การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตและความสามารถในการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตฝายกั้นน้ำ

นายนิธิศ สุภารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตและความสามารถในการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตฝายกั้นน้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงงาน

_____

(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)
ประธานกรรมการ

_____

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

_____

(รศ. ดร.วชรภูมิ เบญจโอฬาร)
กรรมการ

_____

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นิธิศ สุภารี : การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตและความสามารถในการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตฝายกั้นน้ำ (STRENGTH AND PERMEABILITY OF CONCRETE USING RECYCLED DAM CONCRETE AGGREGATE AS COARSE AGGREGATE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของเถ้าลอยต่อการพัฒนากำลังอัดและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตจากฝายกั้นน้ำเป็นมวลรวมหยาบ ตัวแปรอิทธิพลในงานวิจัยนี้ ได้แก่ อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (*F*) ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 และปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (*W/B*) เท่ากับ 0.3 และ 0.5 ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่ากำลังต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้หินธรรมเพียงเล็กน้อย เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีต่ำ (เท่ากับ 0.3) และมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 15 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าสูง (เท่ากับ 0.5) การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยสามารถช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 ดังจะเห็นได้จากกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับทุกอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย คอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้หินธรรมชาติ สำหรับทั้ง W/B เท่ากับ 0.3 และ 0.5 เถ้าลอยไม่ได้เพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล เนื่องจากเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตทุกอัตราส่วนผสมมีกำลังอัดที่สูงกว่า 240 กก/ซม^2 (กำลังอัดที่ต้องการสำหรับการสร้างฝายกันน้ำ) นั่นแสดงว่ามวลรวมหยาบรีไซเคิลและเถ้าลอยสามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมและวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตสำหรับงานก่อสร้างฝายกั้นน้ำได้ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในเชิงวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม และเศรษฐศาสตร์

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ปีการศึกษา 2557 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม_____

NITID SUPHAREE : STRENGTH AND PERMEABILITY OF CONCRETE USING RECYCLED DAM CONCRETE AGGREGATE AS COARSE AGGREGATE. ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., P. E.

This research aims to investigate the role of fly ash (FA) on the strength and permeability of concretes using recycled dam concrete aggregate as coarse aggregate (designated as RCA concrete). The influential factors studied are fly ash replacement ratios of 10, 20, 30 and 40% and water to binder ratios (cement and fly ash) (W/B) of 0.3 and 0.5. Test results show that the RCA concrete has slightly lower strength than the concrete using natural aggregate as coarse aggregate (NA concrete) when W/B is low of 0.3. The strength of RCA concrete is 15% lower than that of the NA concrete when W/B is high of 0.5. The FA replacement saves significantly the input of cement for W/B = 0.3 as seen that the 28-day strengths of RCA concretes are essentially the same for different FA replacement ratios. The FA replacement insignificantly improves the permeability of the RCA concrete as the FA particles are larger than the cement particles. The research output shows that strength of the RCA concretes meets a typical strength requirement for a dam construction of higher than 240 ksc. This implies that the recycled dam concrete aggregate and fly ash, which are waste materials, can be used as coarse aggregate and replacement material respectively in concrete for the dam construction, which is useful in term of engineering, environmental and economical perspectives.

School of Civil Engineering
Academic Year 2014

Student's signature _____
Advisor's signature _____
Co-Advisor's signature _____

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานการศึกษานี้สามารถสำเร็จลุล่วงเสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข และ ดร.รัฐพล สมนา อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้สละเวลาอันมีค่าให้คำปรึกษา คำสอน ข้อชี้แนะแนวทาง ข้อแนะนำ และแก้ไขปัญหาที่ผู้วิจัยสงสัย ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ในทุกขั้นตอนในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จลุลวงไปด้วยดี ขอขอบคุณคณะกรรมการการสอบทุกท่านซึ่งได้เสียสละเวลาอันมีค่ามาสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำ และชี้แนะสิ่งที่เป็นประโยชน์ให้ผู้วิจัย

ขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ใช้สถานที่ห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมโยธา ในการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ธุรการ ของหลังสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมโยธา ในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาของผู้วิจัยซึ่งได้ให้การอุปการะเลี้ยงดูผู้วิจัย และให้แนวทางในความคิด รวมถึงทุนในการศึกษาในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้ทุกท่าน ที่ไม่ได้เอยนาม และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยนี้จะเสริมสร้างความรู้ และความเข้าใจ ตลอดจนส่งเสริมการนำวัสดุรีไซเคิลจากเศษคอนกรีตฝายกั้นน้ำ กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกครั้ง ซึ่งจะช่วยลดมลภาวะโลกร้อน ลดการสิ้นเปลืองพลังงาน และลดขยะคอนกรีตซึ่งถูกทิ้งตามแม่น้ำลำคลองอย่างได้รับประโยชน์

นิธิศ สุภารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ข

กิตติกรรมประกาศ ค

สารบัญ ง

สารบัญตาราง ฉ

สารบัญรูปภาพ ซ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 1

1.3 ขอบเขตงานวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2.1 คุณสมบัติของคอนกรีต 3

2.2 ประเภทของมวลรวม 8

2.3 วัสดุปอซโซลาน 10

2.4 เถ้าลอย (Fly Ash) 11

2.5 มวลรวมจากเศษคอนกรีต 14

2.6 งานวิจัยที่ผ่านมา 14

3 วิธีการดำเนินการวิจัย 17

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ 17

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ 17

3.3 การหาหาคุณสมบัติของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต 19

3.4 สัญลักษณ์ของอัตราส่วนผสมและสัดส่วนผสมคอนกรีต 19

3.5 การทำตัวอย่างและการบ่ม 21

3.6 กระบวนการทดสอบ 22

3.7 วิธีการทดสอบ 22

4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล 30
4.1 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน 30
4.2 คุณสมบัติของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต 30
4.3 กำลังอัดของคอนกรีต 33
4.4 การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 38
5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ 43
5.1 สรุปผลการทดลอง 43
5.2 ข้อเสนอแนะ 44
เอกสารอ้างอิง 45
ภาคผนวก ก ตารางและรูปแสดงคุณสมบัติจำเพาะของมวลรวมจากธรรมชาติ มวลรวมหยาบที่ได้จากการการย่อยเศษคอนกรีตฝายกั้นน้ำ ที่ใช้ในงานวิจัย 46
ภาคผนวก ข ตารางและรูปแสดงแสดงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต 57
ภาคผนวก ค ตารางและรูปแสดงแสดงผลการซึมผ่านน้ำในตัวอย่างคอนกรีต 59
ประวัติผู้เขียน 73

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 อิทธิพลของอายุของซีเมนต์เพสต์ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (w/c Ratio = 0.51) 6

2.2 ระยะเวลาที่ต้องการในการบ่มให้เนื้อคอนกรีตมีรูพรุนที่ไม่ต่อเนื่องกัน 7

2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 12

2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ 13

3.1 แสดงสัญลักษณ์และจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ 19

3.2 อัตราส่วนผสมและสัดส่วนผสมคอนกรีต 20

4.1 คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ในการวิจัย 31

4.2 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 34

4.3 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 36

4.4 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 39

4.5 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 40

4.6 เปรียบเทียบราคาคอนกรีตที่ผสมจากโรงงานเทียบกับส่วนผสม 0.5F40 42

ก.1 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจาเพาะและการดูดซึมน้ำของทรายแม่น้ำ 47

ก.2 ผลการทดสอบหาค่าค่าความถ่วงจาเพาะและการดูดซึมน้ำของหินธรรมชาติ 47

ก.3 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจาเพาะและการดูดซึมน้ำของหินรีไซเคิลที่ได้จาก
การย่อยเศษคอนกรีตฝายกั้นน้ำ 48

ก.4 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียดที่ได้จากทรายแม่น้ำ 48

ก.5 การกระจายตัวของมวลรวมหยาบที่ได้จากหินธรรมชาติ 49

ก.6 การกระจายตัวของมวลรวมหยาบที่ได้จากเศษคอนกรีตฝายกั้นน้ำ 50

ก.7 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมละเอียดของทรายแม่น้ำ 51

ก.8 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบจากหินธรรมชาติ 52

ก.9 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตฝายกั้นน้ำ 52

ก.10 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบจากหินธรรมชาติ 53

ก.11 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตฝายกั้นน้ำ 53

ข.1 กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่แต่ละอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.3 58

ข.2 กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่แต่ละอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 58

ค.1 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.3N 60

ค.2 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.3R 60
ค.3 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.3F10 61
ค.4 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.3F20 61
ค.5 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.3F30 62
ค.6 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.3F40 62
ค.7 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.5N 63
ค.8 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.5R 63
ค.9 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.5F10 64
ค.10 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.5F20 64
ค.11 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.5F30 65
ค.12 การทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.5F40 65
ค.13 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.3N 66
ค.14 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.3R 66
ค.15 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.3F10 67
ค.16 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.3F20 67
ค.17 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.3F30 68
ค.18 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.3F40 68
ค.19 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.5N 69
ค.20 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.5R 69
ค.21 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.5F10 70
ค.22 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.5F20 70
ค.23 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.5F30 71
ค.24 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.5F40 71

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 อิทธิพลของ w/c Ratio ที่มีต่อค่าการซึมผ่านของ (a) ซีเมนต์เพสต์และ (b) คอนกรีต 5

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาตรของรูพรุนในเนื้อซีเมนต์เพสต์ 5

3.1 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีตแบบ Automatic ขนาด 5000 kN 18

3.2 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของน้ำ 18

3.3 แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ กว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร 21

3.4 อ่างแช่ตัวอย่างคอนกรีต 22

3.5 ก้อนตัวอย่างที่ถูกสกัด 23

3.6 ก้อนตัวอย่างที่ถูกนำแช่ไปแช่ในน้ำ 23

3.7 การต้มก้อนตัวอย่างหลังจากชั่งน้ำหนักในข้อที่ 2 24

3.8 ก้อนตัวอย่างที่นำไปชั่งในน้ำเพื่อหาน้ำหนัก 24

3.9 ก้อนตัวอย่างที่ถูกนำไปเข้าตู้อบ 25

3.10 การประกอบติดตั้งตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ 26

3.11 เติมน้ำผ่านวาล์ว 26

3.12 หลอดวัด (Transparent Tube) 27

3.13 ต่อระบบแรงดันของชุดทดสอบ 27

3.14 เกจวัดแรงดัน 28

3.15 ชิ้นตัวอย่างที่นำออกจากเซลล์และที่ถูกผ่าวัดความลึก 28

4.1 กระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน 30

4.2 มวลรวมละเอียด (ทรายแม่น้ำ) 31

4.3 มวลรวมหยาบธรรมชาติ (หินธรรมชาติ) 32

4.4 มวลรวมหยาบรีไซเคิล (หินรีไซเคิล) 32

4.5 การกระจายตัวของมวลรวมระเอียด 32

4.6 การกระจายตัวของมวลรวมหยาบทั้ง 2 ชนิด 33

4.7 ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 35

4.8 ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 36

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.9 การวิบัติของก้อนตัวอย่าง (0.3N) ที่น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 38
4.10 การวิบัติของก้อนตัวอย่าง (0.3N) ที่น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 38
4.11 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตของ
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.3 40
4.12 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตของ
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 41
ก.1 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียดจากทรายแม่น้ำ 49
ก.2 การกระจายตัวของหินธรรมชาติ 50
ก.3 การกระจายตัวของเศษคอนกรีตที่ได้จากฝายกั้นน้ำ 51
ค.1 การวัดค่าความลึกที่ซึมเข้าเนื้อคอนกรีตที่ w/c = 0.3 72
ค.2 การวัดค่าความลึกที่ซึมเข้าเนื้อคอนกรีตที่ w/c = 0.5 72

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ฝายกั้นน้ำคอนกรีตมีอยู่ในทุกพื้นที่ทั่วประเทศไทย เพื่อใช้ในการชะลอและกักเก็บน้ำไว้ใช้ในการเกษตร อุทกภัยที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งและรุนแรงขึ้นทุกปี ส่งผลให้ฝายกั้นน้ำเกิดการชำรุดเสียหายจนไม่สามารถซ่อมแซมได้ จำเป็นต้องถูกทุบทิ้งและก่อสร้างขึ้นใหม่เพื่อทดแทนฝายเดิม การรื้อถอนฝายคอนกรีตทำให้เกิดเศษคอนกรีตซึ่งเป็นสิ่งไร้มูลค่าและต้องขนย้ายออกจากพื้นที่ก่อสร้าง เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงส่งผลให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนย้าย

Somna et al. (2012) และชุติพงศ์ เอื้อฐิตาภรณ์ (2556) ได้แสดงให้เห็นว่า เศษคอนกรีตสามารถนำกลับมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมหยาบในงานคอนกรีตได้ แต่มอร์ต้าร์เก่าที่ติดอยู่กับเนื้อมวลรวมหยาบรีไซเคิล จะทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลในส่วนผสมมีหน่วยน้ำหนักต่ำกว่า ความดูดซึมของน้ำสูงกว่า และความพรุนสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ นอกจากนี้ยังส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ งานวิจัยในอดีตแสดงให้เห็นว่าเถ้าลอย (Fly Ash) สามารถนำมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดและการซึมผ่านของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลได้ เนื่องจากเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากไฮเดรชั่น และก่อได้สารเชื่อมประสาน

เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดทั้งทางด้านวิศวกรรมและด้านสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังอัดและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมยาบรีไซเคิลจากเศษคอนกรีตที่ได้จากการรื้อฝายกั้นน้ำผสมกับเถ้าลอย (Fly Ash)

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษากำลังอัดและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตที่ได้จากการรื้อฝายกั้นน้ำเป็นมวลรวมหยาบ

1.2.2 เพื่อศึกษากำลังอัดและการซึมผ่านของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตที่ได้จากการรื้อฝายกั้นน้ำและใช้เถ้าลอย (Fly Ash)

1.2.3 เพื่อนำเสนอประสิทธิภาพของการใช้เถ้าลอย (Fly Ash) ต่อค่ากำลังอัดและค่าการซึมผ่านของคอนกรีตคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตที่ได้จากการรื้อฝายกั้นน้ำ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยมีดังนี้

1.3.1 ใช้ปูนซีเมนต์ที่ใช้ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.3.2 ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ และมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ได้จากเศษคอนกรีตจากการรื้อถอนฝายกั้นน้ำ โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการสร้างฝายกั้นน้ำถูกออกแบบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ไว้เท่ากับ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์) นำเศษคอนกรีตจากการรื้อถอนฝายกั้นน้ำมาย่อยโดยการทุบ จากนั้นทำการร่อนเพื่อเลือกขนาดมวลรวมหยาบที่ค้างบนตะแกงเบอร์ 4 (ขนาดช่องเปิด 4.75 มม.) และขนาดโตสุดไม่เกิน ¾ นิ้ว มาใช้ในงานวิจัย

1.3.3 ส่วนผสมคอนกรีตในงานวิจัยนี้ ได้ออกแบบส่วนผสมโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย) เท่ากับ 0.3 และ 0.5 มวลรวมที่ใช้มี 2 ประเภท ได้แก่ หินธรรมชาติ แลมวลรวมรีไซเคิล อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

1.3.4 ทดสอบกำลังอัด และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำทดสอบที่อายุบ่ม 28 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบถึงอิทธิพลของตัวอย่างต่อการพัฒนากำลังอัดและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตจากการรื้อถอนฝายกั้นน้ำทั้งที่ผสมและไม่ผสมเถ้าลอย

1.4.2 ช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และส่งเสริมการใช้เศษคอนกรีตจากการรื้อถอนฝายกั้นน้ำและเถ้าลอยในงานวิศวกรรม ซึ่งเป็นการลดปริมาณขยะและมลภาวะ

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติของคอนกรีต

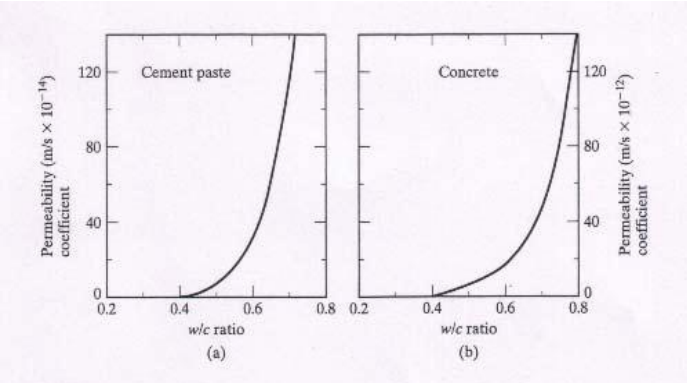
คอนกรีตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 สภาวะคือสภาวะที่เป็นของเหลวหรือคอนกรีตสด (Fresh State) และสภาวะที่แข็งตัวแล้ว (Hardened State) ซึ่งแต่ละสภาวะมีคุณสมบัติดังนี้

คุณสมบัติของคอนกรีตสด (Fresh State) คุณสมบัติที่สำคัญและมีผลต่อการใช้งานมากที่สุดในสภาวะนี้คือความสามารถในการทำงาน (Workability) ซึ่งหมายถึงการที่คอนกรีตสดสามารถไหลเข้าแบบหล่อได้ดี ทำให้แน่นตัวได้ง่ายโดยใช้กำลังงานน้อยและคอนกรีตที่หล่อได้ปราศจากรูโพรงต่างๆ ความสามารถในการทำงานขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตซึ่งอยู่ในเทอมของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ กล่าวคือถ้าใช้น้ำมากเกินพอคอนกรีตจะเหลวและเทลงในแบบหล่อง่ายก็จริงแต่กำลังความแข็งแรงของคอนกรีตจะลดลงเนื่องจากเนื้อของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะมีรูโพรงหรือพรุนมาก ควรใช้ปริมาณน้ำให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้เกิดความสามารถในการทำงานในขั้นดี สำหรับรูปร่างและขนาดคละของวัสดุผสม ถ้าใช้วัสดุผสมที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมจะทำให้ได้ความสามารถในการทำงานดีกว่าวัสดุผสมที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมเป็นมุม วัสดุผสมที่มีความลดหลั่นของขนาดคละอยู่ในพิกัดต้องการปริมาณน้ำน้อย ทำให้ได้คอนกรีตที่มีเนื้อแน่นสม่ำเสมอมีคุณภาพดีและทำงานง่าย ส่วนปริมาณซีเมนต์และชนิดของซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์มีผลมาจากอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ ถ้าใช้ซีเมนต์ที่ละเอียดจะมีผลทำให้ได้คอนกรีตที่เทเข้าแบบได้ง่ายกว่า ปริมาณสารกระจายกักฟองอากาศถ้าใช้ในปริมาณที่พอเหมาะคอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ง่ายแต่ถ้าใช้มากเกินไปจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงอีกทั้งความคงทนก็มิได้เพิ่มขึ้นสารผสมเพิ่มสารเคมีผสมเพิ่มชนิดประเภทลดน้ำและยืดเวลาการก่อตัวเช่นพวกไฮเดรตไลม์ (Hydrated Lime), เบนโทไนท์ (Bentonite) และเถ้าลอย (Fly Ash) จะช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้ดีขึ้นช่วยขจัดการเยิ้มที่ผิวหน้าของคอนกรีตเวลาและอุณหภูมิถ้าทิ้งคอนกรีตที่เพิ่งผสมเสร็จใหม่ๆไว้นานเกินกว่า 15 นาทีคอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ต่ำลงหรืออาจแข็งตัวไปเลยหากใช้อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์น้อยเกินไปการเทคอนกรีตในวันที่อากาศร้อนหรืออุณหภูมิสูงควรเพิ่มปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตให้มากขึ้นเล็กน้อยเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำและรักษาความสามารถเทได้ของคอนกรีตให้คงที่

คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว (Hardened State) ต้องมีกำลังรับแรงตามต้องการ, มีเนื้อแน่นและทนทานต่อลมฟ้าอากาศการกัดกร่อนและตัวทำลายอื่นๆต้องไม่เปลี่ยนแปลงปริมาตรหรือหดตัวมากเกินไปเมื่อถูกความร้อน-เย็นหรือเปียก-แห้งสลับกันในบางครั้งต้องการให้คอนกรีตทนทานต่อ

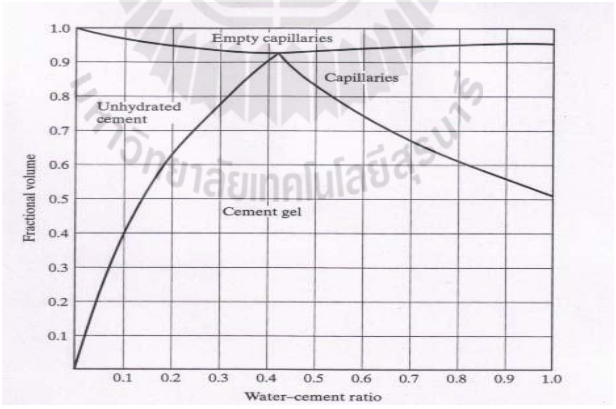
สารเคมีหรือต้องการให้มีน้ำหนักเบามีผิวเรียบเป็นพิเศษหรือให้ผิวมีรูพรุน กำลังต้านทานแรงอัด หรือ

กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตเป็นตัวบอกให้ทราบคุณสมบัติอื่นๆได้เป็นอย่างดีเพราะค่ากำลังต้านทานหรือการรับแรงแบบอื่นๆเป็นสัดส่วนกำลังต้านทานแรงอัดและด้วยเหตุที่คอนกรีตมีกำลังต้านทานแรงอัดมากกว่ากำลังต้านทานแรงดึงหลายเท่าดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจึงออกแบบโดยพิจารณาให้คอนกรีตรับเฉพาะแรงอัดเพียงอย่างเดียวส่วนกำลังรับแรงดึงที่เกิดขึ้นให้เหล็กเสริมซึ่งหล่ออยู่ในเนื้อคอนกรีตทำหน้าที่ต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน (w/c Ratio) ของคอนกรีตเป็นหลักโดยค่า w/c Ratio จะแปรผกผันกับกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต กำลังต้านทานแรงดึงหรือกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) แม้ว่าการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจะสมมติให้คอนกรีตรับแรงดึงไม่ได้ เลยทั้งนี้เนื่องจากความต้านทานของคอนกรีตในด้านรับแรงดึงมีค่าต่ำมากประมาณ 10% ของกำลังอัดประลัยอีกทั้งยังมีคุณสมบัติที่เปราะด้วยแต่ค่าความต้านทานแรงดึงของคอนกรีตจะใช้ช่วยในการพิจารณาเกี่ยวกับการแตกร้าวของคอนกรีตอันเนื่องมาจากอุณหภูมิการหดตัวหรือการอัดแรงในงานคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรง Kosmatka, S. H. (c1995) และคณะ กล่าวว่าการหาค่ารับแรงดึงของคอนกรีตสามารถทำได้อย่างคร่าวๆหากทราบค่ากำลังรับแรงอัดโดยกำลังดึงจะมีค่าประมาณ 0.4 – 0.7 เท่าของรากที่สองของกำลังรับแรงอัด กำลังต้านทานต่อแรงดัดหรือกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) ในงานก่อสร้างพื้นถนนหรือสนามบินกำลังต้านทานของคอนกรีตมักถูกกำหนดให้ทดสอบหาความต้านทานต่อแรงดัดจากคานตัวอย่างมาตรฐานที่ทำจากคอนกรีตล้วนโดยกำหนดอยู่ในรูปของโมดูลัสการแตกหัก (Modulus of Rupture) ซึ่งเป็นค่าแรงดึง (หรือแรงอัด) ที่สูงที่สุด ณ จุดที่เกิดการแตกหักคำนวณได้จากสูตร f = Mc/I Mindess et al., (2002) ความสามารถในการซึมผ่านของคอนกรีต (Permeability of Concrete) ตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดต่อความคงทนของคอนกรีตคือ w/c Ratio โดยที่หากคอนกรีตมีค่า w/c Ratio ลดลงคอนกรีตจะมีความแน่นตัวมากขึ้นหรือทึบน้ำดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 อิทธิพลของ w/c Ratio ที่มีต่อค่าการซึมผ่านของ (a) ซีเมนต์เพสต์และ (b) คอนกรีต

Mindess et al.,(c2002) กล่าวว่ากลไกการซึมผ่านของคอนกรีตคือการซึมของสารผ่านรูพรุนหรือรอยร้าวในเนื้อซีเมนต์เพสต์โดยปกติในเนื้อซีเมนต์เพสต์จะมีรูพรุน 2 ประเภทเป็นหลัก คือรูพรุนขนาดใหญ่ที่เรียกว่าช่องว่างคาร์ปิลารี่ (Capillary Pore) และรูพรุนขนาดเล็กที่เรียกว่าช่องว่างในเจล (Gel Pore) การซึมผ่านจะเกิดโดยการซึมผ่านรูพรุนขนาดใหญ่ในเนื้อซีเมนต์เพสต์เป็นหลักมากกว่าการซึมผ่านรูพรุนขนาดเล็กซึ่งรูพรุนขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยนั้นจะแปรผันตามค่า w/c Ratio ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่ารูพรุนขนาดใหญ่จะมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่ค่า w/c Ratio มากกว่า 0.42 นอกจากนั้นค่า w/c Ratio ที่ลดลงและทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นยังมีผลที่ตามมาคือทำให้ความสามารถในการต้านทานรอยร้าวที่อาจเกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตสูงขึ้นด้วยจึงเป็นผลดีต่อความคงทนของคอนกรีตเช่นกัน



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาตรของรูพรุนในเนื้อซีเมนต์เพสต์

จากที่ได้กล่าวมาความพรุนในเนื้อคอนกรีตจะเกิดขึ้นในส่วนของซีเมนต์เพสต์ดังนั้นความสามารถในการซึมผ่านของคอนกรีตจึงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์เป็นสำคัญอย่างไรก็ดีการซึมผ่านยังอาจเกิดได้มากขึ้นหากบริเวณผิวสัมผัสระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมในเนื้อคอนกรีตเกิดรอยร้าวขึ้นในการก่อสร้างส่วนใหญ่จะพิจารณาถึงการซึมผ่านของน้ำเป็นหลักซึ่งมีผลกระทบต่อความคงทนของโครงสร้างโดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องใช้ในการเก็บน้ำเป็น

ต้นเมื่อกล่าวถึงคุณสมบัติด้านนี้ในวงการก่อสร้างมักจะกล่าวถึงในรูปของความทึบน้ำ (Watertighness)

ซึ่งมีความหมายเช่นเดียวกับความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำ (Impermeability) การหาค่าความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำสามารถหาได้โดยคำนวณจากกฎของ Dary 's law ดังสมการที่ (2.1)

$$V = Kp\,(h/x) \qquad (2.1)$$

โดย V = อัตราการไหลของน้ำ
h = แรงดันน้ำ (Hydraulic Pressure)
x = ความหนาของตัวอย่างที่น้ำไหลผ่าน
Kp = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

โดยค่า Kp มีค่าไม่คงที่แต่จะขึ้นอยู่กับ w/c Ratio และอายุของซีเมนต์เพสต์ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และโดยทั่วไปการซึมผ่านของสารจำพวกก๊าซจะซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ดีกว่าน้ำประมาณ 10 ถึง 100 เท่า

ตารางที่ 2.1 อิทธิพลของอายุของซีเมนต์เพสต์ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (w/c Ratio = 0.51)

Effect of Age Cement Paste on Its Permeability Coefficient w/c 0.51		
Age (day)	**Kp (m/s)**	**Independent of w/c**
Fresh paste	10^{-5}	Capillary pores interconnected
1	10^{-8}	
3	10^{-9}	
4	10^{-10}	
7	10^{-11}	
14	10^{-12}	
28	10^{-13}	
100	10^{-16}	Capillary pores discontinuous
240	10^{-18}	
(maximum hydration)		

สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของซีเมนต์เพสต์ที่เกิดโดยปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่สมบูรณ์นั้นปกติมีค่าต่ำมากถึงแม้ว่าจะมีความพรุนมากก็ตามทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์จะทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate ; C-S-H) ซึ่งจะเข้าไปอุดรูพรุนในเนื้อซีเมนต์เพสต์ให้รูพรุนที่มีอยู่ไม่ต่อเนื่องกันดังนั้นภายใต้เงื่อนไขที่มีการบ่มอย่างต่อเนื่องอายุของคอนกรีตจึงเป็นตัวแปรสำคัญต่อความสามารถในการซึมผ่านคือยิ่งคอนกรีตที่มีอายุมากจะยิ่งมีจำนวนรูพรุนที่ไม่ต่อเนื่องมากขึ้นจึงส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นได้ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.2 ระยะเวลาที่ต้องการในการบ่มเพื่อให้เนื้อคอนกรีตมีรูพรุนที่ไม่ต่อเนื่องกัน

Curing Time Required to Produce a Discontinuous System of Capillaries (Assuming Continuous Moist Curing)	
w/c Ratio	**Curing Time (day)**
0.40	3
0.45	7
0.50	28
0.60	180 (6 months)
0.70	365 (1 year)
> 0.70	Not possible

เมื่อกล่าวถึงความสามารถในการซึมผ่านการผสมสารจำพวกสารกระจายกักฟองอากาศ (Air-Entraining Admixture) ก็มีผลต่อคุณสมบัตินี้เช่นกันกล่าวคือปริมาณฟองอากาศจะเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้นซึ่งเป็นผลเสียต่อคุณสมบัตินี้ในทางตรงกันข้ามการผสมสารจำพวกนี้มีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีการเยิ้มและการแยกตัวน้อยลงรวมทั้งความต้องการน้ำในส่วนผสมก็น้อยลงด้วยซึ่งล้วนเป็นผลดีต่อคุณสมบัติในด้านนี้ดังนั้นหากพิจารณาผลทั้งหมดพบว่าการใส่สารจำพวกนี้มีส่วนช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในด้านนี้โดยทำให้คอนกกรีตมีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านได้ดีขึ้น การผสมสารผสมเพิ่มจำพวกแร่ธาตุ (Mineral Admixture) เช่นซิลิก้าฟูมก็มีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในด้านการต้านทานการซึมผ่านที่ดีขึ้นเช่นกันโดยสารผสมเพิ่มชนิดนี้เป็นวัสดุผงละเอียดได้จากกระบวนการผลิตโลหะซิลิกอนหรือเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยส์ (Ferro-Silicon Alloy) เป็นผงมีความละเอียดสูงมาก (ขนาดเล็กกว่าผงปูนซีเมนต์ประมาณ 70 - 100 เท่า) ประกอบด้วยออกไซด์ของธาตุซิลิกอนกว่า 90% ราคาแพงมากทำปฏิกิริยาเร็วมากให้

คอนกรีตกำลังสูงลดการเยิ้มและการแยกตัวให้ความทึบน้ำสูงเนื่องจากมีอนุภาคที่เล็กจึงสามารถอุดช่องว่างขนาดเล็กในเนื้อคอนกรีตได้รวมทั้งด้วยคุณสมบัติที่เป็นสารปอซโซลานจึงสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและให้ C-S-H ซึ่งเป็นสารที่ให้กำลังรวมทั้งยังเป็นตัวอุดช่องว่างระหว่างรูพรุนในเนื้อคอนกรีตดังที่ได้กล่าวมาแล้วแต่ข้อด้อยของการใช้ซิลิก้าฟูมคือความสามารถในการทำงานไม่ดีนักดังนั้นจึงต้องใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างมาก (Superplasticizer) ในการทำคอนกรีตคุณภาพสูง (High Performance Concrete) สารชนิดนี้มีทั้งชนิดเป็นผงและชนิดของเหลวซึ่งได้จากการผสมร่วมกับน้ำในอัตราส่วน 50:50 อัตราการใช้ประมาณ 10% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ คุณสมบัติที่กล่าวมาเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตนอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้านอื่นๆอีกเช่นกำลังต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength), โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Modulus of Elasticity), การล้าของคอนกรีต (Creep), การเปลี่ยนแปลงปริมาตร, การนำความร้อน,หน่วยน้ำหนักและความคงทนเป็นต้นซึ่งในหัวข้อถัดไปจะขอกล่าวถึงเรื่องความคงทน (Durability) ของคอนกรีตซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากของคอนกรีตอย่างละเอียด

2.2 ประเภทของมวลรวม

มวลรวมหรือวัสดุผสม (Aggregate) คือวัสดุเฉื่อย อันได้แก่ หิน ทราย กรวด มวลรวมเป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีตเนื่องจากมีปริมาตรร้อยละ70–80ของปริมาณของส่วนผสมทั้งหมด ดังนั้นคุณภาพของมวลรวม จึงมีผลอย่างมากต่อคุณสบัติของคอนกรีตและจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องให้ความสนใจในเรื่องนี้อย่างมากในอดีตมวลรวมถูกคิดว่า เป็นเพียงวัสดุเฉื่อยที่ใช้เป็นตัวแทรกประสานโดยกระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์เท่านั้นในปัจจุบันพบว่ามวลรวมยังทำหน้าที่อื่นที่สำคัญอีกประการแรกเนื่องจาก มวลรวมเป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่มีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นในส่วนผสมของคอนกรีตจึง ควรใช้ปริมาณมวลรวมให้พอเหมาะเพื่อที่จะใช้ปริมาณปูนซีเมนตล์ดลงประการต่อมาคุณสมบัติของมวลรวมจะช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน (Durability) และปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก (Volume Stability) รวมทั้ง มวลรวมยังทำหน้าที่ต้านทานน้ำหนักที่เกิดลงบนคอนกรีตด้วยกำลังและคุณสมบัติทางกายภาพอีกหลายประการของมวลรวมมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ทั้งในสภาพที่เป็นคอนกรีตเหลวและคอนกรีตแข็งตัวแล้วดังนั้นการเลือกใช้มวลรวมที่เหมาะสมไม่เพียงแต่เป็นการประหยัด แต่ยังคงช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้นด้วย มวลรวมที่ดีที่จะส่งให้ คอนกรีตมีความทนทานสูง ควรมีคุณสมบัติพื้นฐานที่ดีดังนี้ คือ ต้องมีความคงทนไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อเสถียรภาพทางปริมาตรของคอนกรีต และมวลรวมต้องไม่มีสิ่งเจือปนสารที่มีผลเสียต่อกำลังและความคงตัวของซีเมนต์เพสต์

คุณสมบัติ ของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็ง ตัวแล้วขึ้นอยู่กับขบวนการย่อยแปรสภาพของมวลรวม

2.2.1 ประเภทของมวลรวม

มวลรวมสามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

ก. มวลรวมที่เกิดจากธรรมชาติ (Natural Mineral Aggregate) เกิดจากขบวนการกัดกร่อนและเสียดสีตามธรรมชาติ

ข. มวลรวมที่มนุษย์ทำขึ้น (Artificial Aggregate) เช่น มวลรวมเบาบางประเภทที่ ได้ จากการเผาดิน เป็นต้น

ถ้าแบ่งมวลรวมตามความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนัก จะแบ่งได้ 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 (HeavyweightAggregate)มีความหนาแน่นมากกว่า 4,000กก./ลบ.ม. หรือ ถ้าแบ่งมวลรวมตามขนาดเราสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มกลุ่มแรกคือ มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ได้แก่ หินกรวดที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มม. ขึ้นไป หรือค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 กลุ่มที่สอง คือ มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ได้แก่ ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มม. หรือ สามารถผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มม. หรือ ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 ส่วนที่มีขนาดเล็กกว่ามวลรวมละเอียดซึ่งมีอยู่จำนวนน้อยมากในส่วนผสมคอนกรีต สามารถแบ่งได้เป็น Silt (ขนาดประมาณ 0.07 มม.)และดินเหนียว(ขนาดอยู่ช่วง0.00–0.06 มม.)

2.2.2 การเก็บรักษามวลรวม

ระหว่างการขนย้ายและกองเก็บมวลรวมไว้รอการใช้งานหรือขนย้ายต่อไปอาจเกิดผลเสีย คือการแยกแยะของมวลรวมขนาดต่างๆกันและการแตกหักของมวลรวมการแยกแยะ เกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของมวลรวมในระนาบเอียง มวลรวมขนาดใหญ่ที่หนักกว่า มักไหลลงไป รวมกันใกล้เชิงระนาบเอียง ส่วนมวลรวมขนาดเล็กกว่าคงติดค้างอยู่ตอนบนของระนาบเอียง นอกจากนี้ควรระมัดระวังการเท่มวลรวมเมื่อมีลมแรง เพราะลมสามารถพัด พามวลรวมขนาดเล็ก ไปได้ไกลกว่าขนาดใหญ่กว่าวิธีการป้องกันที่ดีก็โดยการแยกเก็บมวล

2.3 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน(pozzolanicmaterials) คือวัสดุที่มีองคประกอบหลักเปน ซิลิกอน ออกไซด (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด (Al_2O_3) และ/หรือ เฟอรริกออกไซด (Fe_2O_3) รวมปริมาณไมต่ำกว่า รอยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุนั้นอาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไมก็ได แตตองสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด แลวเกิดเปนสารประกอบของ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ปอซโซลานมีสองชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural pozzolan) และปอซโซลานดัดแปลง (modify pozzolan) มีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural pozzolan) ไดแก หินดินดาน (shales) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) เถ้าภูเขาไฟ (volcanic ash) หินภูมิไซท์ หินโอเพิลเหลือง pumisite (opaline) หินชั้น (shale) หินเชิรต (chert) หินปูน (limestone) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เมื่อต้องการนำไปใช้งานจะต้องนำมาบดก่อน

2.3.2 ปอซโซลานดัดแปลง (modify pozzolan)

ปอซโซลานดัดแปลงเกิดจากขบวนการ ผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเปนผลพลอยได (By Products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพ โดยผานขบวนการผลิตที่ซับซอนขึ้นซึ่งโดยมากจะเปนขบวนการเผาไหม ปจจุบันปอซโซลาน ดัดแปลงที่พบไดแก เถาลอย (fly ash) ไดจากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟา ซิลิกาฟูม (silica fume) จะไดมาจากการผลิตโลหะอัลลอยดและตะกรันเตาถลุงเหล็ก(slag) ไดจากการถลุงเหล็ก เปนตน

ปฏิกริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไมก็ไดแตตองทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด ($Ca(OH)_2$) แลวเกิดเปนสารประกอบของ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH)และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กลาวคือ เมื่อ ปูนซีเมนตทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งจะไดผลิตภัณฑเปนสารประกอบ แคลเซียมไฮดรอกไซด ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซดนี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด $SiO)_2$) และอลูมิเนียมออกไซด $Al)_2O_3$) ในวัสดุปอซโซลาน เกิดเปนสารประกอบที่เรียกวาแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ไดทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanicreaction)สรุปเปนสมการทางเคมีได ดังสมการที่ 2.2 ถึง 2.3 ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีสวนประกอบหลักทางเคมีเปนซิลิคอนไดออกไซด (SiO_2) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการไดดังนี้

$$3CaOH_2 + 2SiO_2 \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O \text{ หรือ (CSH)} \quad (2.2)$$

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีสวนประกอบหลักทางเคมีเปนอลูมิเนียมออกไซด $Al)_2O_3$) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเปนสมการไดดังนี้

$$3CaOH_2 + 2Al_2O_3 \rightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O \text{หรือ(CAH)} \quad (2.3)$$

2.4 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถาถานหินหรือเถาลอย (fly ash หรือpulverized) จัดเปนสารผสมเพิ่มในปูนซีเมนต จำพวกสารปอซโซลานสังเคราะหหรือปอซโซลานดัดแปลงประเภทหนึ่งเปนผลพลอยได (by-product) จากการเผาถานหินเพื่อเปนพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟาถานหินที่บดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อนเถ้าถานหนิที่มีนาดคอนข้างใหญจะตกลงกนเตาจึงเรียกวาเถากนเตา (bottom ash) สวนเถ้าถานหินที่ขนาดเล็กกวา 1 ไมครอนจนถึงประมาณ 200 ไมครอนจะลอยไปกับอากาศรอนจึงเรียกวาเถาลอยเถาลอยจะถูกดักจับฝุน (electrostatic precipitation) เพื่อไมใหออกไปกับอากาศร้อนเนื่องจากจะเปนมลภาวะต่อพื้นทีโดยรอบบริเวณโรงไฟฟ้า

2.4.1 ชนิดของเถาลอยมาตรฐานASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเปน 2 ชนิดได้แก่

ก. เถ้าลอยชนิด F (Class F)

เปนเถาลอยที่ไดจากการเผาถานหินแอนทราไซต และบิทูมินัสมีปริมาณผลรวมของซิลิกา (silica : SiO_2) และอลูมินา (alumina : Al_2O_3) และเฟอรริคออกไซด (ferric oxide : Fe_2O_3) มากกวา รอยละ70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.3 โดยทั่วไปเถาลอยชนิดF มีปริมาณแคลเซียมออกไซด (calcium oxide : CaO) ต่ำดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งวา เถาลอยแคลเซียมต่ำสำหรับ SiO_2 มาจากแรดินเหนียวและควอรตซ ถานหินแอนทราไซต และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงใหเถาลอยที่มี SiO_2 สูง

ข. เถ้าลอยชนิด C (Class C)

เปนเถาลอยที่ไดจากการเผาถ่านหินลิกไนต และซับบิทูมินัสเปนสวนใหญ มีปริมาณของ $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ มากกวารอยละ50 ปริมาณ CaO สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTMC618 ดังตารางที่ 2.1 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกอีกอยางหนึ่งวาเถ้าลอยแคลเซียม สูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแรดินเหนียวโดยที่ลิกไนตประกอบไปดวยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3ต่ำด้วย

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐานASTM C618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์ ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) อย่างต่ำ,ร้อยละ	70	50
ซัลเฟอรไตรออกไซด์ (SO_3) อยางสูง รอยละ	5	5
ปริมาณความชื้นสูงสดุ , รอยละ	3	3
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา(LOI) อยางสูง,รอยละ ปริมาณอัล	6	6
คาไล สูงสุดเมื่อเทียบเท่าNa_2O, รอยละ	1.5	1.5

นอกจากจะแบงแยกชนิดของเถาถานออกเปน 2 ชนิดดังกลาวมายังสามารถพิจารณาจากความแตกต่างของสวนประกอบและคุณสมบัติในดานความเปนซีเมนต์ (cementitious) และความเปนปอซโซลาน (pozzolan) ไดดวยเนื่องจากเถาลอย Class C โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติการเปนซีเมนตเพิ่มขึ้นจากคุณสมบัติปอซโซลานเพราะเถาถานหิน Class C มักจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ10 ส่วน Class F มีแคลเซียมออกไซดต่ำกวารอยละ10 ดังนั้นการนำเถาถานหินมาใชในงานคอนกรีตธรรมดาทั่วไป ACI 226 (1987) ไดแนะนำว่าควรใชเถาถานหิน Class F ในปริมาณรอยละ15 ถึง25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และสามารถเพิ่มเปนรอยละ15 ถึง35 ไดในกรณีที่ใชเถาถานหิน Class C เนื่องจากพบวาเถาถานหิน Class C จะมีลักษณะความเปนซีเมนต์มากกว่า เพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ สูงกว่าเถาถ่าน Class F

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก.) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใชแทนปูนซีเมนตบางสวนในคอนกรีตที่ใชปูนซีเมนตปอรตแลนดเปนวัสดุประสานหลัก โดยแบงชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมีไดเป็น 3 ชั้นคุณภาพดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ

ตัวอย่างเถ้าลอย	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	LOI
แม่เมาะ	41.16	22.30	11.51	15.27	2.70	1.43	2.93	1.66	0.20
ระยอง	45.24	28.25	2.43	11.80	0.74	3.63	0.66	0.47	2.96
กาญจนบุรี	39.56	20.99	9.37	13.62	1.47	3.34	3.08	0.30	7.10
ราชบุรี	32.96	13.81	6.69	24.42	1.44	10.56	2.38	0.61	7.05
ปราจีนบุรี	42.03	18.97	4.44	4.91	1..01	19.68	0.28	0.72	3.65

2.4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องคประกอบทางเคมีของเถาลอยขึ้นอยูกับองคประกอบทางเคมีของถานหิน แตโดยทั่วไปองคประกอบทางเคมีของเถาลอยจะคลายกับปูนซีเมนตปอรตแลนด คือประกอบดวยซิลิกาออกไซด (SiO_2) อลูมินาออกไซด (Al_2O_3) ไอออนออกไซด (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด (CaO) เปนองคประกอบหลักและมีแมกนีเซียมออกไซด (MgO) ออกไซดของอัลคาไล(Na_2O, K_2O) และซัลเฟอรไตรออกไซด(SO_3) เปนองคประกอบรองนอกจากนี้ยังประกอบไปดวยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา(loss on ignition : LOI) SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 และ CaOเปนองคประกอบหลักมีปริมาณถึงรอยละ80-90 จึงเปนตัวกำหนด คุณสมบัติของเถาถานหินมาตรฐานASTM C618 กำหนดผลรวมของSiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 ของเถาลอยไวอยางต่ำร้อยละ50 ถึงจะอยูในเกณฑที่นำไปใชงานได

2.4.3 ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอย

ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถาลอยเปนส่วนผสมจะเริ่มจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (hydration) ดังสมการที่ 2.14 ถึง 2.15 ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต และน้ำทำให้ไดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2$ $3H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด ($Ca(OH_2)$ หรือ CH) หลังจากนั้นวัสดุปอซโซลานในที่นี้คือเถาลอยซึ่งมีองคประกอบ

ของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ดังสมการที่ 2.14 และ/หรือสมการที่2.15 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) ผลผลิตของปฏิกิริยานี้จะได้สารประกอบ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต(CAH) เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

2.5 มวลรวมจากเศษคอนกรีต

รัฐพล สมนา และคณะ, ปี 2553 มวลรวมจากเศษคอนกรีต หรือ Recycled Concrete Aggregate ตามคาจากัดความของ (ว.ส.ท. 1014 ,25) หมายถึง มวลรวมที่เคยใช้แล้วซึ่งประกอบด้วยวัสดุก่อสร้างจากคอนกรีตที่แตก หรือวัสดุเหลือใช้จากการรื้อสิ่งก่อสร้าง ซึ่งอาจเป็นมวลรวมหยาบหรือมวลรวมละเอียด ดังนั้นมวลรวมที่ได้จากเศษคอนกรีตจึงเป็นมวลรวมที่ มีคุณภาพที่ต่ำกว่ามวลรวมที่ได้จากการย่อยหินตามธรรมชาติ เพราะมีการดูดน้ำที่สูง มีความแข็งแกร่งต่ำ สึกหรอได้ง่ายเมื่อเทียบกับมวลรวมที่ได้จากธรรมชาติ เมื่อนำมวลรวมที่ได้ จากเศษคอนกรีตไปเป็นส่วนผสมในคอนกรีตพบว่าคุณภาพของคอนกรีตจะต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ หินย่อยจากธรรมชาติเป็นส่วนผสม ดังนั้นจะต้องเข้าใจปัญหาและอุปสรรคของการใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต จึงทำให้เข้าใจการนำมวลรวมจากเศษคอนกรีตมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่ก่อให้เกิดปัญหาตามมาในภายหลัง ปัญหาของการใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตในคอนกรีต ในการย่อยเศษคอนกรีตดังกล่าวอาจต้องมีการล้างด้วยน้ำเพื่อขจัดฝุ่นหรือสิ่งสกปรกบางอย่างที่อาจปะปนมาและเป็นอันตรายต่อคอนกรีต เช่น เศษดิน ซากใบไม้ พืชเน่า วัสดุที่ปนมา เป็นต้น มวลรวมจากเศษคอนกรีตมักมีลักษณะและคุณภาพที่ต่ำกว่ามวลรวมที่ได้จากธรรมชาติ โดยทั่วไปมักมีคุณภาพที่ต่ำกว่าไม่ว่าจะเป็นเรื่องขนาด ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำร้อยละ การสึกกร่อนจากการขัดสี เป็นต้น นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมดังกล่าวในส่วนผสมมักมี 6 คุณสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ เช่น ด้านกาลังอัด โมดูลัสความ ยื

2.6 งานวิจัยที่ผ่านมา

การพัฒนาคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษ คอนกรีตด้วยวัสดุปอซโซลาน (รัฐพล สมนา และคณะ, ปี 2553) จากข้อมูลเบื้องต้นที่นำเสนอพบว่ามวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษ คอนกรีตมีคุณภาพและคุณสมบัติที่ต่ำกว่ามวลรวมที่ได้จากการย่อยหินที่ได้จากธรรมชาติ จึงคาดหมายได้ว่าย่อมทำให้คุณภาพของคอนกรีตต่ำลง และเป็นเหตุผลสำคัญที่ผู้รับผิดชอบที่โรงงานผสมคอนกรีต ไม่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตในส่วนผสมของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ในประเทศไทยเริ่มพบว่ามีการรื้อถอนอาคารคอนกรีต

ขณะที่หน่วยบางแห่งได้ลงทุนซื้อเครื่องจักรเพื่อทาการย่อยคอนกรีตเหล่านี้เพื่อนำเหล็กเสริมออกมาใช้ประโยชน์ และทำการย่อยเศษคอนกรีตให้มีขนาดเล็กลง และนาไปใช้เป็นวัสดุถมในการสร้างถนน ซึ่งเป็นการนำเศษคอนกรีตกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้งหนึ่ง วัสดุปอซโซลานหลายชนิด เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย หรือเถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น พบว่าเมื่อมีความละเอียดสูง ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ไม่มากจนเกินไป และมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสม สามารถพัฒนาคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติได้ดี ดังนั้นแนวคิดในการนำวัสดุปอซโซลานมาพัฒนาคุณภาพของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมจากการ ย่อยเศษคอนกรีตจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งในการลดจุดด้อยของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษ คอนกรีตในส่วนผสม

Ann และคณะ (2008) ได้ศึกษากำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 30 พบว่าสามารถช่วยพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบเท่ากับคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีขึ้น

Etxeberria และคณะ (2007) ศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณมวลรวมรีไซเคิลและขั้นตอนการผลิตต่อคุณสมบัติของคอนกรีตรีไซเคิลซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 (ใช้ปูนซีเมนต์เท่ากับ 325 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) จากผลการศึกษาพบว่ากาลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตที่ทาจากมวลรวมหยาบรีไซเคิลทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติทั้งหมดเท่ากับร้อย ละ 20 ถึง 25 ซึ่งเป็นผลจากมอร์ต้าร์ที่ติดอยู่ในมวลรวมรีไซเคิลมีกาลังที่ต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติ และเพสต์ที่ผสมใหม่ ดังนั้นจุดอ่อนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ใช้เพสต์ที่มีกาลังปาน กลางถึงสูงจะขึ้นอยู่กับกาลังของมวลรวมหยาบรีไซเคิลหรือมอร์ต้าร์ที่ติดอยู่ในมวลรวมรีไซเคิล

Hansen และ Narud (1983) ศึกษาผลกระทบจากการใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังแตกต่างกัน 3 ระดับ แทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติในส่วนผสมคอนกรีต พบว่าคอนกรีตสดมีความสามารถในการทำงานลดลงและสูญเสียค่ายุบตัวอย่างรวดเร็ว ขณะที่กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังอัดของเศษคอนกรีตที่นำมาย่อยเพื่อทำเป็นมวลรวมหยาบ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังสูงขึ้น

ในปี ค.ศ. 2002 Limbachiya และคณะศึกษาถึงการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลในคอนกรีตกำลังสูง มวลรวมหยาบธรรมชาติและมวลรวมหยาบรีไซเคิล มวลรวมรีไซเคิลที่ได้มาจากการย่อยเศษคอนกรีตจากชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปที่ไม่ผ่าน มาตรฐาน โดยขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบเท่ากับ 20 มิลลิเมตร มวลรวมรีไซเคิลที่ใช้ในงานวิจัย นี้มีค่าสูงการดูดซึมน้ำเป็นสองเท่าของมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ในขณะที่ค่าความหนาแน่นมีค่า ต่ำกว่ามวลรวมหยาบจาก

ธรรมชาติอยู่ในระหว่างร้อยละ 7 ถึงร้อยละ 9 ทั้งนี้เนื่องจากความพรุน ของซีเมนต์เพสต์ที่ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมหยาบรีไซเคิล ส่วนผลกระทบจากการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่มวลรวมธรรมชาติพบว่าการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบจาก ธรรมชาติไม่เกินร้อยละ30 ไม่ส่งผลกระทบต่อกาลังอัดประลัยของคอนกรีตแต่ถ้าใช้ในปริมาณมากกว่านี้จะส่งผลให้กาลังอัดของคอนกรีตลดลงและทำให้คอนกรีตมีความพรุนตามปริมาณการ แทนที่ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้สรุปไว้ว่ามวลรวมหยาบรีไซเคิลสามารถนามาใช้ใน ส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงโดยคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของคอนกรีต เช่น กำลังอัด กำลังรับแรงดัด และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ยังคงเป็นที่น่าพอใจ

Ravindrajah และ Tam (1985) ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามาใช้เป็นมวลรวมหยาบ ซึ่งนักวิจัยทั้งสองพบว่าคุณภาพของมวลรวมรีไซเคิลขึ้นอยู่กับกำลังและการเสียรูปของคอนกรีตเดิม โดยมวลรวมรีไซเคิลมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า และมีค่า การดูดซึมน้ำสูงกว่ามวลรวมที่ใช้หินธรรมชาติ นอกจากนี้ยังพบว่าความต้านทานต่อการกระแทกการย่อย และการขัดสีของมวลรวมหยาบรีไซเคิล ต่ำกว่าหินแกรนิตย่อยเมื่อน้ำมวลรวมรีไซเคิลมาใช้แทนที่มวลรวมจากธรรมชาติ ในการผสมคอนกรีตพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลงถึง ร้อยละ 25 และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าลดลงถึงร้อยละ 30

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่ามวลรวมหยาบรีไซเคิลมีความแข็งแกร่งต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากมอร์ต้าร์หรือซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในมวลรวมรีไซเคิลมีความแข็งแรง น้อยกว่ามวลรวมธรรมชาติ นอกจากนี้มอร์ต้าร์และซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในมวลรวมรีไซเคิลยังมี ความพรุนสูงกว่ามวลรวมธรรมชาติด้วย ส่งผลให้มีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงตามไปด้วย งานวิจัยที่ผ่านมาได้นำมวลรวมหยาบจากซากคอนกรีตที่ได้จากอาคาร ถนนคอนกรีตและอื่นๆ และที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาการนำเศษคอนกรีตจากฝายกั้นน้ำมาแยกเป็นมวลรวมหยาบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการกำลังอัดของคอนกรีตและการซึมผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 วัน โดยการนำซากคอนกรีตจากฝายกั้นน้ำนำย่อยเป็นมวลรวมหยาบเป็นส่วนผสมในคอนกรีต และใช้เถ้าลอยแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0,10,20,30 และ 40 โดยน้ำหนัก เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตให้ดีขึ้น

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยการหาวัตถุดิบ (มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตฝาย และมวลรวมหยาบธรรมชาติ) การคัดเลือกใช้วัตถุดิบ แหล่งที่ได้มา และกระบวนเตรียมตัวอย่าง เมื่อตัวอย่างได้อายุบ่มครบ 28 วัน จะถูกนำไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและการซึมผ่านน้ำทำตามมาตรฐาน ASTM C67 (2011)

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement : Type I) ตราเพชร ตามมาตรฐาน ASTM C 150-02a

3.1.2 วัสดุผสม (Aggregate)

3.1.2.1 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ใช้ทรายแม่น้ำตามมาตรฐาน ASTM C 33-03 (ทรายจากท่าทรายสิงห์บุรี)

3.1.2.2 มวลรวมหยาบรีไซเคิล ได้จากฝายกั้นน้ำนำมาย่อยโดยการทุบเลือกใช้มวลรวมหยาบที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และขนาดโตสุด¾ นิ้ว จากจังหวัดชัยภูมิ

3.1.2.3 มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ได้จากโรงโม่หิน อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 และขนาดโตสุด¾ นิ้ว

3.1.3 น้ำผสมคอนกรีต (Water) ใช้น้ำประปาซึ่งปราศจากด่าง, น้ำมัน, และอินทรีย์สารอื่นๆในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีต

3.1.4 เถ้าลอย (Fly Ash) จากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

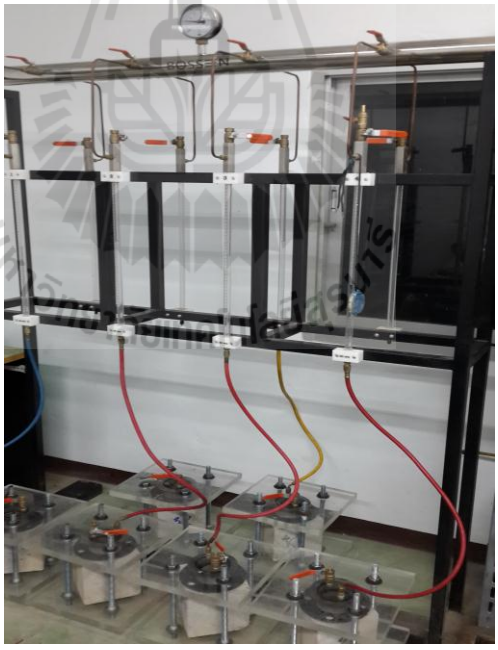
3.1.5 สารลดน้ำชนิด F ร้อยละ 1 ของปริมาณปูนซีเมนต์

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1 เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตแบบ Automatic ขนาด 5000 kN ดังแสดงในรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีตแบบ Automatic ขนาด 5000 kN

3.2.2 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของน้ำ (Bossen Permeability Testing) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของน้ำ

3.3 การหาคุณสมบัติของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

3.3.1 วิเคราะห์การกระจายขนาดและค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมด้วยตะแกรงตามมาตรฐาน ASTM C 136 เพื่อวิเคราะห์ขนาดกระจายตัวและขนาดโดยเฉลี่ยของมวลรวมโดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 33

3.3.2 ทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตตามมาตรฐานASTM C 127 การดูดซึมน้ำของมวลรวมเป็นค่าที่แสดงถึงการดูดซึมน้ำเข้าไปเก็บไว้ในมวลรวม

3.3.3 ทดสอบความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C 128 ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำของวัสดุต่อน้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรของวัสดุนั้น

3.3.4 ทดสอบค่าการสึกหรอด้วยเครื่องลอสแองเจลิสตามมาตรฐาน ASTM C 33 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบน้ำหนักของมวลรวมทั้งก่อนและหลังการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 33 กำหนดให้มวลรวมหยาบมีค่าการสึกหรอไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

3.3.5 ทดสอบหน่วยน้ำหนักของมวลรวมและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C 29 โดยหน่วยน้ำหนักของมวลรวมคือน้ำหนักของมวลรวมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตร ส่วนปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมคือร้อยละของช่องว่างต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

3.4 สัญลักษณ์ของอัตราส่วนผสมและสัดส่วนผสมคอนกรีต

ตารางที่ 3.1 แสดงสัญลักษณ์และจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ทดสอบกำลังอัด		**ทดสอบการซึมผ่านน้ำ**	
ชื่อตัวอย่าง	**จำนวนตัวอย่าง**	**ชื่อตัวอย่าง**	**จำนวนตัวอย่าง**
0.3F10	3	0.3F10	2
0.3F20	3	0.3F20	2
0.3F30	3	0.3F30	2
0.3F40	3	0.3F40	2
0.3R	3	0.3R	2
0.3N	3	0.3N	2
0.5F10	3	0.5F10	2

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

ทดสอบกำลังอัด		ทดสอบการซึมผ่านน้ำ	
ชื่อตัวอย่าง	**จำนวนตัวอย่าง**	**ชื่อตัวอย่าง**	**จำนวนตัวอย่าง**
0.5F20	3	0.5F20	2
0.5F30	3	0.5F30	2
0.5F40	3	0.5F40	2
0.5R	3	0.5R	2
0.5N	3	0.5N	2

0.3 หมายถึงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.3

0.5 หมายถึงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5

RF10 หมายถึงคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลและใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

RF20 หมายถึงคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลและใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

RF30 หมายถึงคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลและใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

RF40 หมายถึงคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลและใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

R หมายถึงคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล

N หมายถึงมวลรวมหยาบที่ได้จากหินธรรมชาติ

สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 3.1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.3 และ 0.5

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมและสัดส่วนผสมคอนกรีต

Mix Proportion of Concrete (kg/m^3)								
sample	**Cement**	**Fly Ash**	**Coarse Aggregate**		**Fine Aggregate**	**Water**	**Admixtue**	**Slump**
			Natural	**Recycle**				
0.3N	617	-	860	-	680	185	6.17	4.8
0.3R	617	-	-	860	680	185	6.17	5
0.3F10	553	62	-	860	680	185	6.17	5.5
0.3F20	494	123	-	860	680	185	6.17	6

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

Mix Proportion of Concrete (kg/m^3)								
sample	Cement	Fly Ash	Coarse Aggregate		Fine Aggregate	Water	Admixtue	Slump
			Natural	Recycle				
0.3F30	432	185	-	860	680	185	6.17	7
0.3F40	370.2	246.8	-	860	680	185	6.17	8
0.5N	370	-	860	-	930	185	3.7	3.5
0.5R	370	-	-	860	930	185	3.7	4.5
0.5F10	333	37	-	860	930	185	3.7	5
0.5F20	296	74	-	860	930	185	3.7	8
0.5F30	259	111	-	860	930	185	3.7	10
0.5F40	222	148	-	860	930	185	3.7	11.5

3.5 การทำตัวอย่างและการบ่ม

ตัวอย่างของคอนกรีตใช้รูปทรงลูกบาศก์ กว้าง15 เซนติเมตร ยาว15 เซนติเมตร สูง15 เซนติเมตร โดยนำคอนกรีตใส่ลงในแบบหล่อโดยแบ่งออกเป็น 3 ชั้นชั้นละเท่ากันแต่ละชั้นตำ 35 ครั้งและชั้นสุดท้ายปาดผิวหน้าให้เรียบ หล่อเก็บไว้ ไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.3 แล้วทำการแกะแบบหล่อและนำตัวอย่างที่หล่อได้ไปบ่มในอ่างแช่ตัวอย่างคอนกรีตจนกระทั่งคอนกรีตมีอายุ 28 วัน ดังรูปที่ 3.4

รูปที่ 3.3 แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ กว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร

รูปที่ 3.4 อ่างแช่ตัวอย่างคอนกรีต

3.6 กระบวนการทดสอบ

ช่วงที่ 1 ทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.3 และ0.5 เมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน โดยทดสอบก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ตามส่วนผสมตามตารางที่ 3.1 ทั้งหมด 36 ตัวอย่าง

ช่วงที่ 2 ทดสอบหาค่าความลึกในการซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตตามส่วนผสมในตารางที่ 3.4 อาศัยหลักการให้น้ำไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตด้วยแรงดันน้ำคงที่อย่างต่อเนื่อง

3.7 วิธีการทดสอบ

3.7.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน นำตัวอย่างที่หล่อออกจากบ่อบ่ม มาผึ่งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เลือกหน้าตัวอย่างเฉพาะด้านที่เรียบ 2 ด้านที่ตรงข้ามกันทำเครื่องหมายไว้เพื่อจะใช้รับแรงกด ทำการวัดขนาด (กว้าง ยาว และสูง) และชั่งน้ำหนัก นำตัวอย่างไปทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตขนาด 5000 kN

3.7.2 การทดสอบหาค่าความพรุนในเนื้อคอนกรีต

การทดสอบความพรุนของเนื้อคอนกรีตของก้อนตัวอย่างทำตามมาตรฐาน ASTM C67 (2011) โดยการทดสอบมีขั้นตอนดังนี้

1. นำก้อนตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดมาสกัดให้เหลือชิ้นส่วนของก้อนตัวอย่างประมาณ 1 ใน 3 ของก้อนตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 ก้อนตัวอย่างที่ถูกสกัด

2. นำก้อนตัวอย่างจากข้อที่ 1 แช่น้ำไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง แล้วนำก้อนขึ้นจากน้ำซับด้วยผ้าแห้งชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าเป็นค่า B มีหน่วยเป็นกรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.6

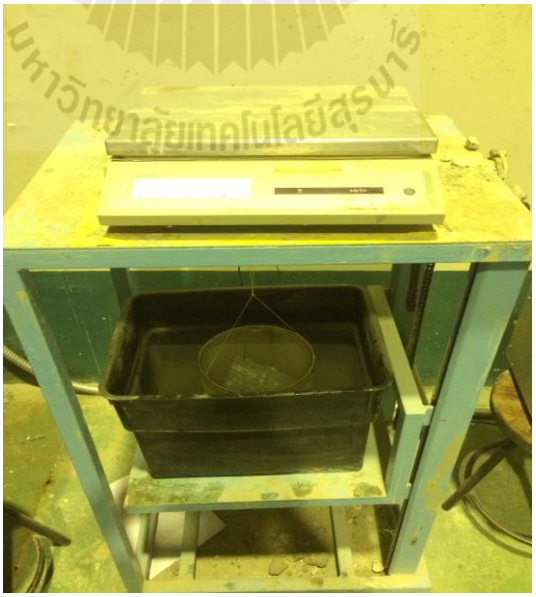
รูปที่ 3.6 ก้อนตัวอย่างที่ถูกนำแช่ไปแช่ในน้ำ

3. นำก้อนตัวอย่างจากข้อที่ 2 ไปต้มที่น้ำเดือด เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วปิดไฟตั้งทิ้งไว้ไม่น้อยกว่า 14 ชั่วโมง จนตัวอย่างเย็นลงจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง

หลังจากนั้นนำก้อนตัวอย่างมาซับด้วยผ้าแห้ง ชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าเป็นค่า C มีหน่วยเป็นกรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.7 การต้มก้อนตัวอย่างหลังจากชั่งน้ำหนักในข้อที่ 2

4. นำก้อนตัวอย่างจากข้อที่ 3 ไปชั่งในน้ำ บันทึกค่าเป็นค่า D มีหน่วยเป็นกรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ก้อนตัวอย่างที่นำไปชั่งในน้ำเพื่อหาน้ำหนัก

5. นำก้อนตัวอย่างจากข้อที่ 4 เข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำก้อนตัวอย่างออกจากตู้อบมาชั่งน้ำหนักบันทึกค่าเป็นค่า A มีหน่วยเป็นกรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.9

รูปที่ 3.9 ก้อนตัวอย่างที่ถูกนำไปเข้าตู้อบ

6. นำค่าที่ได้ทั้งหมด มาคำนวณหาค่าในสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Bulk density,dry} = \frac{A}{(C-D)} \times \rho = g1 \qquad (3.2)$$

$$\text{Apparent density} = \frac{A}{(A-D)} \times \rho = g2 \qquad (3.2)$$

$$\text{Volume of Permeable Pore Space (Voids), \%} = \frac{(g1-g2)}{(g2} \times 100 \qquad (3.3)$$

3.7.3 การทดสอบค่าความลึกในการซึมผ่านของน้ำในเนื้อคอนกรีต

การทดสอบค่าความลึกในการซึมผ่านของน้ำในเนื้อคอนกรีตของก้อนตัวอย่างทำตามมาตรฐาน ASTM C642-90 โดยใช้เครื่องทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตตามข้อ 3.4.1 และ 3.4.2 ตามอายุของตัวอย่างคอนกรีตที่ 28 วัน รวม 24 ตัวอย่าง ขั้นตอนในการใช้เครื่องทดสอบมีดังนี้

1. เอาตัวอย่างที่จะทดสอบมาใส่ที่เซลล์หลังจากนั้นทำการขันน๊อตทั้ง 4 ด้านให้แน่น ต่อสายแรงดันสูงเข้ากับเซลล์ ซึ่งจะต้องทำการขันให้แน่นดังแสดงในรูปที่ 3.10

รูปที่ 3.10 การประกอบติดตั้งตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

2. เติมน้ำผ่านวาล์ว ตัวที่ 1 จนน้ำเต็มเซลล์ เมื่อน้ำเต็มเซลล์จึงทำการปิดเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.11

รูปที่ 3.11 เติมน้ำผ่านวาล์ว

3. เติมน้ำจนกระทั่งน้ำอยู่ในหลอดวัด (Transparent Tube) แล้วจึงทำการปิดวาล์วตัวที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.12

รูปที่ 3.12 หลอดวัด (Transparent Tube)

4. เปิดวาล์วตัวที่ 3 และ 4 แล้วทำการต่อสายทนแรงดันสูง เข้ากับถังออกซิเจนที่มีชุดควบคุมแรงดันอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.13

รูปที่ 3.13 ต่อระบบแรงดันของชุดทดสอบ

5. ทำการปรับแรงดันโดยดูจากเกจวัดที่ติดอยู่ที่ชุดโครงทดสอบ ทำการทดสอบอยู่ที่ 5 bar เป็นเวลา 24 ชั่งโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.14

รูปที่ 3.14 เกจวัดแรงดัน

6. นำตัวอย่างออกจากเซลล์และผ่าตัวอย่างเพื่อวัดความลึกของการซึมผ่านแล้ววัดระยะบันทึกค่าเป็นค่า d (เมตร) ดังแสดงในรูปที่ 3.15

รูปที่ 3.15 ชิ้นตัวอย่างที่นำออกจากเซลล์และที่ถูกผ่าวัดความลึก

7. นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Coefficient of permeability, m/sec} = \frac{d^2 v}{2Th} = Kp \qquad (3.4)$$

d = depth of penetration ,m

Kp = Coefficient of permeability, m/sec

T = time to penetrate depth d, sec

h = pressure head, m

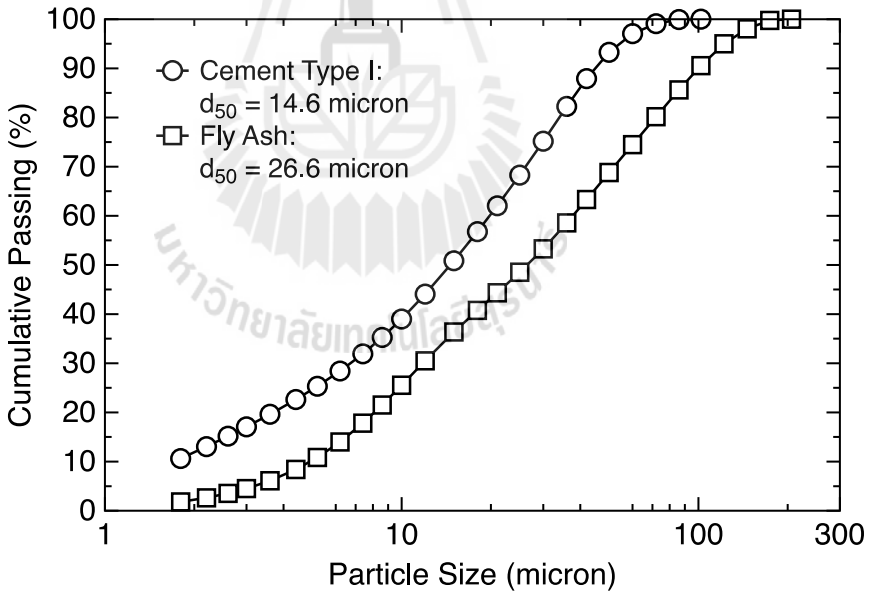
v = porosity of the concrete in fraction (%)

บทที่ 4
ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลหยาบรวมธรรมชาติและมวลรวมหยาบรีไซเคิล (ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตจากการรื้อฝายกั้นน้ำ ผลการทดสอบกำอัดและการซึมน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลทั้งที่ผสมและไม่ผสมเถ้าลอยเปรียบเทียบกับของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินธรรมชาติ

4.1 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน

ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ แสดงดังรูปที่ 4.2 สำหรับคาของขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ร้อยละค้างที่สะสมที่ 50) ของวัสดุประสานแตละชนิดเป็นดังนี้ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 14.6 ไมโครเมตร สวนเถาลอยนั้นมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเทากับ 26.6 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1



รูปที่ 4.1 กระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน

4.2 คุณสมบัติของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 4.1 งานวิจัยนี้ใช้ทรายแม่น้ำซึ่งมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.73 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.56 ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 1.39 และมีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1689 กก/ม^3 เป็นมวลรวมละเอียด (ดังรูปที่ 4.2)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย

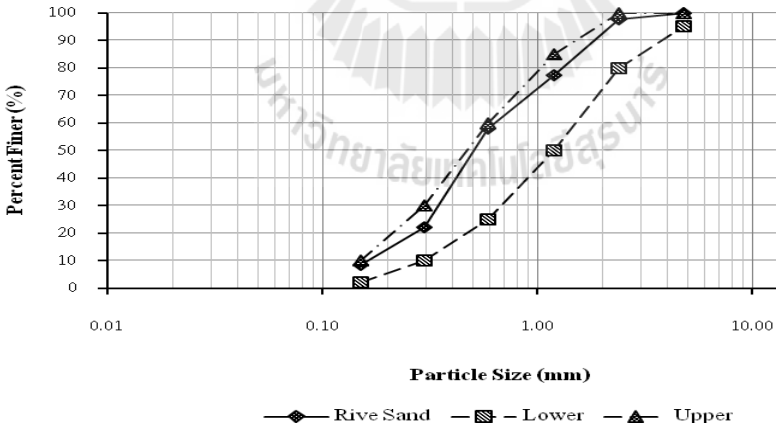
Properties	**River sand**	**Natural Coarse Aggregate**	**Recycled Aggregate**
Fineness Modulus	3.73	7.47	7.02
Bulk Specific Gravity in SSD	2.56	2.67	2.57
Water Absorption (%)	1.39	0.61	3.10
Dry-Rodd Weight (kg/m^3)	1689	1611	1330
Los Angeles Abrasion Loss (%)	-	19	40

มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ (หินธรรมชาติ) ดังรูปที่ 4.3 มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 7.47 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.67 ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.61 หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1611 กก/ม^3 และการสึกหรอจากการขัดสีเท่ากับร้อยละ 19 โดยน้ำหนัก มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตจากการรื้อถอนฝายกั้นน้ำหรือมวลรวมหยาบรีไซเคิล ดังแสดงในรูปที่ 4.4 มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 7.02 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับหินธรรมชาติ ความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่าเท่ากับ 2.57 และ 1330 กก/ม^3 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าของหินธรรมชาติ เนื่องจากมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีเศษมอร์ต้าร์ซึ่งมีความพรุนเกาะติดอยู่ที่ผิวของมวลรวม มวลรวมรีไซคิลมีค่าการดูดซึมน้ำและค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีเท่ากับร้อยละ 3.10 และ 40 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าหินธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากการที่มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีเศษมอร์ต้าร์ซึ่งมีความพรุนเกาะติดอยู่ที่ผิวของมวลรวม และมอร์ต้าร์ที่ติดอยู่นั้นมีความแข็งแกร่งต่ำกว่าหินธรรมชาติ จึงส่งผลให้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีการดูดซึมน้ำที่สูง และแตกหักจากการขัดสีและการกระแทกได้ง่ายกว่าหินธรรมชาติ

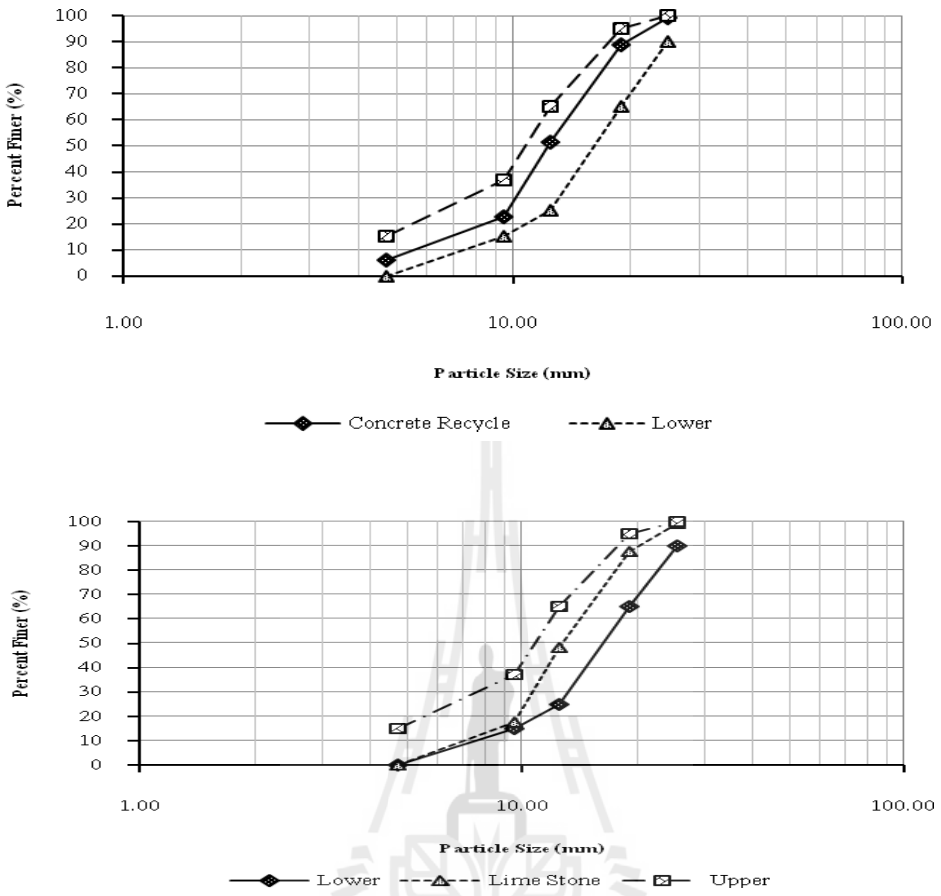
รูปที่ 4.2 มวลรวมละเอียด (ทรายแม่น้ำ)

รูปที่ 4.3 มวลรวมหยาบธรรมชาติ (หินธรรมชาติ)

รูปที่ 4.4 มวลรวมหยาบรีไซเคิล (หินรีไซเคิล)



รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียด



รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของมวลรวมหยาบทั้ง 2 ชนิด

รูปที่ 4.5 แสดงการกระจายตัวของขนาดทรายแม่น้ำเปรียบเทียบกับค่าขอบบนและขอบล่างของขนาดอนุภาคตามมาตรฐานของ ASTM C 33 พบว่าการกระจายตัวของขนาดเม็ดทรายแม่น้ำอยู่ในขอบเขตบนและขอบเขตล่างตามมาตรฐาน ASTM C 33 การกระจายตัวของขนาดของหินธรรมชาติและหินรีไซเคิล แสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งผู้วิจัยได้คัดขนาดของมวลรวมหยาบทั้ง 2 ชนิด ให้มีส่วนผสมของแต่ละขนาดอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐาน ASTM C 33 จึงทำให้ได้การกระจายตัวของมวลรวมหยาบทั้ง 2 ชนิด อยู่ในขอบเขตบนและล่างตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

4.3 กำลังอัดของคอนกรีต

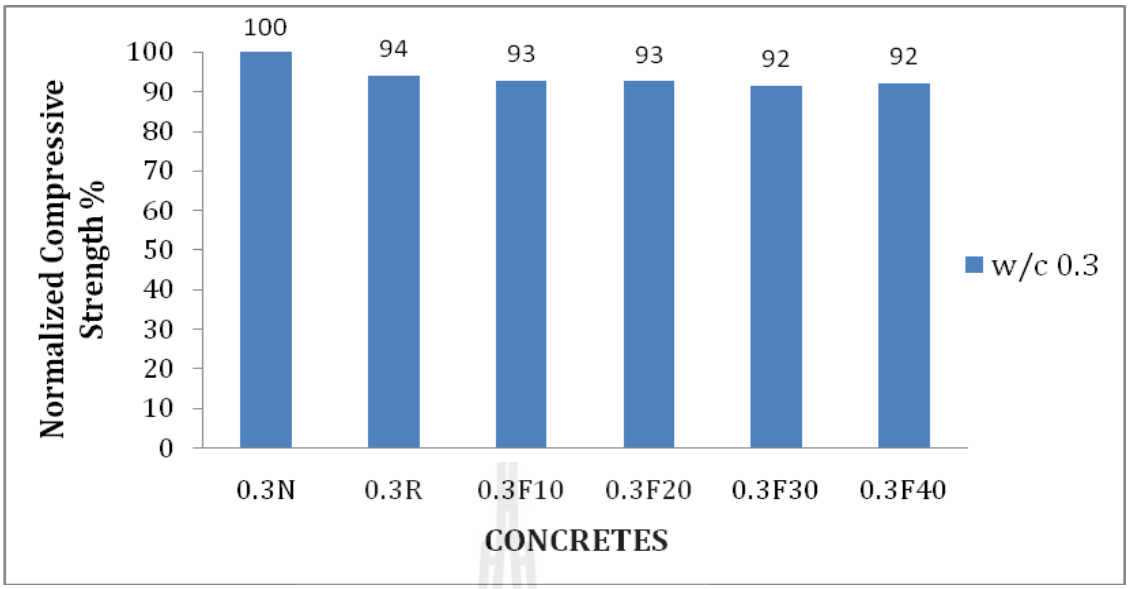
กำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน ของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่าคอนกรีตที่ใช้หินธรรมชาติ (คอนกรีต 0.3N) มีกำลังอัดเท่ากับ 565 กก/ ซม^2 เมื่อใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนที่หินธรรมชาติในส่วนผสมคอนกรีต ส่งผลให้กำลังอัดของ

คอนกรีตมีค่าลดลง โดยกำลังอัดของคอนกรีต 0.3R มีค่าเท่ากับ 531 กก/ ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 94 ของคอนกรีต 0.3N แสดงให้เห็นว่าการใช้หินรีไซเคิลแทนที่หินธรรมชาติทั้งหมด ส่งให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลง ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีมอร์ต้าที่ติดอยู่บริเวณผิวของหินธรรมชาติเดิม จึงทำให้คอนกรีตดังกล่าวมีกำลังลดลง

ตารางที่ 4.2 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3

Sample	**Compressive Strength (kg/cm^2)**		
	(ksc)	$f_c' / f_{c,0.3N}'$	**ผลต่างร้อยละกำลังอัด**
0.3N	565	100	0
0.3R	531	94	-6
0.3F10	524	93	-7
0.3F20	523	93	-7
0.3F30	517	92	-8
0.3F40	521	92	-8

เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ในคอนกรีตที่ใช้หินรีไซเคิล (คอนกรีต 0.3F10, 0.3F20, 0.3F30 และ 0.3F40 ตามลำดับ) พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต 0.3R จนอาจกล่าวได้ว่าไม่แตกต่างกันก็ว่าได้ กำลังอัดของคอนกรีตดังกล่าวมีค่าเท่ากับร้อยละ 93, 93, 92 และ 92 ของคอนกรีต 0.3N ตามลำดับ กำลังอัดของคอนกรีต 0.3R มีค่าเท่ากับร้อยละ 94 ของคอนกรีต0.3N นั่นแสดงให้เห็นว่าการแทนที่เถ้าลอยในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 ไม่ช่วยกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าลอยซึ่งลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์โดยยังทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีต 0.3R แสดงดังรูปที่ 4.7

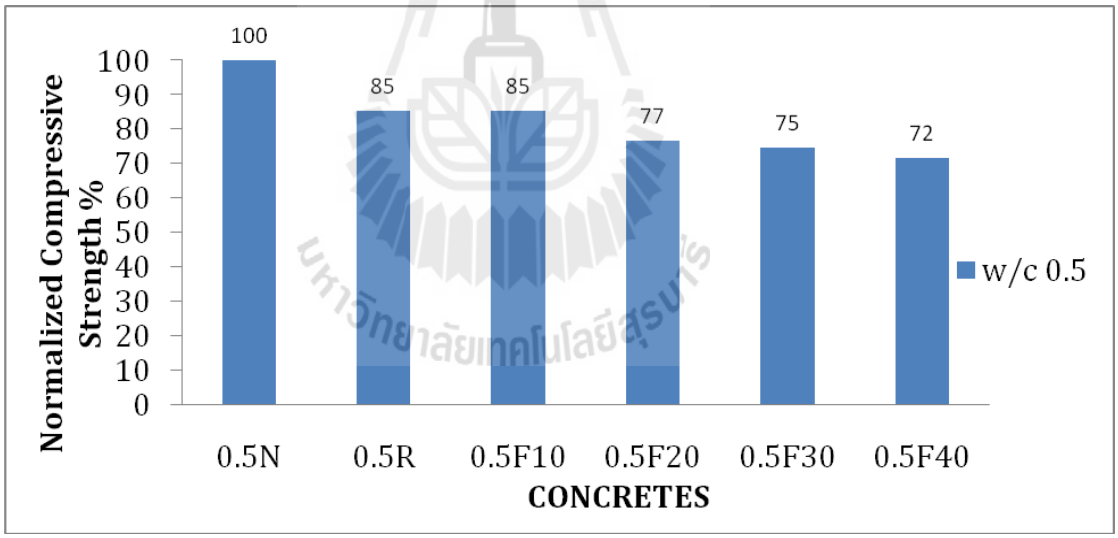


รูปที่ 4.7 ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3

ผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าคอนกรีตที่ใช้หินธรรมชาติหรือคอนกรีต 0.5N มีกำลังอัดเท่ากับ 404 กก/ ซม^2 เมื่อใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนหินธรรมชาติในส่วนผสม พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3กำลังอัดของคอนกรีตดังกล่าว (0.5R) มีค่าเท่ากับ 345 กก/ ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 85 ของคอนกรีต 0.5N การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตดังกล่าว (กำลังอัดเท่ากัน) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเป็นร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่าลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้หินธรรมชาติ (คอนกรีต 0.5N) พบว่าการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลและใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเท่ากับ 23, 25 และ 28 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5

Sample	Compressive Strength (kg/cm^2)		
	(ksc)	f'_c / $f'_{c,0.5N}$	ผลต่างร้อยละกำลังอัด
0.5N	404	100	0
0.5R	345	85	-15
0.5F10	345	85	-15
0.5F20	310	77	-23
0.5F30	301	75	-25
0.5F40	289	72	-28



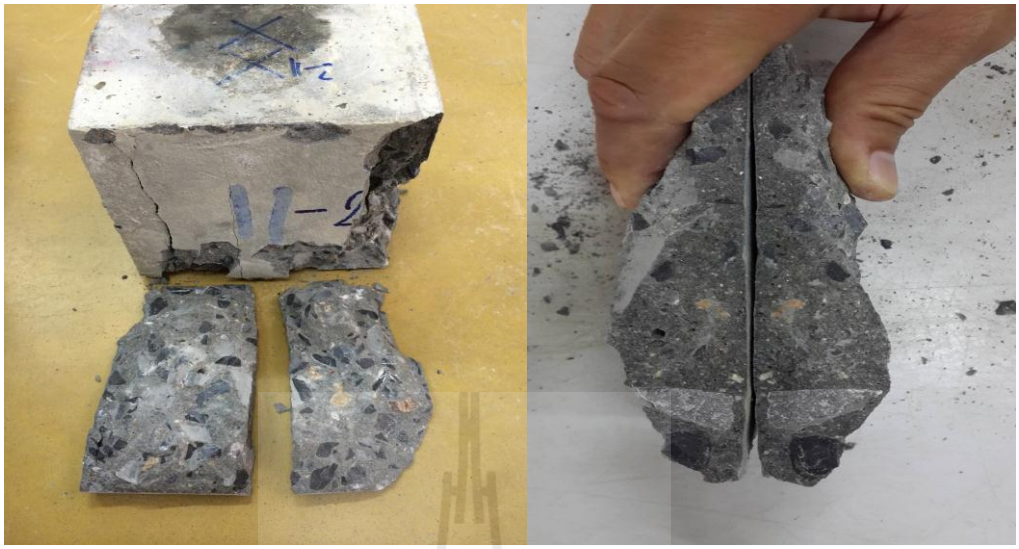
รูปที่ 4.8 ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5

เมื่อนำผลกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 และ 0.5 มาพิจารณา พบว่าการลดลงของกำลังอัดของคอนกรีตจากการนำมวลรวมหยาบรีไซเคิลมาใช้แทนหินธรรมชาตินั้น ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 ลดลงเท่ากับร้อยละ 6 ส่วนคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 ลดลงเท่ากับร้อยละ 15 นั่นแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำ

ต่อวัสดุประสานที่สูง จะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตนั้นลดลงอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 มากกว่าของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 จึงทำให้ปูนซีเมนต์สามารถแทรกเข้าไปประสานช่องว่างระหว่างมวลรวม และมีปริมาณเพียงพอที่จะอุดรูพรุนของมวลรวมหยาบรีไซเคิล และช่วยเชื่อมประสานรอยต่อระหว่างมอร์ต้าร์และหินธรรมชาติเดิมของมวลรวมรีไซเคิลให้มีความแข็งแรงขึ้นกว่าเดิมได้อีก จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 อย่างคอนกรีต 0.3N การลดลงเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม การวิบัติของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 นั้น มีแนวการวิบัติผ่ามวลรวมหยาบ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 นั่นแสดงให้เห็นว่ากำลังของซีเมนต์เพสต์มีค่าค่อนข้างสูง ดังนั้นมวลรวมหยาบมีกำลังหรือความแข็งแกร่งที่ต่ำ (มวลรวมรีไซเคิล) จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ต่ำกว่า

ลักษณะการวิบัติของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 แสดงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งพบว่าแนวการวิบัติของคอนกรีตจะไม่ผ่าหินธรรมชาติ แต่จะวิบัติตามแนวขอบผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ และวิ่งผ่ามอร์ต้าร์เดิมที่ติดมากับมวลรวมหยาบรีไซเคิล แสดงให้เห็นว่าความแข็งแกร่งที่ต่ำของมอร์ต้าร์เดิมที่เกาะอยู่ที่ผิวของมวลรวมหยาบรีไซเคิลนั้นเป็นจุดอ่อนที่ไม่สามารถต้านทานการวิบัติของคอนกรีตเมื่อรับแรงกดอัด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณปูนซีเมนต์อาจไม่มากพอที่จะช่วยอุดรูพรุนของมอร์ต้าร์ที่เกาะอยู่บนมวลรวมหยาบรีไซเคิล และไม่พอที่จะช่วยเชื่อมรอยต่อระหว่างหินธรรมชาติและมอร์ต้าร์ที่ติดมาของมวลรวมหยาบรีไซเคิลให้มีแรงยึดเหนี่ยวกันให้ดี ด้วยเหตุนี้เองกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 จึงแตกต่างจากกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติอย่างมากเมื่อเทียบกับผลการทดสอบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3

ในทำนองเดียวกันการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 ก็แทบไม่ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเลย แต่เมื่อใช้ในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 กลับมีผลกระทบต่อกำลังอัด กล่าวคือทำให้กำลังอัดลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอยในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงจะทำให้กำลังอัดลดลงอย่างมาก เมื่อใช้ในปริมาณมากกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



รูปที่ 4.9 การวิบัติของก้อนตัวอย่าง (0.3N) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3

รูปที่ 4.10 การวิบัติของก้อนตัวอย่าง(0.5F10) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5

4.4 การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต

4.4.1 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3

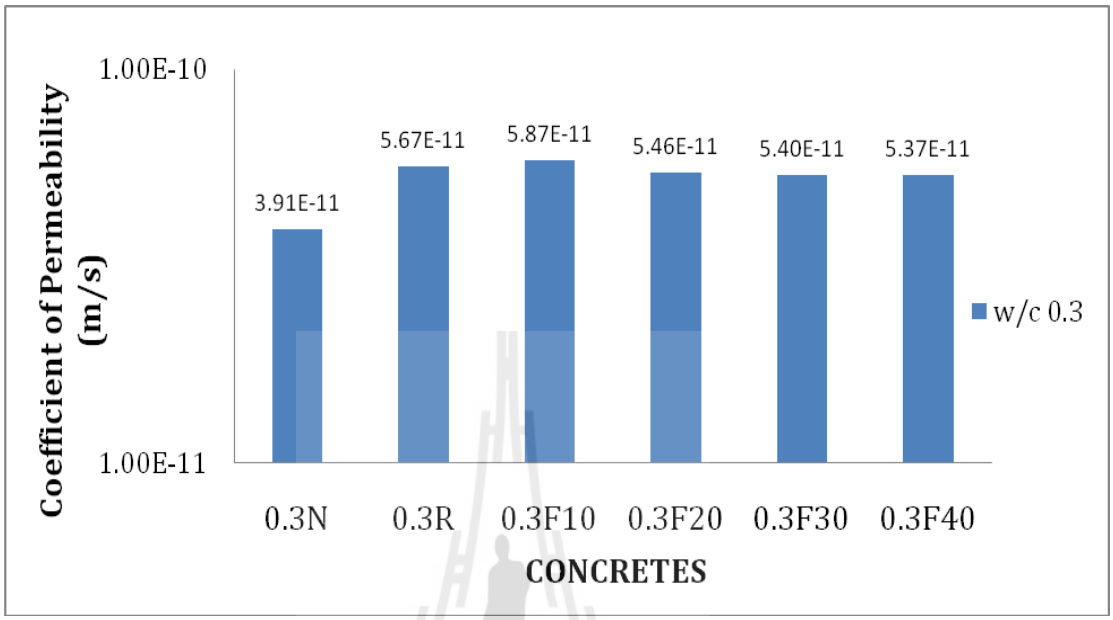
จากผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.4 และดังรูปที่ 4.11 พบว่าคอนกรีตที่ใช้หินธรรมชาติและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 (คอนกรีต 0.3N) มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำเท่ากับ 3.91×10^{-11} m/s เมื่อใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนหินธรรมชาติในส่วนผสม (คอนกรีต 0.3R) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำมีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-11} m/s หรือคิดเป็น 1.69 เท่าของ

คอนกรีต (0.3N) นั่นแสดงให้เห็นว่าการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณช่องว่างในคอนกรีตที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 13.55 ซึ่งมีค่าสูงกว่าของคอนกรีต 0.3N

เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 5.58×10^{-11}, 5.46×10^{-11}, 5.40×10^{-11} และ 5.37×10^{-11} m/s ตามลำดับ หรือคิดเป็น 1.67, 1.72, 1.72 และ 1.73 เท่าของคอนกรีต 0.3N ตามลำดับ เห็นได้ว่าการใช้เถ้าลอยในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล สามารถช่วยให้คอนกรีตดังกล่าวมีความทึบน้ำเพิ่มขึ้น แม้ว่าจะไม่สามารถช่วยให้กำลังอัดของคอนกรีตดีกว่าก็ตาม

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3

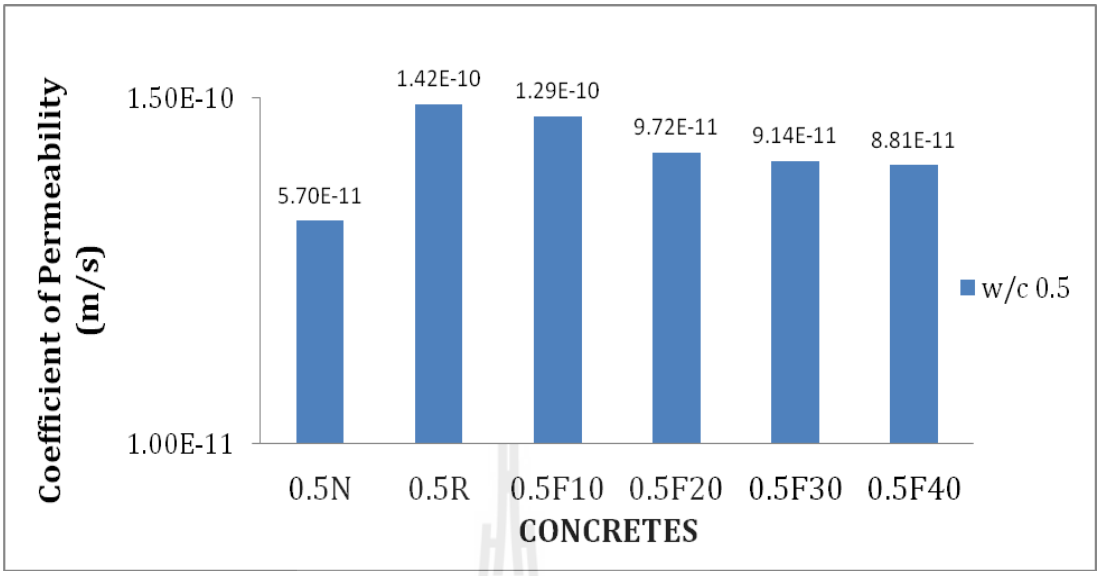
Sample	**Coefficient of Permeability**		
	void (%)	k **(10^{-11} m/s)**	$k / k_{0.3N}$
0.3N	12.73	3.91	1.00
0.3R	15.35	5.67	1.69
0.3F10	12.75	5.87	1.67
0.3F20	14.26	5.46	1.72
0.3F30	14.26	5.40	1.72
0.3F40	15.05	5.37	1.73



รูปที่ 4.11 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3

ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5

Sample	**Coefficient of Permeability**		
	void (%)	k **(10^{-11}m/s)**	$k / k_{0.5N}$
0.5N	13.24	5.7	1.00
0.5R	19.46	14.2	1.40
0.5F10	18.56	12.9	1.44
0.5F20	18.43	9.72	1.59
0.5F30	18.7	9.14	1.62
0.3540	18.58	8.81	1.65



รูปที่ 4.12 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5

ตารางที่ 4.5และรูปที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 จากผลการทดสอบ พบว่าคอนกรีตที่ใช้หินธรรมชาติและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 (คอนกรีต 0.5N) มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตเท่ากับ 5.7×10^{-11} m/s เมื่อใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนหินธรรมชาติในส่วนผสม พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตดังกล่าว (0.5R) มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตเท่ากับ 14.2×10^{-11} m/s หรือคิดเป็น 1.40 เท่าของคอนกรีต 0.5N เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีต 0.5N โดยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 12.9×10^{-11}, 9.72×10^{-11}, 9.14×10^{-11} และ 8.81×10^{-11} m/s หรือคิดเป็น 1.44, 1.59, 1.62 และ 1.65 เท่าของคอนกรีต 0.5N ตามลำดับ ผลการทดสอบเห็นได้ว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก สามารถช่วยลดการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลได้ แม้ว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลมีค่าสูงกว่า

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบกำลังอัดและผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต จะเห็นได้ว่าการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนหินธรรมชาติในส่วนผสมคอนกรีต ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง ซึ่งลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ

และจะลดลงค่อนข้างมากเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง ส่วนการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์นั้น พบว่าการใช้เถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้นในส่วนผสมคอนกรีตไม่สามารถช่วยให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลพัฒนาจนมีค่าเท่ากับกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้หินธรรมชาติได้ อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงขึ้น ในส่วนผสมคอนกรีต สามารถช่วยลดการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลได้ แม้ว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลมีค่าสูงกว่าเห็นธรรมชาติ

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบราคาคอนกรีตที่ผสมจากโรงงานเทียบกับส่วนผสม 0.5F40

	ส่วนผสมของโรงงานผสมคอนกรีตแห่งหนึ่ง ออกแบบส่วนผสมที่ 240 ksc.			**ส่วนผสม 0.5F40**		
	ปริมาณวัสดุ	**ราคา/หน่วย**	**บาท**	**ปริมาณวัสดุ**	**ราคา/หน่วย**	**บาท**
ปูนซีเมนต์	300 kg.	2.4	720	222	2.4	532.8
Fly ash				148	0.7	103.6
ทราย	725 kg.	0.3	217.5	930	0.3	279
หิน	1290 kg.	0.35	451.5	860	0.35	301
น้ำ	170 lts.	0.01	1.7	185	0.01	1.85
น้ำยา	1.2 lts.	18	19.8	3.7	20	74
ราคาคอนกรีตต่อ 1 ลบ.ม.			1,410	ราคาคอนกรีตต่อ 1 ลบ.ม.		1,283

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบราคาคอนกรีตที่ผสมจากโรงงานผสมคอนกรีตเทียบกับส่วนผสม 0.5F40 จะเห็นได้ว่าการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่า 128 บาท ของคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตจากโรงงานผสมคอนกรีต แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตโดยใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้จริง

บทที่ 5
สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาทั้งหมดของงานวิจัยนี้ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนหินธรรมชาติในส่วนผสมคอนกรีต ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ (W/B = 0.30) และจะลดลงค่อนข้างมากเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง (W/B = 0.50) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น เมื่อใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลแทนหินธรรมชาติในส่วนผสม

5.1.2 การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตไม่สามารถช่วยให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลพัฒนาจนมีค่าเท่ากับกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้หินธรรมชาติได้ อย่างไรก็ตาม เถ้าลอยสามารถช่วยให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 และ 0.5 มีความทึบน้ำดีกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลในส่วนผสมที่ไม่ผสมเถ้าลอยได้ แต่ไม่มากอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์

5.13 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างฝายกั้นน้ำ กำหนดไว้เท่ากับ 240 กก/ซม^2 ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตทุกอัตราส่วนผสมในงานวิจัยนี้มีกำลังอัดที่สูงกว่า 240 กก/ซม^2 นั่นแสดงว่าสามารถนำส่วนผสมคอนกรีตในงานวิจัยนี้ไปใช้ในการก่อสร้างฝายกั้นน้ำได้ ซึ่งการนำส่วนผสมคอนกรีตจากงานวิจัยนี้ไปใช้ในงานจริง จะเป็นการส่งเสริมการนำเศษคอนกรีตจากการรื้อถอนฝายเก่ามาย่อยเพื่อใช้เป็นมวลรวมหยาบในการก่อสร้างฝายใหม่ให้เกิดประโยชน์ และช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างหิน นอกจากนี้ยังเป็นการส่งเสริมการนำเถ้าลอยที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกด้วย คอนกรีต 0.5F40 มีราคาต้นทุนในการผลิตถูกกว่าคอนกรีตที่ผสมจากโรงงานผสมคอนกรีตและสามารถใช้เป็นคอนกรีตในงานก่อสร้างฝายกั้นน้ำได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาทั้งหมดของงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

5.1.1 ควรศึกษาถึงส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่สามารถให้กำลังอัดตามที่ต้องการ และให้ค่าการซึมผ่านน้ำที่ต่ำ เพื่อที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ในการสร้างฝายใหม่ได้

5.1.2 การที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์นั้นสามารถช่วยให้การซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลลดลงได้ แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยสามารถนำมาใช้เกิดประโยชน์ได้จริง ผู้วิจัยคิดว่าควรมีการวิจัยเรื่องเกี่ยวกับการกัดก่อนของการใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตฝายกั้นน้ำต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารอ้างอิง

ชูติพงศ์ เอื้อฐิตาภรณ์. (2555). **การศึกษากาลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตและเศษอิฐมวลเบา เป็นวัสดุมวลรวม**.วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบันฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ. (2543). **ความคงทนของคอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.

วินิต ช่อวิเชียร. (2544).**คอนกรีตเทคโนโลยี.** พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพมหานคร : ดร.วินิตช่อวิเชียร.

สุรชัย สุทธิธรรมมา. (2549). **ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตผสมเส้นใยภาย หลังรับแรงกระทำ**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาภาควิชาวิศวกรรมโยธาคณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

พีรนัท เลขขำ. (2547). **ความสามรถในการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต.**วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Ann, K.Y., Moon, H.Y., Kim, Y.B. and Ryou, J. (2008). “Durability of Recycled Aggregate Concrete Using Pozzolanic Materials”, Waste Management, Vol. 28, Issue 6,pp 993-999

Hansen,T.C. and Narud, H. (1983). “Strength of Recyled ConCrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate”, **Concrete International**, Vol. 5, No. 1,**pp**. 79-83

Kosmatka, S. H. และคณะ. (1995). **Design and Control of Concrete Mixtures**. 6th Canadian ed. United State of America : Engineering Bulletin of Canadian Portland Cement Association, c

Mindess, S., Young, J. F. and Darwin, D. (2002). Concrete 2 nd ed. New Jersey : **Pearson Education**, Inc., c.

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 Composite, Vol.34, pp.848-854.

ภาคผนวก ก
ตารางและรูปแสดงคุณสมบัติจำเพาะของมวลรวมจากธรรมชาติมวลรวมหยาบที่ได้จากการการย่อยเศษคอนกรีตฝายกั้นน้ำที่ใช้ในงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจาเพาะและการดูดซึมน้ำของทรายแม่น้ำ

Determination No.	**Unit**	**1 st**	**2 nd**	**Average**
WT.Sand (Saturate Surface Dry) [B]	g	500.20	500.00	500.10
WT.Flask + Sand (SSD.) + Water [C]	g	967.70	994.60	981.15
WT.Flask + Water [D]	g	664.00	689.10	676.55
Bowl No.		1	2	
WT.Bowl	g	392.20	392.60	392.40
WT.Bowl + Dry Sand	g	885.60	885.70	885.65
WT.Dry Sand [A]	g	493.40	493.10	493.25
Bulk Specific Gravity (Dry). A / [B+D-C]		2.51	2.54	2.52
Bulk Specific Gravity (SSD). B / [B+D-C]		2.55	2.57	2.56
Apparent Specific Gravity. A / [D+A-C]		2.60	2.63	2.61
Percent Absorption. [B-A] / A * 100	%	1.38	1.40	1.39

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบหาค่าค่าความถ่วงจาเพาะและการดูดซึมน้ำของหินธรรมชาติ

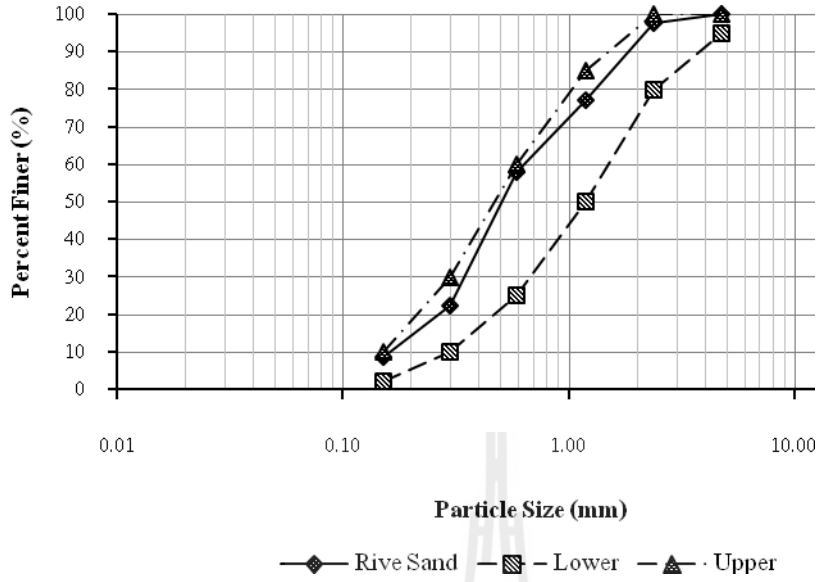
Determination No.	**Unit**	**1 st**	**2 nd**	**Average**
WT. Container	g	615.40	618.20	616.80
WT. SSD Coarse Aggregate [B]	g	2506.90	2504.90	2505.90
WT. Dry Coarse Aggregate [A]	g	2492.20	2489.30	2490.75
WT. SSD Coarse Aggregate in Water [C]	g	1561.90	1574.10	1568.00
WT.Container + SSD Coarse Aggregate	g	3122.30	3123.10	3122.70
WT.Container + Dry Coarse Aggregate	g	3107.60	3107.50	3107.55
Bulk Specific Gravity (Oven Dry Basis).{A/{B-C}}		2.64	2.67	2.66
Bulk Specific Gravity (SSD Basis). {B/{B-C}}		2.65	2.69	2.67
Apparent Specific Gravity. {A/{A-C}}		2.68	2.72	2.70
Percentage Absorption. {{B-A}/A}*100	%	0.59	0.63	0.61

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจาเพาะและการดูดซึมน้ำของหินรีไซเคิลที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตฝายกั้นน้ำ

Determination No.	**Unit**	**1 st**	**2 nd**	**Average**
WT. Container	g	622.80	604.10	392.70
WT. SSD Coarse Aggregate [B]	g	2504.60	2501.70	2500.50
WT. Dry Coarse Aggregate [A]	g	2436.30	2424.00	2421.10
WT. SSD Coarse Aggregate in Water [C]	g	1525.80	1549.10	1515.50
WT.Container + SSD Coarse Aggregate	g	3127.40	3105.80	2893.20
WT.Container + Dry Coarse Aggregate	g	3059.10	3028.10	2813.80
Bulk Specific Gravity (Oven Dry Basis). {A/{B-C}}		2.49	2.54	2.46
Bulk Specific Gravity (SSD Basis). {B/{B-C}}		2.56	2.63	2.54
Apparent Specific Gravity. {A/{A-C}}		2.68	2.77	2.67
Percentage Absorption. {{B-A}/A}*100	%	2.80	3.21	3.28

ตารางที่ ก.4 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียดที่ได้จากทรายแม่น้ำ

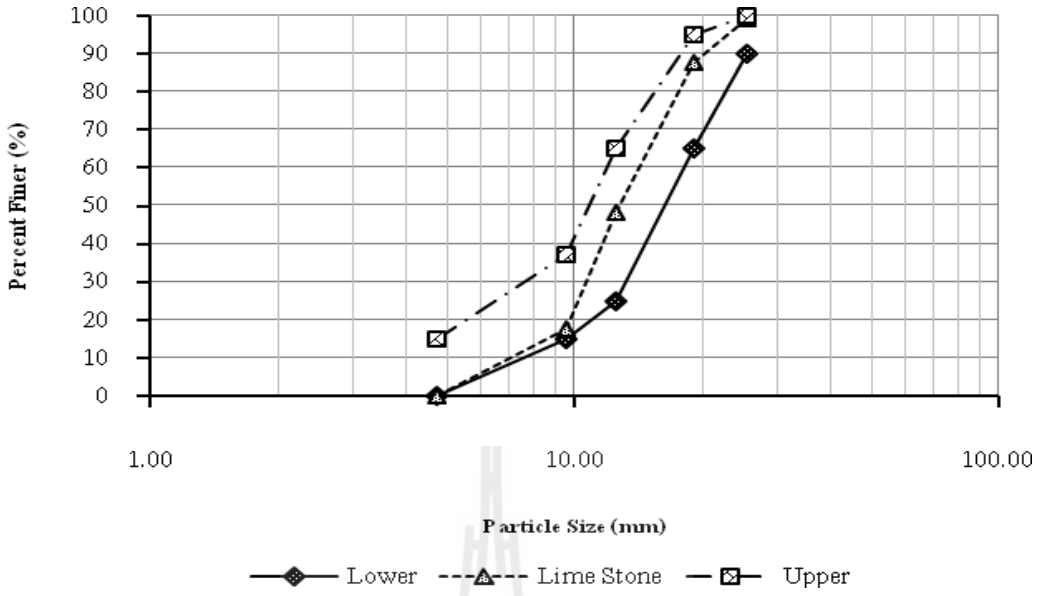
Sieve No.	Sieve Opening (mm)	WT.Sieve (g)	WT.Sieve + Sample (g)	WT.Sample Retained (g)	Percent Retained (%)	Cummulative Percent Retained (%)	Percent Finer (%)
4 #	4.75	511.0	511.0	0.0	0	0	100
8 #	2.38	485.7	495.9	10.2	2.414	2.41	97.58
16 #	1.19	414.4	500.5	86.1	20.38	22.79	77.20
30 #	0.59	388.8	470.7	81.9	19.38	42.18	57.81
50 #	0.30	357.3	507.6	150.3	35.58	77.769	22.23
100 #	0.15	341.0	398.7	57.7	13.66	91.42	8.57
PAN		374.3	410.5	36.2	8.57	100	0
Summation				422.4	100.0	373.6	
Finess Modulus = 3.73							



รูปที่ ก.1 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียดจากทรายแม่น้ำ

ตารางที่ ก.5 การกระจายตัวของมวลรวมหยาบที่ได้จากหินธรรมชาติ

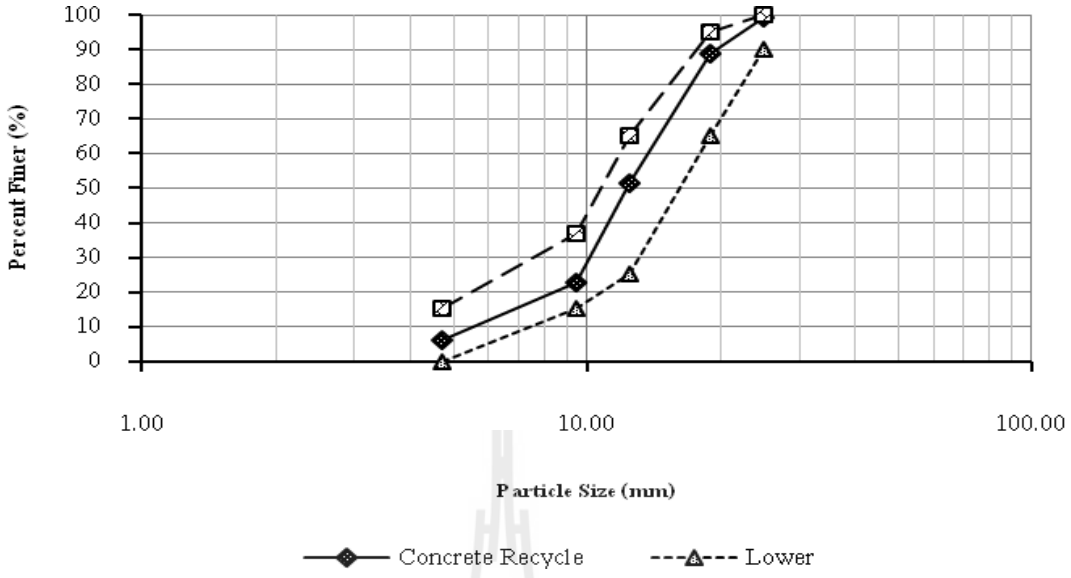
Sieve No.	**Sieve Opening (mm)**	**WT.Sieve (gm)**	**WT.Sieve + Sample (gm)**	**WT.Sample Retained (gm)**	**Percent Retained (%)**	**Cummulative Percent Retained (%)**	**Percent Finer (%)**
1"	25.4	7220	7240	20	0.40	0.40	99.60
3/4"	19.05	7320	7940	620	12.42	12.83	87.17
3/8"	12.5	7200	11020	3820	76.55	89.38	10.62
4 #	9.53	7220	7720	500	8.02	97.39	2.61
8 #	4.75	7100	7120	20	2.40	99.80	0.20
PAN	0	5560	5570	10	0.20	100.00	0.00
Summation				4990	100.00	798.80	
Finess Modulus = 7.99							



รูปที่ ก.2 การกระจายตัวของหินธรรมชาติ

ตารางที่ ก.6 การกระจายตัวของมวลรวมหยาบที่ได้จากเศษคอนกรีตฝายกั้นน้ำ

Sieve No.	**Sieve Opening (mm.)**	**WT.Sieve (gm.)**	**WT.Sieve + Sample (gm.)**	**WT.Sample Retained (gm.)**	**Percent Retained (%)**	**Cummulative Percent Retained (%)**	**Percent Finer (%)**
1"	25.4	7220	7260	40	0.80	0.80	99.20
3/4"	19.05	7340	7850	510	10.26	11.07	88.93
3/8"	12.50	7180	9050	1870	37.63	48.69	51.31
4 #	9.53	7220	8650	1430	28.77	77.46	22.54
8 #	4.75	7100	7920	820	16.50	93.96	6.04
PAN	0	5560	5860	300	6.04	100.00	0.00
Summation				4970	100.00	701.81	
Finess Modulus = 7.02							



รูปที่ ก.3 การกระจายตัวของเศษคอนกรีตที่ได้จากฝายกั้นน้ำ

ตารางที่ ก.7 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมละเอียดของทรายแม่น้ำ

Determination No.	**Unit**	**1 st**	**2 nd**	**Average**
WT. of Measuring Cylinder [T]	kg	2.82	2.82	2.82
WT. of Cylinder and Water	kg	5.52	5.52	5.52
WT. of Water	kg	2.70	2.70	2.70
Volumn of Measuring Cylinder [V]	cu.m.	0.0027	0.0027	0.0027
WT. of Cylinder + Sample [G]	kg	7.36	7.40	7.38
WT. of Sample Alone	kg	4.54	4.58	4.56
Unit Weight of Sample [g]	kg /cu.m.	1681.48	1696.30	1688.89
Bulk Specific Gravity [SSD.]		2.55	2.57	2.56
Percentage of Voids	%	33.94	34.01	33.98

ตารางที่ ก.8 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบจากหินธรรมชาติ

Determination No.	**Unit**	**1 st**	**2 nd**	**Average**
WT. of Measuring Cylinder [T]	kg	5.26	5.26	5.26
WT. of Cylinder and Water	kg	10.98	10.98	10.98
WT. of Water	kg	5.72	5.72	5.72
Volumn of Measuring Cylinder [V]	cu.m.	0.00572	0.00572	0.00572
WT. of Cylinder + Sample [G]	kg	14.52	14.43	14.48
WT. of Sample Alone	kg	9.26	9.17	9.22
Unit Weight of Sample [g]	kg / cu.m.	1618.88	1603.15	1611.01
Bulk Specific Gravity [SSD.]		2.65	2.69	2.67
Percentage of Voids	%	38.97	40.43	39.70

ตารางที่ ก.9 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตฝายกั้นน้ำ

Determination No.	**Unit**	**1 st**	**2 nd**	**Average**
WT. of Measuring Cylinder [T]	kg	5.26	5.26	5.26
WT. of Cylinder and Water	kg	10.98	10.98	10.98
WT. of Water	kg	5.72	5.72	5.72
Volumn of Measuring Cylinder [V]	cu.m.	0.00572	0.00572	0.01
WT. of Cylinder + Sample [G]	kg	12.80	12.94	12.87
WT. of Sample Alone	kg	7.54	7.68	7.61
Unit Weight of Sample [g]	kg / cu.m.	1318.18	1342.66	1330.42
Bulk Specific Gravity [SSD.]		2.56	2.63	2.59
Percentage of Voids	%	48.49	48.87	48.68

ตารางที่ ก.10 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบจากหินธรรมชาติ

Abrasion Resistance of Natural Coarse Aggregate by Los Angeles Abrasion Machine			
Grading **B** **WT. of Sample 5001.0 g** **Number of Abrasive Charges 11**			
WT. of Abrasive Charge 4584 g		**Number of Revolution 500 rpm**	
Sieve No. Passing	**Sieve No. Retain**	**Weight**	**Weight Used**
3/4 "	1/2 "	2500	2500.90
1/2 "	3/8 "	2500	2500.10
Total Wt. Used (W1) 5001.00 g		Total Wt. Retain No.12 (W2) 4052.50 g	
Percent of Wear {(W1-W2)*100} / W1		18.97 %	

ตารางที่ ก.11 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตฝายกั้นน้ำ

Abrasion Resistance of Natural Coarse Aggregate by Los Angeles Abrasion Machine			
Grading **B** **WT. of Sample 5003.5 g** **Number of Abrasive Charges 11**			
WT. of Abrasive Charge 4584 g		**Number of Revolution 500 rpm**	
Sieve No. Passing	**Sieve No. Retain**	**Weight**	**Weight Used**
3/4 "	1/2 "	2500	2501290
1/2 "	3/8 "	2500	2502.30
Total Wt. Used (W1) 5003.50 g		Total Wt. Retain No.12 (W2) 2989.50 g	
Percent of Wear {(W1-W2)*100} / W1		40.25 %	

ตัวอย่างการคำนวณออกแบบส่วนผสม

1. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 มวลรวมหยาบ หน่วยน้ำหนักในสภาพแห้งและกระทุ้งแน่นเท่ากับ 1600 กก/ม^{3}ความถ่วงจำเพาะ (อิ่มตัวผิวแห้ง) เท่ากับ 2.67 ความสามารถในการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.61 มวลรวมหยาบมีขนาดโตสุด ของมวลรวม 20 มม. ทราย โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.73 ความถ่วงจำเพาะ (อิ่มตัวผิวแห้ง) เท่ากับ 2.56 ความสามารถในการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.39

คำนวณหาปริมาณปูนซีเมนต์

ปริมาณปูนซีเมนต์หาจากความสัมพันธ์ W/C = 0.3

ดังนั้น C = 185/0.3 = 617 กก/ม^3

หาปริมาณมวลรวมหยาบ

อัตราส่วนปริมาตรของมวลรวมหยาบในสภาพแห้งและกระทุ้งแน่นต่อปริมาณของคอนกรีตที่มีความสามรถทำงานได้ปานกลางเท่ากับ 0.53 สำหรับค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 3.73 ขนาดโตสุด ของมวลรวม 20 มม.

ดังนั้นน้ำหนักของมวลรวมหยาบแห้งที่ใช้เท่ากับ 0.53x1611 = 853.83 กก/ม^3 และน้ำหนักของมวลรวมหยาบที่อิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) เท่ากับ 853.83x1.0061 = 859.04 กก.

หาปริมาณทรายและปฏิภาคส่วนผสมโดยปริมาตร

คำนวณหาปริมาตรทรายจากปริมาตรส่วนผสมทั้งหมดในคอนกรีต 1 ม^3

น้ำ	=	0.185 ม^3
ปูนซีเมนต์ = 617/(3.15x1000)	=	0.196 ม^3
ฟองอากาศร้อยละ 2 ในปริมาตรของคอนกรีต	=	0.020 ม^3
มวลรวมหยาบ = 859.04/(2.67x1000)	=	0.322 ม^3

รวมปริมาตรน้ำ,ปูนซีเมนต์,มวลรวมหยาบ = 0.732 $ม^3$

ปริมาตรที่เหลือเป็นทราย = 1-0.644 = 0.277 $ม^3$

น้ำหนักของทราย 0.277x2.56x1000 = 709.12 กก.

คำนวณน้ำหนักของทรายจากหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ขนาดโตสุด ของมวลรวม 20 มม.

จะมีน้ำหนักประมาณ 2345 กก.โดยที่

น้ำหนักน้ำ = 185 กก.

น้ำหนักปูนซีเมนต์ = 617 กก.

น้ำหนักมวลรวมหยาบ = 860 กก.

รวมน้ำหนักน้ำ,ปูนซีเมนต์,มวลรวมหยาบ = 1662 กก.

ดังนั้นน้ำหนักทราย = 2345-1662 = 680 กก.

2. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 มวลรวมหยาบ หน่วยน้ำหนักในสภาพแห้งและกระทุ้งแน่นเท่ากับ 1600 กก/$ม^3$ความถ่วงจำเพาะ (อิ่มตัวผิวแห้ง) เท่ากับ 2.67 ความสามารถในการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.61 มวลรวมหยาบมีขนาดโตสุด ของมวลรวม 20 มม. ทราย โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.73 ความถ่วงจำเพาะ (อิ่มตัวผิวแห้ง) เท่ากับ 2.56 ความสามารถในการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.39

ปริมาณปูนซีเมนต์หาจากความสัมพันธ์ W/C = 0.5

ดังนั้น C = 185/0.5 = 370 กก/$ม^3$

หาปริมาณมวลรวมหยาบ

อัตราส่วนปริมาตรของมวลรวมหยาบในสภาพแห้งและกระทุ้งแน่นต่อปริมาณของคอนกรีตที่มีความสามรถทำงานได้ปานกลางเท่ากับ 0.53 สำหรับค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 3.73 ขนาดโตสุด ของมวลรวม 20 มม.

ดังนั้นน้ำหนักของมวลรวมหยาบแห้งที่ใช้เท่ากับ 0.53x1611 = 853.83 กก/ม^3 และน้ำหนักของมวลรวมหยาบที่อิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) เท่ากับ 853.83x1.0061 = 859.04 กก.

หาปริมาณทรายและปฏิภาคส่วนผสมโดยปริมาตร

คำนวณหาปริมาตรทรายจากปริมาตรส่วนผสมทั้งหมดในคอนกรีต 1 ม^3

น้ำ		=	0.185 ม^3
ปูนซีเมนต์	= 370/(3.15x1000)	=	0.117 ม^3
ฟองอากาศร้อยละ 2 ในปริมาตรของคอนกรีต		=	0.020 ม^3
มวลรวมหยาบ	= 859.04/(2.67x1000)	=	0.322 ม^3
รวมปริมาตรน้ำ,ปูนซีเมนต์,มวลรวมหยาบ		=	0.644 ม^3
ปริมาตรที่เหลือเป็นทราย = 1-0.644		=	0.356 ม^3
น้ำหนักของทราย 0.356x2.56x1000		=	911.36 กก.

คำนวณน้ำหนักของทรายจากหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ขนาดโตสุด ของมวลรวม 20 มม.

จะมีน้ำหนักประมาณ 2345 กก. โดยที่

น้ำหนักน้ำ		=	185 กก.
น้ำหนักปูนซีเมนต์		=	370 กก.
น้ำหนักมวลรวมหยาบ		=	860 กก.
รวมน้ำหนักน้ำ,ปูนซีเมนต์,มวลรวมหยาบ		=	1415 กก.
ดังนั้นน้ำหนักทราย	= 2345-1415	=	930 กก.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข

ตารางและรูปแสดงแสดงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่แต่ละอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.3

No.	Slump	Compressive Strength (ksc.)			
		Sample 1	Sample 2	Sample 3	Average
0.3N	4.5	523.32	508.44	663.62	565.13
0.3R	5	522.56	539.44	476.07	531
0.3F10	5.5	533.97	453.66	513.66	523.81
0.3F20	6	521.57	532.78	513.62	522.65
0.3F30	7	504.3	516.95	528.37	516.54
0.3F40	8	541.77	508.32	512.56	520.88

หมายเหตุ ส่วนที่แรเงาไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.2 กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่แต่ละอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5

No.	Slump	Compressive Strength (ksc.)			
		Sample 1	Sample 2	Sample 3	Average
0.5N	3.5	408.54	393.53	410.53	404.2
0.5R	4.5	344.71	330.08	358.72	344.50
0.5F10	5	352.61	333.08	348.75	344.81
0.5F20	8	293.56	295.24	277.12	288.64
0.5F30	10	281.73	305.8	343.34	310.29
0.5F40	11.5	290.8	303.02	309.66	301.16

ภาคผนวก ค
ตารางและรูปแสดงแสดงผลการซึมผ่านน้ำในคอนกรีต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.3N

Test Description		Specimen No. 0.3N		
		1	2	3
Mass of Over-Dried Sample in Air (g)	A	2764	2721	2574
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion (g)	B	2900	2855	2720
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion and Boiling (g)	C	2905	2880	2725
Apparent Mass of Sample in Water After Immersion and Boiling (g)	D	1694	1681	1589
Bulk Density , Dry (g/cm^3)	g1	2.28	2.27	2.27
Apparent Density (g/cm^3)	g2	2.58	2.62	2.61
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)		11.64	13.26	13.29
Average		12.73		

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.3R

Test Description		Specimen No. 0.3R		
		1	2	3
Mass of Over-Dried Sample in Air (g)	A	2128	3491.4	3410.3
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion (g)	B	2270	3730	3625
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion and Boiling (g)	C	2280	3740	3640
Apparent Mass of Sample in Water After Immersion and Boiling (g)	D	1307.4	2151.2	2085.5
Bulk Density , Dry (g/cm^3)	g1	2.19	2.20	2.19
Apparent Density (g/cm^3)	g2	2.59	2.61	2.57
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)		15.63	15.65	14.78
Average		15.35		

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.3F10

Test Description		Specimen No. 0.3F10		
		1	2	3
Mass of Over-Dried Sample in Air (g)	A	2608.8	2210.1	1914.5
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion (g)	B	2795	2385	2060
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion and Boiling (g)	C	2805	2395	2070
Apparent Mass of Sample in Water After Immersion and Boiling (g)	D	1601.2	1361.8	1179.4
Bulk Density , Dry (g/cm^3)	g1	2.17	2.14	2.15
Apparent Density (g/cm^3)	g2	2.59	2.61	2.60
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)		12.82	12.73	12.70
Average		12.75		

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.3F20

Test Description		Specimen No. 0.3F20		
		1	2	3
Mass of Over-Dried Sample in Air (g)	A	2129	3442.3	1394.5
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion (g)	B	2240	3600	1470
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion and Boiling (g)	C	2245	3610	1475
Apparent Mass of Sample in Water After Immersion and Boiling (g)	D	1282.7	2064.5	841.5
Bulk Density , Dry (g/cm^3)	g1	2.21	2.23	2.20
Apparent Density (g/cm^3)	g2	2.52	2.50	2.52
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)		14.46	14.12	14.20
Average		14.26		

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.3F30

Test Description		Specimen No. 0.3F30		
		1	2	3
Mass of Over-Dried Sample in Air (g)	A	2474.6	1897.6	2800.7
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion (g)	B	2660	2045	2975
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion and Boiling (g)	C	2665	2055	2985
Apparent Mass of Sample in Water After Immersion and Boiling (g)	D	1527.3	1174.8	1798.5
Bulk Density , Dry (g/cm^3)	g1	2.18	2.16	2.36
Apparent Density (g/cm^3)	g2	2.61	2.63	2.79
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)		14.55	14.80	14.50
Average		14.62		

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.3F40

Test Description		Specimen No. 0.3F40		
		1	2	3
Mass of Over-Dried Sample in Air (g)	A	2190.4	2079.7	2466
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion (g)	B	2335	2215	2630
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion and Boiling (g)	C	2345	2220	2635
Apparent Mass of Sample in Water After Immersion and Boiling (g)	D	1340	1273.1	1505.2
Bulk Density , Dry (g/cm^3)	g1	2.18	2.20	2.18
Apparent Density (g/cm^3)	g2	2.58	2.58	2.57
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)		15.38	14.82	14.96
Average		15.05		

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.5N

Test Description		Specimen No. 0.5N		
		1	2	3
Mass of Over-Dried Sample in Air (g)	A	2357.6	2833.5	3039.7
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion (g)	B	2490	2985	3205
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion and Boiling (g)	C	2495	3000	3220
Apparent Mass of Sample in Water After Immersion and Boiling (g)	D	1448.2	1740.6	1871.8
Bulk Density , Dry (g/cm^3)	g1	2.25	2.25	2.25
Apparent Density (g/cm^3)	g2	2.59	2.59	2.60
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)		13.13	13.22	13.37
Average		13.24		

ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.5R

Test Description		Specimen No. 0.5R		
		1	2	3
Mass of Over-Dried Sample in Air (g)	A	1753.5	2404	2311.8
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion (g)	B	1890	2575	2505
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion and Boiling (g)	C	1905	2590	2525
Apparent Mass of Sample in Water After Immersion and Boiling (g)	D	1078.8	1495.7	1429.6
Bulk Density , Dry (g/cm^3)	g1	2.12	2.20	2.11
Apparent Density (g/cm^3)	g2	2.60	2.65	2.62
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)		18.34	17.00	19.46
Average		19.46		

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.5F10

Test Description		Specimen No. 0.5F10		
		1	2	3
Mass of Over-Dried Sample in Air (g)	A	2514.1	2313.4	2205.6
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion (g)	B	2720	2505	2380
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion and Boiling (g)	C	2735	2520	2395
Apparent Mass of Sample in Water After Immersion and Boiling (g)	D	1543.2	1430.9	1353.5
Bulk Density , Dry (g/cm^3)	g1	2.11	2.12	2.12
Apparent Density (g/cm^3)	g2	2.59	2.62	2.59
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)		18.53	18.97	18.19
Average		18.56		

ตารางที่ ค.10 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.5F20

Test Description		Specimen No. 0.5F20		
		1	2	3
Mass of Over-Dried Sample in Air (g)	A	2580.9	2315.4	2852.6
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion (g)	B	2810	2505	3080
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion and Boiling (g)	C	2825	2515	3105
Apparent Mass of Sample in Water After Immersion and Boiling (g)	D	1515.8	1413.3	1742.9
Bulk Density , Dry (g/cm^3)	g1	1.97	2.10	2.09
Apparent Density (g/cm^3)	g2	2.42	2.57	2.57
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)		18.64	18.12	18.53
Average		18.43		

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.11 ผลการทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.5F30

Test Description		Specimen No. 0.5F30		
		1	2	3
Mass of Over-Dried Sample in Air (g)	A	2046.6	1938.4	2539.9
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion (g)	B	2210	2090	2715
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion and Boiling (g)	C	2210	2095	2730
Apparent Mass of Sample in Water After Immersion and Boiling (g)	D	1260	1183.6	1542.1
Bulk Density , Dry (g/cm^3)	g1	2.15	2.13	2.14
Apparent Density (g/cm^3)	g2	2.60	2.57	2.55
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)		18.87	18.73	18.50
Average		18.7		

ตารางที่ ค.12 การทดสอบหาความพรุนในเนื้อคอนกรีต 0.5F40

Test Description		Specimen No. 0.5F40		
		1	2	3
Mass of Over-Dried Sample in Air (g)	A	2068.8	2108.2	2145.4
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion (g)	B	2240	2280	2315
Mass of Surface-Dry Sample in Air After Immersion and Boiling (g)	C	2250	2295	2335
Apparent Mass of Sample in Water After Immersion and Boiling (g)	D	1271.4	1293.7	1313.8
Bulk Density , Dry (g/cm^3)	g1	2.11	2.11	2.10
Apparent Density (g/cm^3)	g2	2.59	2.59	2.58
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)		18.52	18.66	18.57
Average		18.58		

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.13 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.3N

Test Description		Specimen No. 0.3N	
		1	2
Depth of Penetration (m)	d	0.051	0.052
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)	v	12.73	12.73
Time to Penetrate Depth (s)	T	86400	86400
Pressure Head (m)	h	50	50
Coefficient of Permeability (m/s)	kp	3.83×10^{-11}	3.98×10^{-11}
Average		3.91×10^{-11}	

ตารางที่ ค.14 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.3R

Test Description		Specimen No. 0.3R	
		1	2
Depth of Penetration (m)	d	0.063	0.066
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)	v	15.35	15.35
Time to Penetrate Depth (s)	T	86400	86400
Pressure Head (m)	h	50	50
Coefficient of Permeability (m/s)	kp	5.65×10^{-11}	5.69×10^{-11}
Average		5.67×10^{-11}	

ตารางที่ ค.15 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.3F10

Test Description		Specimen No. 0.3F10	
		1	2
Depth of Penetration (m)	d	0.056	0.057
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)	v	12.75	12.75
Time to Penetrate Depth (s)	T	86400	86400
Pressure Head (m)	h	50	50
Coefficient of Permeability (m/s)	kp	5.60×10^{-11}	5.56×10^{-11}
Average		5.58×10^{-11}	

ตารางที่ ค.16 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.3F20

Test Description		Specimen No.0.3F20	
		1	2
Depth of Penetration (m)	d	0.05	0.049
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)	v	14.26	14.26
Time to Penetrate Depth (s)	T	86400	86400
Pressure Head (m)	h	50	50
Coefficient of Permeability (m/s)	kp	5.44×10^{-11}	5.48×10^{-11}
Average		5.46×10^{-11}	

ตารางที่ ค.17 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.3F30

Test Description		Specimen No.0.3F30	
		1	2
Depth of Penetration (m)	d	0.056	0.057
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)	v	14.62	14.62
Time to Penetrate Depth (s)	T	86400	86400
Pressure Head (m)	h	50	50
Coefficient of Permeability (m/s)	kp	5.38×10^{-11}	5.42×10^{-11}
Average		5.40×10^{-11}	

ตารางที่ ค.18 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.3F40

Test Description		Specimen No.0.3F40	
		1	2
Depth of Penetration (m)	d	0.055	0.056
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)	v	15.05	15.05
Time to Penetrate Depth (sec)	T	86400	86400
Pressure Head (m)	h	50	50
Coefficient of Permeability (m/s)	kp	5.35×10^{-11}	5.39×10^{-11}
Average		5.37×10^{-11}	

ตารางที่ ค.19 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.5N

Test Description		Specimen No.0.5N	
		1	2
Depth of Penetration (m)	d	0.062	0.06
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)	v	13.24	13.24
Time to Penetrate Depth (s)	T	86400	86400
Pressure Head (m)	h	50	50
Coefficient of Permeability (m/s)	kp	5.89×10^{-11}	5.52×10^{-11}
Average		5.7×10^{-11}	

ตารางที่ ค.20 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.5R

Test Description		Specimen No.0.5R	
		1	2
Depth of Penetration (m)	d	0.08	0.079
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)	v	19.46	19.46
Time to Penetrate Depth (s)	T	86400	86400
Pressure Head (m)	h	50	50
Coefficient of Permeability (m/s)	kp	1.44×10^{-10}	1.41×10^{-10}
Average		1.42×10^{-10}	

ตารางที่ ค.21 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.5F10

Test Description		Specimen No.0.5F10	
		1	2
Depth of Penetration (m)	d	0.078	0.77
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)	v	18.56	18.56
Time to Penetrate Depth (s)	T	86400	86400
Pressure Head (m)	h	50	50
Coefficient of Permeability (m/s)	kp	1.31×10^{-10}	1.27×10^{-10}
Average		1.29×10^{-10}	

ตารางที่ ค.22 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.5F20

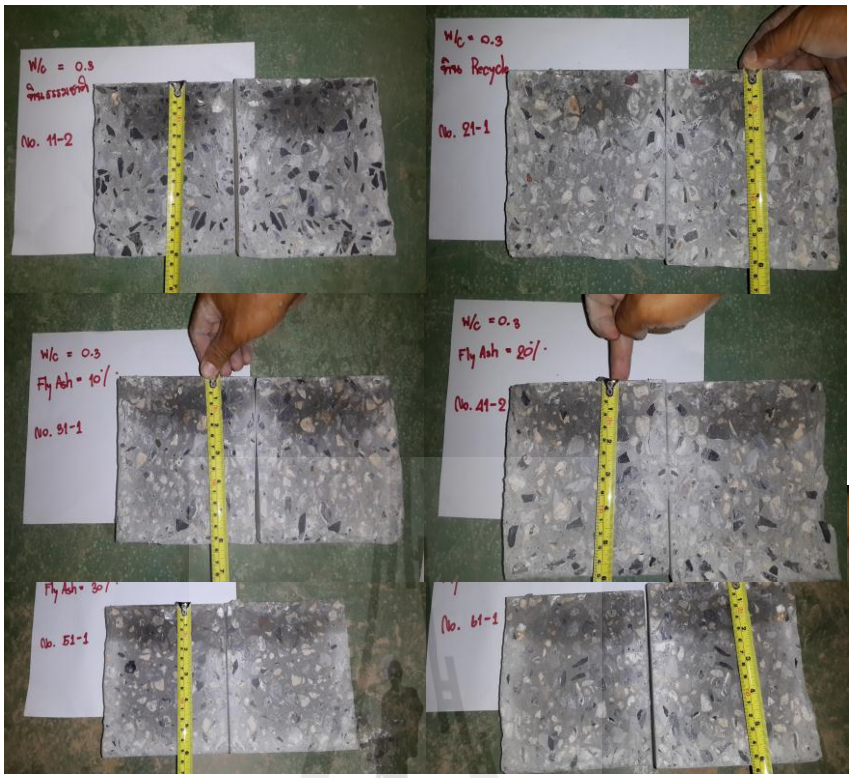
Test Description		Specimen No.0.5F20	
		1	2
Depth of Penetration (m)	d	0.068	0.067
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)	v	18.43	18.43
Time to Penetrate Depth (s)	T	86400	86400
Pressure Head (m)	h	50	50
Coefficient of Permeability (m/s)	kp	9.86×10^{-11}	9.58×10^{-11}
Average		9.72×10^{-11}	

ตารางที่ ค.23 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.5F30

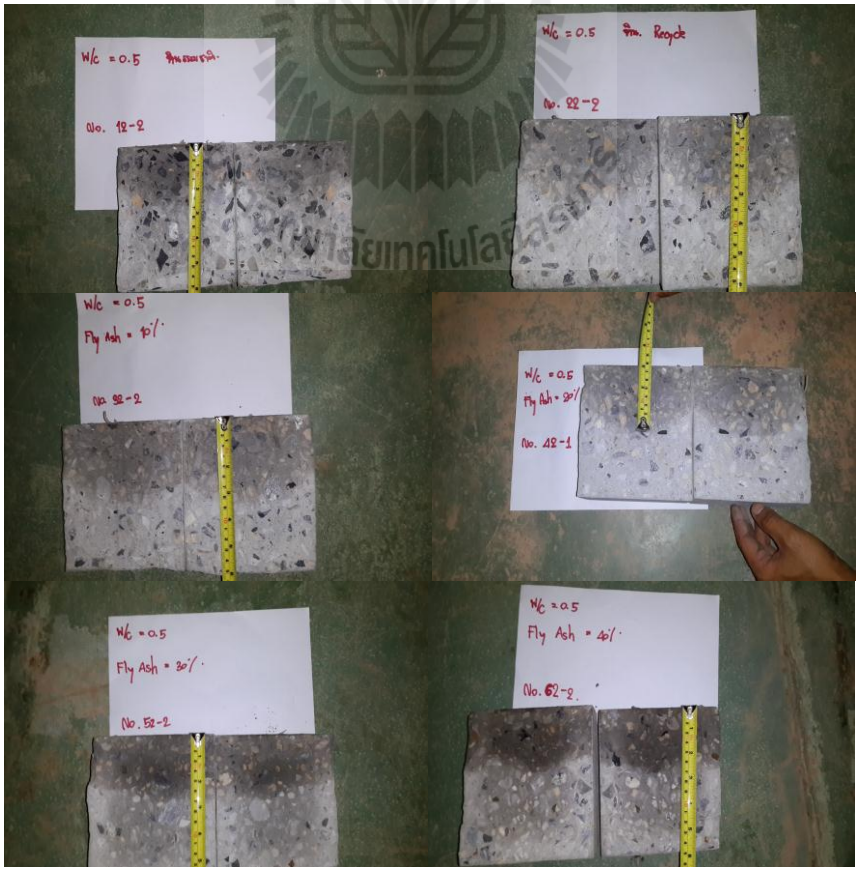
Test Description		**Specimen No.0.5F30**	
		1	**2**
Depth of Penetration (m)	d	0.06	0.062
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)	v	18.70	18.70
Time to Penetrate Depth (s)	T	86400	86400
Pressure Head (m)	h	50	50
Coefficient of Permeability (m/s)	kp	9.13×10^{-11}	9.15×10^{-11}
Average		9.14×10^{-11}	

ตารางที่ ค.24 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต 0.5F40

Test Description		Specimen No.0.5F40	
		1	2
Depth of Penetration (m)	d	0.063	0.065
Volume of Permeable Pore Space , Voids (%)	v	18.58	18.58
Time to Penetrate Depth (s)	T	86400	86400
Pressure Head (m)	h	50	50
Coefficient of Permeability (m/s)	kp	8.82×10^{-11}	8.80×10^{-11}
Average		8.81×10^{-11}	



รูปที่ ค.1 การวัดค่าความลึกที่ซึมเข้าเนื้อคอนกรีตที่ w/c = 0.3



รูปที่ ค.2 การวัดค่าความลึกที่ซึมเข้าเนื้อคอนกรีตที่ w/c = 0.5

ประวัติผู้เขียน

นายนิธิศ สุภารี เกิดเมื่อวันที่ 17 ตุลาคม 2525 จบการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา 2550 มีใบประกอบวิชาชีพวิศวกรควบคุณระดับภาคีวิศวกร สาขาวิศวกรรมโยธา ประสบการณ์ทำงาน เคยทำงานควบคุมงานก่อสร้าง ในตำแหน่งวิศวกรโยธาภาคสนาม ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2550-2553 ที่กรุงเทพมหานคร ฯ หลังจากนั้นได้กับมาทำงานช่วยครอบครัวซึ่งทำธุรกิจเกี่ยวกับรับเหมาก่อสร้างจนถึงปีปัจจุบัน ซึ่งรับงานเกี่ยวกับการสร้างฝายกั้นน้ำเป็นส่วนใหญ่ ทำให้กระผมสนใจวิจัยเรื่องนี้เป็นพิเศษ ทางครอบครัวจึงสนับสนุนให้เข้ารับการศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สำนักวิชาวิศวกรรมศาตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี