วง 5 ถึง 10 ซม. ส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 1 คอนกรีตในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือคอนกรีตที่ใช้หินปูน

ธรรมชาติเป็นมวลรวมหยาบและทรายแม่น้ำ (ใช้สัญลักษณ์ CS) และคอนกรีตที่ใช้หินปูนธรรมชาติเป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษอิฐมวลเบา (ใช้สัญลักษณ์ CRS)

ตัวอย่างคอนกรีตทดสอบเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด $15 \times 15 \times 15$ ซม. ตัวอย่างคอนกรีตจะถูกบ่มในน้ำหลังจากถอดแบบ และเมื่อได้อายุครบ 7, 14 และ 28 วัน จะถูกนำไปทดสอบกำลังอัด

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีต

Mix	Mix Proportion of Concretes (kg/m ³)				W/C
	Cement	C	S	RS	
0.4_CS	283	1265	666	-	0.40
0.5_CS	275	1250	647	-	0.50
0.6_CS	268	1197	630	-	0.60
0.4_CRS	311	1391	-	367	0.40
0.5_CRS	302	1349	-	356	0.50
0.6_CRS	293	1310	-	345	0.60

3. ผลทดสอบและการวิเคราะห์ผล

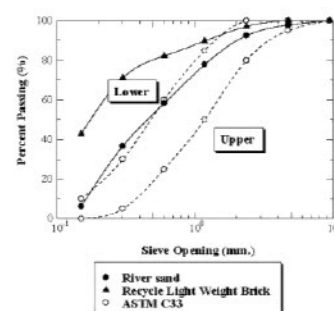
3.1 คุณสมบัติจําเพาะของมวลรวม

ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ของทราย (S) และเศษอิฐมวลเบา (RS) มีค่าเท่ากับ 2.30 และ 1.16 ตามลำดับ มวลรวม RS มีความละเอียดสูงกว่าทรายถึงประมาณ 2 เท่า การกระจายขนาดอนุภาคของมวลรวมละเอียดทั้งแสดงในรูปที่ 3 ความอํางจําเพาะของทรายและมวลรวม RS มีค่าเท่ากับ 2.60 และ 2.05 ตามลำดับ ค่าความอํางจําเพาะที่ต่ำของมวลรวม RS ส่งผลให้หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) ของมวลรวม RS ต่ำตามไปด้วย หน่วยน้ำหนักของมวลรวม RS มีค่าเท่ากับ 825 กก./ม.³ ในขณะที่ หน่วยน้ำหนักของทรายมีค่าเท่ากับ 1647 กก./ม.³ มวลรวม RS มีค่าการดูดซึมนํ้าค่อนข้างสูง โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 42.96 ซึ่งสูงกว่าทรายประมาณ 29 เท่า

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ในการวิจัย

Properties	S	RS	C
Fineness Modulus	2.30	1.16	6.45
Specific Gravity (SSD)	2.60	2.05	3.33
Absorption (%)	1.48	42.96	1.44
Unit Weight (kg/m ³)	1647	825	1564

โมดูลัสความละเอียดของมวลรวม RS มีค่าที่ต่ำ เนื่องจากทรายที่ใช้ในการผลิตอิฐมวลเบาเป็นทรายเม็ดละเอียด ซึ่งกระบวนการบดย่อยเศษอิฐมวลเบาทำให้ได้อนุภาคของทรายละเอียดมีขนาดเล็กถึง เซเมนต์เฟสส์ (ความพรุนสูง) ที่เกาะบนผิวของมวลรวม RS ส่งผลให้ค่าความอํางจําเพาะของมวลรวม RS ต่ำและมีความสามารถในการดูดซึมนํ้าสูง



รูปที่ 3 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียดเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 33

หินปูนย่อยมีค่าโมดูลัสความละเอียดและค่าความอํางจําเพาะเท่ากับ 6.45 และ 3.33 ตามลำดับ มีค่าการดูดซึมนํ้าเท่ากับร้อยละ 1.44 และมีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1564 กก./ม.³

3.2 ผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อยและทราย และใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40 (คอนกรีต 0.4_CS) มีกำลังอัดสูงที่สุด โดยกำลังอัดมีค่าเท่ากับ 251, 305 และ 322 กก./ซม.² ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เป็น 0.50 และ 0.60 กำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน ของคอนกรีต 0.5_CS และ 0.6_CS มีค่าเท่ากับ 314 และ 279 กก./ซม.² ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อแทนที่ทรายด้วยเศษอิฐรวมเวลา ดังจะเห็นได้จากผลทดสอบในรูปที่ 4 คอนกรีตกลุ่ม CRS มีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับคอนกรีตกลุ่ม CS กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีต 0.4_CRS, 0.5_CRS และ 0.6_CRS มีค่าเท่ากับ 151, 120 และ 74 กก./ซม.² ตามลำดับ

ตารางที่ 3 กำลังอัดของคอนกรีต

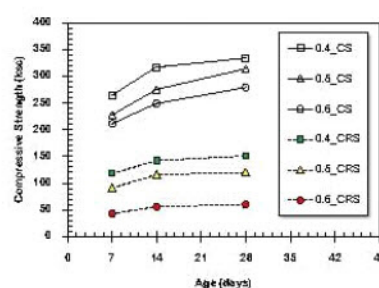
Concrete	Compressive Strength (ksc)		
	7 days	14 days	28 days
0.4_CS	251	305	323
0.4_CRS	118	142	151
0.5_CS	227	285	314
0.5_CRS	91	116	120
0.6_CS	211	249	279
0.6_CRS	59	62	74

3.2.1 ผลกระทบจากการใช้มวลรวมละเอียดจากการย่อย

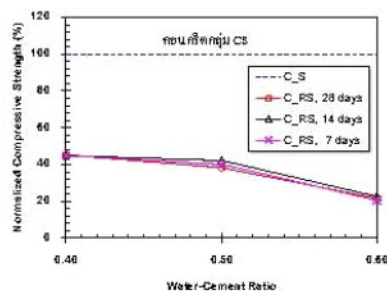
เศษอิฐรวมเวลาแทนทรายต่อกำลังอัดของคอนกรีต

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัด (ได้จากการเทียบกำลังอัดของคอนกรีตกลุ่ม CRS กับคอนกรีตกลุ่ม CS) และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของคอนกรีต เพื่อศึกษาผลกระทบจากการใช้มวลรวม RS ต่อกำลังอัดของคอนกรีตการใช้มวลรวม RS ในส่วนผสมคอนกรีต มีผลให้กำลังอัดของคอนกรีต

ลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะในคอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมที่สูง ($W/C = 0.60$) ร้อยละกำลังอัดมีค่าแปรผันตาม W/C และแทบไม่แปรผันตามอายุบ่ม ร้อยละกำลังอัดมีค่าลดลงอย่างมากตามการเพิ่มขึ้นของค่า W/C ค่าร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต 0.4_CRS มีค่าต่ำกว่าคอนกรีต 0.4_CS ประมาณร้อยละ 55 คอนกรีต 0.5_CRS มีค่าต่ำกว่าคอนกรีต 0.5_CS ประมาณร้อยละ 58 ถึง 62 และคอนกรีต 0.6_CRS มีค่าต่ำกว่าคอนกรีต 0.6_CS ประมาณร้อยละ 77 ถึง 80



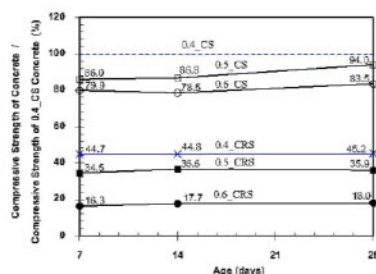
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของคอนกรีต



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของคอนกรีต

3.2.2 ผลกระทบจากการใช้มวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษอิฐมวลเบาและการเพิ่มขึ้นของ W/C

รูปที่ 6 แสดงค่าร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต เทียบกับกำลังอัดของคอนกรีต 0.4_CS ที่อายุเดียวกัน เพื่อแสดงถึงผลกระทบของการใช้มวลรวม RS และ ปริมาณที่ใช้ในการผสมร่วมกันต่อกำลังอัดของคอนกรีต การเพิ่มปริมาณน้ำในการผสมจาก W/C เท่ากับ 0.40 เป็น 0.50 และ 0.60 กำลังอัดของคอนกรีตลดลงประมาณร้อยละ 6 ถึงร้อยละ 14 และประมาณร้อยละ 16 ถึงร้อยละ 20 ตามลำดับ



รูปที่ 6 ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีต 0.4_CS ที่อายุเดียวกัน

อิทธิพลของการแทนที่เศษอิฐมวลเบาต่อกำลังอัดของคอนกรีตแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนจากอัตราส่วนกำลังอัด กำลังอัดของคอนกรีต CRS ที่ใช้ W/C เท่ากับ 0.40 มีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 45 ของคอนกรีต 0.4_CS ที่อายุเดียวกัน คอนกรีต CRS ที่ใช้ W/C เท่ากับ 0.50 มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยประมาณร้อยละ 35 ถึงร้อยละ 37 ของคอนกรีต 0.4_CS ที่อายุเดียวกัน และคอนกรีต CRS ที่ใช้ W/C เท่ากับ 0.60 มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยประมาณร้อยละ 16 ถึงร้อยละ 18 ของคอนกรีต 0.4_CS ที่อายุเดียวกัน ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจาก W/C เท่ากับ 0.40 เป็น 0.50 และ 0.60 มี

ผลกระทบต่อกำลังอัดน้อยกว่าการใช้มวลรวม RS อย่างชัดเจน

การลดลงของกำลังอัดของคอนกรีตตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำเป็นไปตามกฎของ Abram [9] ที่กล่าวว่ากำลังอัดลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณน้ำเป็นการเพิ่มปริมาณช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ทำให้ปริมาณน้ำส่วนเกินไปแทรกตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีต ที่รู้จักในชื่อว่าโพรงคาพิลลารี ช่องว่างในเนื้อคอนกรีตที่มากจะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียด RS มีค่าลดลง เนื่องจากมวลรวม RS มีความแข็งแรงสูงกว่าทราย และเศษนอร์ไคที่ติดบนเศษอิฐมวลเบามีความพรุนสูง ความพรุนที่สูงเกิดจากฟองอากาศที่เติมเข้าไปในกระบวนการผลิตอิฐมวลเบา แม้เศษอิฐมวลเบาจะถูกย่อยจนมีขนาดเล็กลงแล้วก็ตาม ฟองอากาศยังคงปนอยู่ในอนุภาคของมวลรวม RS ดังจะสังเกตได้จากค่าความถ่วงจำเพาะที่มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับทราย

4. สรุปผลการศึกษา

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต สรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตทั้งสองประเภทส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง การใช้เศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียดแทนทรายทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงอย่างมาก การลดลงของกำลังอัดแปรผันตามการเพิ่มขึ้นของ W/C โดยพบไม่แปรผันตามอายุบ่ม กำลังอัดลดลงถึงร้อยละ 55 สำหรับ W/C เท่ากับ 0.40 ถึงร้อยละ 80 สำหรับ W/C เท่ากับ 0.60 ดังนั้น การประยุกต์ใช้เศษอิฐมวลเบาเป็นมวลรวมละเอียดแทนทรายอาจต้องพิจารณาถึงปริมาณที่จะใช้แทนที่ทรายและปริมาณน้ำที่เหมาะสมเพื่อให้ได้กำลังอัดตามต้องการและเหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้ประพันธ์ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สำหรับความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และเครื่องทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Poon, C.S., Kou, S.C., and Lam, L., 2002, Use of Recycled Aggregates in Molded Concrete Bricks and Blocks, *Construction and Building Materials*, Vol. 16, pp. 281-289.
- [2] Shayan, A. and Xu, A., 2003, Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate, *ACI Materials Journal*, Vol.100, No.5, pp.371-380.
- [3] Somna, R., Jaturapitakkul, C. and Amde, A.M., 2012, Effect of Ground Fly Ash and Ground Bagasse Ash on The Durability of Recycled Aggregate Concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, pp. 848-854.
- [4] Etxeberria, M., Mari, A.R., Vazquez, E., 2007, Recycled Aggregate Concrete as Structural Material, *Materials and Structures*, Vol. 40, No. 5, pp. 529-541.
- [5] Limbachiya, 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.
- [6] Levy, S.M. and Helene, P., 2004, Durability of recycled aggregates concrete a safe way to sustainable development, *Cement and Concrete Research*, Vol.34, pp.1975-1980.
- [7] Tangchirapat, C., Buranasing, R., Jaturapitakkul, C., and Chindaprasit, P., 2008, Influence of Rice Husk-Bark Ash on Mechanical Properties of Concrete Containing High Amount of Recycled Aggregates, *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 8, pp. 1812-1819.
- [8] Malhotra, V.M., 1976, The use of recycled concrete as a new aggregate. *Proceedings of Symposium, Energy and Resource Conservation in the Cement and Concrete Industry*, Canmet, Ottawa.
- [9] Abrams, D.A., Design of Concrete Mixture, Bulletin 1, *Structural Materials Research Laboratory*, Lewis Institute, Chicago, Revised Edition, 1918.

ประวัติผู้เขียน

นายชุตีพงศ์ เอื้อธัญธารณ์ เกิดเมื่อวันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ. 2529 เรียนจบชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนสุขานารี จังหวัดนครราชสีมา เรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย จังหวัดนครราชสีมา จบชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 ได้สอบคัดเลือกเข้าเรียนต่อระดับมหาวิทยาลัย และได้เข้าเรียนที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี คณะวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาโยธา เมื่อปี พ.ศ. 2552 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษาได้รับใบอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมระดับภาคีวิศวกร สาขาวิศวกรรมโยธา และได้เข้าทำงานกับบริษัทรับเหมาก่อสร้าง ในตำแหน่งวิศวกรควบคุมงาน กระทั่งปี พ.ศ. 2555 ได้เข้าทำงานกับสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครราชสีมา ในตำแหน่งพนักงานวิศวกรโยธา

ปี พ.ศ.2554 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ด้านการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมีผลงานวิจัยโดยมีรายละเอียดปรากฏในภาคผนวก ก.

