



การใช้เก้าอี้แบบดัดแปลงเพื่อปรับปรุงกำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต
ที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

นายประจักษ์ ทุลกลีกร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2557

การใช้เก้าอี้แบบดัดแปลงเพื่อปรับปรุงกำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต
ที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

นายประจักษ์ ทุลกสิกร วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(รศ. เอนก ศิริพานิชกร)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผศ. ดร. วีรชาติ ตั้งจิรภัทร)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)
(ศ. ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล)

..... กรรมการ
(รศ. ดร. สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายประจักษ์ ทูลกลสิกร
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร.วีรชาติ ตั้งจิรภัทร ศ. ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาการใช้เถ้าแกลบ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน มาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต เถ้าแกลบที่ใช้จะทำการบดละเอียดให้มีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นจึงนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน คอนกรีตแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกคือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับทรายธรรมชาติ และกลุ่มที่สองคือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต คอนกรีตทั้งสองกลุ่มใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.45 และใช้สารลดน้ำพิเศษควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดให้มีค่าระหว่าง 10–15 เซนติเมตร การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทำที่อายุ 7 28 60 และ 90 วัน ตามลำดับ การทดสอบอัตรา การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตทำที่อายุ 90 วัน การทดสอบความต้านทานคลอไรด์และทดสอบการต้านทาน การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้าทำที่อายุ 28 และ 90 วัน ผลการทดสอบ ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตจะนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับคอนกรีต ควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานและใช้มวลรวมจากธรรมชาติ

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่า คอนกรีตควบคุมอย่างเห็นได้ชัด การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ใน ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวม ที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้า

เคลือบบดละเอียดได้ที่อายุ 60 วันขึ้นไป แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้ การใช้เถ้าเคลือบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ถึง 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต เพิ่มความต้านทานคลอไรด์และความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตได้

คำสำคัญ : การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต / ความต้านทานคลอไรด์ / เถ้าเคลือบ / มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต / อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

Thesis Title	Use of Ground Rice Husk Ash with High Fineness to Improve Compressive Strength and Chloride Resistance of Recycled Aggregate Concrete
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Prajak Toolkasikorn
Thesis Advisors	Asst. Prof. Dr. Weerachat Tangchirapat Prof. Dr. Chai Jaturapitakkul
Program	Master of Engineering
Field of Study	Civil Engineering
Department	Civil Engineering
Faculty	Engineering
Academic Year	2014

Abstract

The aim of this study is on the utilization of rice husk ash, a by-product from a thermal power plant, as a cement replacement in improving the compressive strength and chloride resistance of recycled aggregate concrete. Rice husk ash was ground until the particles retained on a sieve No. 325 were less than 5 percent by weight. Portland cement was replaced by ground rice husk ash at the rates of 20, 35, and 50 percent by weight of binder. The concrete specimens were divided into 2 groups. The first group was made from recycled coarse aggregate and river sand. The second group was made from coarse and fine recycled aggregates. The water to binder ratio of all concrete was kept constant at 0.45 and superplasticizer was employed in order to maintain the slump of fresh concrete between 10 to 15 cm. The compressive strength of concrete was determined at 7, 28, 60, and 90 days and water permeability was investigated at 90 days. Rapid permeability of chloride and steel corrosion by impressed voltage method were also determined at 28 and 90 days. The results of recycled aggregate concrete were analyzed and compared with the conventional concrete which made from portland cement and natural aggregates.

The results revealed that the recycled aggregate concrete, with or without ground rice husk ash, had compressive strength lower than that of conventional concrete. However, the use of ground rice husk at 20 percent replacement in recycled aggregate concrete gave higher compressive strength than the recycled aggregate concretes without ground rice husk ash at 60 days of curing. In addition, the use of 20

to 50 percent of ground rice husk ash cement replacement in recycled aggregate concretes could improve water permeability resistance, chloride penetration resistance, and steel corrosion resistance of concrete.

Keywords: Chloride Resistance / Recycled Concrete Aggregate / Rice Husk Ash / Steel Corrosion / Water Permeability

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไป ได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ ผศ .ดร.วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และ ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความรู้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการวิจัยตลอดมา ขอขอบคุณ สำนักงาน กองทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้โครงการ “เมธีวิจัยอาวุโส สกว.” ประจำปี 2553 สัญญาเลขที่ RTA 5380002 และโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ มจร . ที่สนับสนุนเงินทุนในการ ทำวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณกรรมการสอบ ซึ่งได้แก่ ศ.เอนก ศิริพานิชกร และ รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ ที่สละเวลาอันมีค่ามา สอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ขอขอบคุณคณะเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านต่างๆขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโท นักศึกษาปริญญาเอกในห้องวิจัยคอนกรีตทุกคนที่ ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำ ในช่วงระหว่างการวิจัย และขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อ บิดา มารดา และครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้สั่งสอน ให้ผู้วิจัยมีวันนี้

ขอขอบคุณ โรงไฟฟ้าเคหาไปโอกริน และศูนย์อุตสาหกรรมอิตาเลียนไทย ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์ วัสดุบางส่วนเพื่อใช้ในการงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามในที่นี้และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นประโยชน์ช่วยเสริมสร้างความรู้ แล ะความเข้าใจ ตลอดจน ส่งเสริมการใช้ถั่วแกลบ ในงานคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมธรรมชาติ ซึ่งจะช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติรวมถึงถั่วแกลบที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม มาใช้เป็สิ่งที่มีความประโยชน์แก่งานคอนกรีตต่อไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
รายการตาราง	ฌ
รายการรูปประกอบ	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	3
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่ผ่านมา	5
2.1 วัสดุปอชโซลาน	5
2.2 ปฏิริยาไฮเดรชันและปฏิริยาปอชโซลาน	5
2.3 มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต	6
2.4 เถ้าแกลบ	10
2.5 การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต	13
2.6 การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต	15
2.7 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์	16
3. วิธีการทดสอบ	19
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	19
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	19
3.3 วิธีการศึกษา	20
3.4 สัญลักษณ์ในงานวิจัย	28

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	30
4.1 คุณสมบัติจำเพาะของวัสดุประสาน	30
4.2 คุณสมบัติจำเพาะของมวลรวม	32
4.3 กำลังอัดของคอนกรีต	34
4.4 อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต	39
4.5 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต	42
4.6 ระยะเวลาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต	46
4.7 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต	50
4.8 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม	56
4.9 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม	61
5. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	64
5.1 สรุปผลการทดลอง	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	64
เอกสารอ้างอิง	66
ภาคผนวก	74
ก คุณสมบัติจำเพาะของวัสดุ	74
ข ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	83
ค ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต	93
ง ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์	103
จ ผลการทดสอบระยะเวลาการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต	109
ฉ ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต	113
ช ผลการทดสอบพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็ก	123
ซ ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็ก	127
ประวัติผู้วิจัย	131

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 ส่วนผสมของคอนกรีต	22
4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของวัสดุ	31
4.2 องค์ประกอบทางเคมี	32
4.3 คุณสมบัติจำเพาะของมวลรวม	32
4.4 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	35
4.5 อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต	40
4.6 การแทรกซึมคลอไรด์และร้อยละการแทรกซึมคลอไรด์	43
4.7 ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต	46
4.8 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 28 วัน	51
4.9 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 90 วัน	52
4.10 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต	58
4.11 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีต	62
ก.1 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	75
ก.2 ความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบก่อนบดละเอียด	75
ก.3 ความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบหลังบดละเอียด	75
ก.4 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของทรายธรรมชาติ	76
ก.5 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหินปูนย่อย	76
ก.6 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต	77
ก.7 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต	77
ก.8 การกระจายตัวของทรายธรรมชาติ	78
ก.9 การกระจายตัวของหินปูนย่อย	79
ก.10 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต	80
ก.11 การกระจายตัวของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต	81
ก.12 การแตกหักของหินปูนย่อย	82
ก.13 การแตกหักของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต	82
ข.1 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต CT	84
ข.2 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต RC	85
ข.3 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต RCR20	86

ตาราง	หน้า
ข.4 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต RCR35	87
ข.5 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต RCR50	88
ข.6 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต RCF	89
ข.7 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต RCFR20	90
ข.8 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต RCFR35	91
ข.9 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต RCFR50	92
ค.1 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต CT ที่อายุ 90 วัน	94
ค.2 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RC ที่อายุ 90 วัน	95
ค.3 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCR20 ที่อายุ 90 วัน	96
ค.4 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCR35 ที่อายุ 90 วัน	97
ค.5 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCR50 ที่อายุ 90 วัน	98
ค.6 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCF ที่อายุ 90 วัน	99
ค.7 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCFR20 ที่อายุ 90 วัน	100
ค.8 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCFR35 ที่อายุ 90 วัน	101
ค.9 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCFR50 ที่อายุ 90 วัน	102
ง.1 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต CT	104
ง.2 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต RC	104
ง.3 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต RCR20	105
ง.4 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต RCR35	105
ง.5 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต RCR50	106
ง.6 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต RCF	106
ง.7 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต RCFR20	107
ง.8 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต RCFR35	107
ง.9 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต RCFR50	108
จ.1 ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต CT	110
จ.2 ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต RC	110
จ.3 ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต RCR20	110
จ.4 ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต RCR35	111
จ.5 ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต RCR50	111
จ.6 ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต RCF	111

ตาราง	หน้า
จ.7 ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต RCFR20	112
จ.8 ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต RCFR35	112
จ.9 ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต RCFR50	112
ฉ.1 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต CT	114
ฉ.2 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต RC	115
ฉ.3 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต RCR20	116
ฉ.4 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต RCR35	117
ฉ.5 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต RCR50	118
ฉ.6 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต RCF	119
ฉ.7 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต RCFR20	120
ฉ.8 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต RCFR35	121
ฉ.9 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต RCFR50	122
ช.1 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต CT	124
ช.2 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต RC	124
ช.3 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต RCR20	124
ช.4 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต RCR35	125
ช.5 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต RCR50	125
ช.6 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต RCF	125
ช.7 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต RCFR20	126
ช.8 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต RCFR35	126
ช.9 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต RCFR50	126
ช.1 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในคอนกรีต CT	128
ช.2 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในคอนกรีต RC	128
ช.3 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในคอนกรีต RCR20	128
ช.4 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในคอนกรีต RCR35	129
ช.5 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในคอนกรีต RCR50	129
ช.6 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในคอนกรีต RCF	129
ช.7 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในคอนกรีต RCFR20	130
ช.8 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในคอนกรีต RCFR35	130
ช.9 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในคอนกรีต RCFR50	130

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
1.1 การทิ้งเก้าอี้เหล็กที่ได้มาจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า	2
3.1 ชุดทดสอบค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต	23
3.2 ชุดทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์	25
3.3 ชุดทดสอบระยะการแทรกซึมคลอไรด์	26
3.4 การวัดระยะการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่เสาคอนกรีต	26
3.5 ชุดทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต	27
4.1 แสดงลักษณะทั่วไปและสีของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	30
4.2 มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติ	33
4.3 มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและหินปูนย่อย	33
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเก้าอี้เหล็กบดละเอียด	38
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเก้าอี้เหล็กบดละเอียด	39
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับเก้าอี้เหล็กบดละเอียด	42
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเก้าอี้เหล็กบดละเอียด	45
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเก้าอี้เหล็กบดละเอียด	45
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเก้าอี้เหล็กบดละเอียด	48

รูป	หน้า
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใ้้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด	48
4.11 ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใ้้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียดที่อายุ 90 วัน	49
4.12 ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของ คอนกรีตที่ใ้้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียดที่อายุ 180 วัน	49
4.13 ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใ้้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียดที่อายุ 90 วัน	49
4.14 ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของ คอนกรีตที่ใ้้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียดที่อายุ 180 วัน	50
4.15 ลักษณะการแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีต	54
4.16 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใ้้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติ ที่อายุ 28 วัน	55
4.17 ค่ากระแสไฟฟ้า ที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใ้้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติ ที่อายุ 90 วัน	55
4.18 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใ้้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่อายุ 28 วัน	56
4.19 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใ้้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ที่อายุ 90 วัน	56
4.20 ลักษณะการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใ้้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติ ที่อายุ 28 วัน	59
4.21 ลักษณะการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใ้้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติ ที่อายุ 90 วัน	59
4.22 ลักษณะการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใ้้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน	60
4.23 ลักษณะการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใ้้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ที่อายุ 90 วัน	60

รูป	หน้า
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้มวลรวม หยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด	63
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้มวลรวม หยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด	63
ก.1 การกระจายตัวของทรายธรรมชาติ	78
ก.2 การกระจายตัวของหินปูนย่อย	79
ก.3 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต	80
ก.4 การกระจายตัวของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต	81
ค.1 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต CT ที่อายุ 90 วัน	94
ค.2 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RC ที่อายุ 90 วัน	95
ค.3 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCR20 ที่อายุ 90 วัน	96
ค.4 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCR35 ที่อายุ 90 วัน	97
ค.5 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCR50 ที่อายุ 90 วัน	98
ค.6 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCF ที่อายุ 90 วัน	99
ค.7 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCFR20 ที่อายุ 90 วัน	100
ค.8 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCFR35 ที่อายุ 90 วัน	101
ค.9 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCFR50 ที่อายุ 90 วัน	102

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ปัจจุบันการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมในงาน คอนกรีตยังไม่เป็นที่นิยมนัก โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตบริเวณชายฝั่งทะเล เนื่องจากมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีคุณภาพต่ำกว่ามวลรวมที่ได้จากธรรมชาติ ทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีคุณสมบัติที่ต่ำลง ซึ่งปัจจุบันแหล่งมวลรวมตามธรรมชาติมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากคอนกรีตยังเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในงานก่อสร้าง ถ้าสามารถนำเศษคอนกรีตเหล่านี้มาใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีตได้ จะเป็นการใช้ประโยชน์จากเศษคอนกรีตที่คุ้มค่า และยังสามารถลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติได้อีกด้วย

ปัจจุบันได้มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาการนำเศษคอนกรีตมาย่อยเพื่อนำกลับมาใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีต และพบว่าเศษคอนกรีตเหล่านี้สามารถนำกลับมาใช้เป็นมวลรวมได้ (สุรศักดิ์ ภู่อันติพงษ์, 2545) อย่างไรก็ตามการนำมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมาใช้แทนมวลรวมธรรมชาติยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ทำให้ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตลดลง การดูดซึมน้ำที่สูงของมวลรวมทำให้คอนกรีตสูญเสียค่ายุบตัวอย่างรวดเร็ว กำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตปกติ ตลอดจนความทนทานของคอนกรีต (Hansen และ Narud, 1983)

ในขณะเดียวกัน ถ้าแกลบเป็นวัสดุที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมในงานวิจัยด้านคอนกรีตมาอย่างยาวนาน และพบว่าแกลบสามารถช่วยปรับปรุงกำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตให้ดีขึ้นได้ ซึ่งแกลบจำนวนมากเป็นผลพลอยได้จากการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงในการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ใน พ.ศ. 2556 ประเทศไทยมีปริมาณข้าวเปลือก 20.5 ล้านตัน/ปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2014) หลังจากการสีข้าวเปลือกแล้วจะเหลือ เป็นแกลบร้อยละ 20 ของน้ำหนักข้าวเปลือกหรือแกลบประมาณ 4.1 ล้านตัน/ปี และเมื่อนำแกลบไปเผาจะเหลือแกลบร้อยละ 4 ของน้ำหนักข้าวเปลือก (ปริญญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2552) หรือประมาณ 820,000 ตัน/ปี และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นในอนาคต ซึ่ง การใช้ประโยชน์จากแกลบเหล่านี้ยังถือว่าน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณที่มีทั้งหมด ทำให้ต้องนำแกลบไปกำจัดทิ้ง ก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมตามมา ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 การทิ้งเถ้าแกลบที่ได้มาจากระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการนำเถ้าแกลบมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ 1 ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ ทั้งในด้านกำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์ ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่บ่งบอกความคงทนของคอนกรีตที่ใช้ มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมาเป็นส่วนผสม อีกทั้งผลที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตในงานคอนกรีตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาค่ากำลังอัดจากการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต
2. เพื่อศึกษาอัตราการซึม ของน้ำผ่านคอนกรีต จากการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต
3. เพื่อศึกษาค่า การแทรกซึมคลอไรด์และระยะการแทรกซึมคลอไรด์ จากการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต
4. เพื่อศึกษาความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต จากการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต จากโรงย่อยเศษคอนกรีตจังหวัดสระบุรี ซึ่งได้จากการย่อยชิ้นส่วนคอนกรีตที่ไม่ใช้หรือหัวเสาเข็มคอนกรีตที่ตัดทิ้งด้วยเครื่องย่อยแล้วแยกขนาดเป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดด้วยตะแกรงเบอร์ 4 และทำความสะอาดมวลรวมดังกล่าวด้วยการล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อขจัดสิ่งสกปรกออกจากมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ โมดูลัสความละเอียด การกระจายขนาด และการแตกหักของมวลรวม จากนั้นนำมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต โดยกลุ่มที่หนึ่งใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อย เศษคอนกรีต แทนที่หินปูนย่อยทั้งหมดและกลุ่มที่สองใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยและทรายธรรมชาติทั้งหมด

นำเถ้าแกลบจากโรงงานผลิต กระแสไฟฟ้า จังหวัดสุพรรณบุรี มาบดจนมีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 5 ± 1 โดยน้ำหนัก และใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตทั้งสองกลุ่ม ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำการทดสอบความถ่วงจำเพาะและองค์ประกอบทางเคมี ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 ใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ในช่วง 10-15 เซนติเมตร หล่อตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร

จากนั้นทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ ทดสอบระยะการแทรกซึมคลอไรด์ ทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต ทดสอบหาพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม และทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบของคอนกรีตทั้งสองกลุ่มกับคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์และมวลรวมจากธรรมชาติ

1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้นอกจากบทที่ 1 ซึ่งเป็นบทนำแล้วยังประกอบด้วยบทที่นำเสนอสิ่งต่างๆ แยกออกมาเป็นส่วนๆ ดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึง งานวิจัยที่ผ่านมาของการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต เถ้าแกลบที่ใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีต ปฏิกิริยาปอซโซลาน อัตราการซึม ของน้ำผ่านคอนกรีต การแทรก

ซึมคลอไรด์ ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม และการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

บทที่ 3 กล่าวถึง วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ ในงานวิจัย อัตราส่วนผสม รวมทั้งการเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังอัด อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต การแทรกซึมคลอไรด์ ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม และการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

บทที่ 4 กล่าวถึง ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ กำลังอัด อัตราการซึมของน้ำ ผ่านคอนกรีต การแทรกซึมของคลอไรด์ ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม และการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะที่น่าสนใจ จากการใช้ถ้ำเกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต

เอกสารอ้างอิงแสดงถึงงานวิจัยหรือบทความที่ได้อ้างอิงในงานวิจัยนี้

ภาคผนวกแสดงผลการทดสอบต่างๆ ที่ได้จากการวิจัยทั้งหมด

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่ผ่านมา

ในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งได้แก่ วัสดุปอซโซลาน ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปฏิกิริยาปอซโซลาน งานวิจัยที่ผ่านมาของการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ถั่วแกลบ การซึมของน้ำ ผ่านคอนกรีต การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ รวมถึงงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ตามนิยามของ ASTM C 618 (2001) หมายถึง วัสดุที่มีธาตุซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่อุณหภูมิปกติได้ ทำให้เกิดสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน วัสดุปอซโซลานเมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และได้สารประกอบตัวใหม่ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานคล้ายกับปูนซีเมนต์ ซึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)

2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาประเภท คาย ความร้อน มีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-A-H) ดังแสดงในสมการที่ (2.1) ถึง (2.3)



ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดจากสมการที่ (2.1) และ (2.2) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน มีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ดังแสดงในสมการที่ (2.4) และ (2.5)



ค่า x , y และ z ในสมการที่ (2.4) และ (2.5) เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และ อุดรพูนในคอนกรีต จึง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น

2.3 มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต (Recycled Concrete Aggregates) เป็นมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า เช่น ชิ้นส่วนคอนกรีตที่ไม่ใช่ หัวเสาเข็มคอนกรีตที่ตัดทิ้ง ซึ่งเศษคอนกรีตเหล่านี้ไม่ได้ใช้ประโยชน์เท่าที่ควร ดังนั้นจึงนำเศษคอนกรีตเหล่านี้มาย่อยเป็นมวลรวมและใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตทำให้เกิดประโยชน์อีกครั้ง ทั้งยังช่วยลดปริมาณการใช้ทรัพยากรธรรมชาติได้อีกด้วย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตในต่างประเทศพบว่า Hansen และ Narud (1983) ศึกษาถึงผลกระทบจากการใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังแตกต่างกัน 3 ระดับ แทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติในส่วนผสมคอนกรีต พบว่าคอนกรีตสดมีความสามารถในการทำงานลดลงและสูญเสียค่ายุบตัวอย่างรวดเร็ว ขณะที่กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังอัดของเศษคอนกรีตที่นำมาย่อยเพื่อทำเป็นมวลรวมหยาบ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงขึ้น

Oliveira และ Vazquez (1996) ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากปริมาณความชื้นของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยมวลรวมที่ใช้มีปริมาณความชื้นแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ที่สภาวะอบแห้ง สภาวะผิวแห้ง และสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ซึ่งมีปริมาณความชื้นร้อยละ 0, 88-89 และ 100 ตามลำดับ พบว่าปริมาณความชื้นของมวลรวมที่ระดับต่างๆ มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตไม่แตกต่างกันมากนัก โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตทั้ง 3 สภาวะ มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมประมาณร้อยละ 10 และการใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งส่งผลให้ การรับแรงคดของคอนกรีตมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวม ที่อยู่ในสภาวะอื่นๆ

Limbachiya และคณะ (2000) ได้ศึกษาคอนกรีตกำลังสูงโดยใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยคอนกรีตสำเร็จรูปที่หล่อไม่ผ่านมาตรฐานแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติร้อยละ 30, 50 และ 100 พบว่าการใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยคอนกรีตแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติไม่เกินร้อยละ 30 ไม่มีผลต่อกำลังอัด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบจากกา รย่อยคอนกรีตส่งผลให้ค่าการยึดหดตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยคอนกรีตไม่สามารถช่วยลดค่า การซึมผ่านของคลอไรด์ แต่ ทำให้การเกิดการเสียหายจากสภาวะแข็งตัวและละลายน้ำ (Freezing and Thawing) สลับกันมากขึ้น

Ajdukiewicz และ Kliszczewicz (2002) นำเศษคอนกรีตจากสถานที่รื้อถอนจริงที่แตกต่างกัน 6 แห่ง ที่มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 35-70 เมกะปาสคาล มาย่อยและใช้เป็นมวลรวมละเอียดและมวลรวม หยาบ สำหรับทำคอนกรีตกำลังสูง พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีกำลังอัดไม่ต่ำกว่า 80 เมกะปาสคาล ซึ่งสูงกว่ากำลังของคอนกรีตเดิมที่นำมาใช้ย่อยเป็นมวลรวม สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตพบว่า มีลักษณะคล้ายคลึงกับคอนกรีตปกติ โดยมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าเล็กน้อย ส่วน การรับแรง ดึงของคอนกรีตมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 8 เมื่อใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับทรายจากธรรมชาติ และลดลงร้อยละ 20 เมื่อใช้ทั้งมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติทั้งหมด อย่างไรก็ตามคุณสมบัติดังกล่าวที่ลดลงสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยใช้สารผสมเพิ่มในส่วนผสมของคอนกรีตเช่น ซิลิกาฟูม หรือ สารลดปริมาณน้ำ

Gomez-Soberon (2002) ได้ศึกษาความพรุนของคอนกรีตซึ่งใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม ด้วยวิธี Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) พบว่าคอนกรีตดังกล่าวมีความพรุนและโพรงอากาศมากขึ้นเมื่อใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น โดยความพรุนและโพรงอากาศดังกล่าว ขึ้นอยู่กับอายุของคอนกรีตและปริมาณของมอร์ตาร์ที่ยึดเกาะที่ผิวของมวลรวม ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความพรุนและโพรงอากาศในคอนกรีต ส่งผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น กำลังอัด กำลังดึง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ตลอดจนความทนทานของคอนกรีต

Ryu (2002) เสนอวิธีการปรับปรุงกำลังและค่าการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต โดยใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ของวัสดุประสาน ซึ่งพบว่าชั้นความหนาของ Interfacial Transition Zones ลดลงร้อยละ 8 ขณะที่การแทรกซึมของสารละลายคลอไรด์ลดลงร้อยละ 17 ส่วนกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 18 และ 21 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพของ

คอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตโดยใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนช่วยเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมจากสารเคมีที่เป็นสาเหตุสำคัญในการทำลายคุณภาพของคอนกรีต

Ann และคณะ (2008) ได้ศึกษากำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 30 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกอนเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground Granulated Blast Furnace Slag, GGBS) ร้อยละ 65 พบว่าสามารถช่วยพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบเท่ากับคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีขึ้น

สำหรับงานวิจัยในประเทศไทยพบว่า พิชัย นิมิตรยสกุล และ สรรค์ สยามภักดิ์ (2538) ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้เศษหินปูนเก่าและเศษอิฐหักเป็นมวลรวมหยาบ พบว่าเมื่อพิจารณา เฉพาะคุณสมบัติการรับกำลังอัดและกำลังรับแรงคด เศษหินปูนเก่าสามารถใช้แทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติได้ทั้งหมด ขณะที่เศษอิฐหักไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน ซึ่งนอกจากเหตุผลทางด้านการรับกำลังแล้วยังส่งผลให้คอนกรีตเกิดการหดตัวสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่าการแทนที่เศษหินปูนเก่าและเศษอิฐหักในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้การรับกำลังของคอนกรีตมีค่าลดลง ทั้งนี้การใช้สารลดน้ำพิเศษช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีตอีกทั้งยังช่วยเพิ่มการพัฒนาการรับกำลังอัดของคอนกรีตในระยะแรก

สุรศักดิ์ ภู่อันติพงษ์ (2545) นำเศษคอนกรีตที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดที่มีช่วงกำลังอัดแตกต่างกัน 3 ระดับ คือระหว่าง 180-250, 250-400 และ 400-550 กก/ซม² จากห้องปฏิบัติการคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี มาย่อยด้วยเครื่องย่อยคอนกรีต แบบ Swing Hammer Mills และใช้เป็นมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตสำหรับแทนที่ทรายแม่น้ำและหินปูนย่อยในส่วนผสมคอนกรีต ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตสดที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีการสูญเสียค่ายุบตัวเร็วขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ขณะที่การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ช่วยยืดระยะเวลาสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตออกไปเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าถ่านหินในส่วนผสม ส่วนกำลังอัดของ คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียดมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมร้อยละ 13 ถึง 15 โดยมีค่าขึ้นอยู่กับกำลังของเศษคอนกรีตที่นำมาใช้ย่อยเพื่อทำเป็นมวลรวม และมีค่าลดลงไม่เกินร้อยละ 22 ของคอนกรีตควบคุมเมื่อใช้ทั้งมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติทั้งหมด โดยกำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่ด้วยมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น

Weerachart Tangchirapat และคณะ (2008) ได้ศึกษาการนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติทั้งหมดและแทนที่มวลรวมละเอียดจากธรรมชาติด้วยมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้สามารถช่วยพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตให้มีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใส่เถ้าดังกล่าว และยืกระยะเวลาการสูญเสียค่าบดตัวออกไป ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตดังกล่าวต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมร้อยละ 4 และมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากมาตรฐาน ACI 318 (American Concrete Institute, 2005)

ปกป้อง รัตนชู (2551) ได้ศึกษาการนำเถ้าถ่านหิน และเถ้าขานอ้อยมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมด พบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถช่วยให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตพัฒนากำลังอัดให้สูงขึ้นได้ถึงร้อยละ 98 ของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตยังสามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงกว่าร้อยละ 90 ของกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่อายุ 90 วัน ในกรณีที่ใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้ได้กำลังอัดสูงกว่าร้อยละ 90 ของคอนกรีตควบคุม

สุพัตร์ ขำคล้าย (2552) ได้ศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า พบว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีผลต่อการเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตไม่มากนัก และมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าร้อยละ 7 ที่อายุ 180 วัน แต่เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสามารถพัฒนาค่ากำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้ และช่วยทำให้อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตลดลงได้ทั้งที่อายุ 28 และ 90 วัน

รัฐพล สมนา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554) ได้ศึกษาการนำเถ้าขานอ้อยบดละเอียดมาใช้ปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ผลการศึกษาพบว่าการใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถปรับปรุง กำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และความต้านทานคลอไรด์ ในช่วงอายุปลายได้ โดยความต้านทานคลอไรด์จะเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่เถ้าขานอ้อยบดละเอียดที่เพิ่มขึ้น

2.4 เถ้าแกลบ

เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากการนำแกลบที่เหลือจากการสีข้าวมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกข้าวมากเป็นอันดับต้นๆ ของโลก เมื่อนำแกลบไปเผาจะได้เถ้าแกลบประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักแกลบ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา Mehta (1977) ได้ทำการศึกษาซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และปูนขาวผสมเถ้าแกลบ พบว่าความต้องการน้ำในการผสมเพิ่มขึ้น ปูนขาวผสมเถ้าแกลบจะมีกำลังที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ แต่ยังสูงมากพอที่จะทำเป็นอิฐก่อสร้างทั่วไป สำหรับปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบสามารถแทนที่ได้สูงถึงร้อยละ 50 และยังให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนในการผสมตั้งแต่อายุ 3 และ 7 วันขึ้นไป ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติที่ดีมากของเถ้าแกลบในการนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์

Sugita และคณะ (1992) ได้เผาแกลบที่อุณหภูมิ 400 ถึง 800 องศาเซลเซียส และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ทุกๆ 50 องศาเซลเซียส และศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ ได้แก่ กำลังอัด , การหดตัวแห้ง, การทนทานต่อการกรัด , และความทนทานต่อการเป็นน้ำแข็งและละลายน้ำสลับกัน และคาร์บอนเนชั่น จากผลการทดสอบพบว่า ปริมาณความไม่เป็นผลึกของเถ้าแกลบจะมากเมื่อมีอุณหภูมิการเผาต่ำกว่าจุดวาบไฟ (Flash Point) และมีระยะเวลาการเผาที่สั้น ทำให้ประหยัคล้งงานในการเผาได้ส่วนหนึ่งและยังได้เถ้าแกลบที่มีคุณภาพดี เถ้าแกลบที่เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 80 นาที จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าวัสดุปอชโซลานอื่นๆ การเกิดปฏิกิริยาปอชโซลานของ เถ้าแกลบจะคล้ายคลึงกับของซิลิกาฟูมแต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับเวลาในการบด ส่วนการหดตัวแห้งจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ รวมถึงคุณสมบัติอื่นๆที่ดีขึ้นเมื่อใช้เถ้าแกลบผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ การวิจัยนี้จึงได้สรุปว่าเถ้าแกลบในรูปที่ไม่เป็นผลึกมีคุณสมบัติที่เป็นวัสดุปอชโซลานที่ดีชนิดหนึ่ง

ในขณะเดียวกัน Mazlum และ Uyan (1992) ใช้แกลบในงานวิจัยโดยแบ่งการเผาออกเป็น 2 อุณหภูมิ คือ 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาครึ่งชั่วโมง และมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.57 เท่ากันทั้งหมด เมื่อหล่อตัวอย่างเสร็จแล้วทำการบ่มน้ำที่ อายุ 28 วัน และนำไปบ่มต่อในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจนถึงอายุการทดสอบกำลังอัดและกำลังคั้ด จากผลการทดสอบในครั้งนี้ แสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบมีกำลังและความทนทานเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม

ต่อมา Mehta และ Folliard (1995) ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเฉพาะถ้าแกลบผสมปูนซีเมนต์ในด้าน ของ ความทนทาน และเพื่อเป็นการตรวจสอบผลการวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้ในด้านความทนทานของ คอนกรีตและมอร์ตาร์ที่ผสมถ้าแกลบ ในสภาวะที่เป็น อันตรายต่อคอนกรีต ได้แก่ ในสภาวะที่มีกรด ไฮโดรคลอริก , ผลกระทบจากซัลเฟต , ปฏิกริยาอัลคาไล-ซิลิกาและผลกระทบของการ กลายเป็น น้ำแข็งของน้ำในคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าคอนกรีตและมอร์ตาร์ ที่ผสมถ้าแกลบ สามารถลดการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการทำลายจากกรดไฮโดรคลอริกได้ นอกจากนี้ยังสามารถลดการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตได้ และยังสามารถต้านทานการกลายเป็น้ำแข็ง ของน้ำในคอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมทั้งที่ไม่ได้สารกักกระจายฟองอากาศ

Zhang และ Mohan (1996) ได้ทดลองทำการศึกษาการใช้ถ้าแกลบในคอนกรีต สมรรถนะสูง โดย ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตสด ได้แก่ ความสามารถในการเท , การแยกตัว, ระยะเวลาการก่อ ตัว, การเพิ่มอุณหภูมิแบบบอโตจีนีส และยังศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ได้แก่ กำลังอัด, แรงดึงผ่าซิก, กำลังคด, โมดูลัสยืดหยุ่น, การหดตัวแบบแห้งและการต้านทานคลอไรด์ ผลที่ได้ แสดงให้เห็นว่าถ้าแกลบมีความเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีต ความสามารถสูงได้ดี แต่หากต้องการให้มีความสามารถในการเทและระยะเวลาการก่อตัว ตามต้องการ ต้องใช้สารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้น มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมและ คอนกรีตควบคุม และจากผลการ ทดสอบคุณสมบัติอื่นๆ พบว่าคอนกรีตที่ผสมถ้าแกลบดีกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับซิลิกาฟูมและดีกว่า คอนกรีตควบคุมอย่างเห็นได้ชัด

Bhanumathidas และ Mehta (2001) ได้ทำการศึกษาส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมถ้าแกลบแทนหินร่วน กับ ถ้าแกลบ โดยประยุกต์ใช้ในสถานการณ์ที่มีการเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้าแกลบหินมาก ขึ้น โดยสมัยแรกมีการนิยมนแทนที่เพียงร้อยละ 15-30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แต่ในปัจจุบันมี การวิจัยและพัฒนาถ้าแกลบหินจนมีการแทนที่สูงถึงร้อยละ 50-60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และ ใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษ เพื่อให้กำลังที่อายุต้นคี่ขึ้น แต่ในคอนกรีตที่มีการแทนที่ถ้าแกลบหินปริมาณ มากและไม่ใช้สารลดน้ำพิเศษจะไม่สามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ในช่วงอายุต้น แต่ สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยใช้ซิลิกาฟูมหรือถ้าแกลบที่มีปฏิกิริยาปอ ซโซลานสูง ซึ่งจากงานวิจัยที่ใช้ ถ้าแกลบหินร่วมกับถ้าแกลบพบว่าความทนทานของคอนกรีตและความต้านทานคลอไรด์ดีกว่า คอนกรีตที่ใช้ถ้าแกลบหินเพียงอย่างเดียวและยังสามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้นได้ดี อีกด้วย

สำหรับงานวิจัยในประเทศไทย ก็มีการศึกษาเกี่ยวกับ ถ้าแกลบเพื่อนำมาใช้ในงานคอนกรีตอย่าง ต่อเนื่องเช่นเดียวกันและได้ผลลัพธ์ที่ดีเช่นเดียวกับงานวิจัยในต่างประเทศ โดย Justin (1980) ได้ศึกษา

การวิเคราะห์ถึงลักษณะของซิลิกาในเถ้าแกลบ โดยใช้วิธี X-Ray Diffraction พบว่าการเผาเถ้าแกลบที่อุณหภูมิในช่วง 200 ถึง 800 องศาเซลเซียส จะได้เถ้าแกลบที่มีซิลิกาอยู่ในรูปที่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยา และเมื่อเผาเถ้าแกลบที่อุณหภูมิ 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส จะได้เถ้าแกลบอยู่ในรูปของผลึก ซึ่งซิลิกาจะมีความเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา และยังพบอีกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบที่เผาที่อุณหภูมิ 200 ถึง 800 องศาเซลเซียส มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน แปรผันตรงตามอุณหภูมิที่เผา

Alex (1981) ได้ศึกษาถึงการผลิตเถ้าแกลบด้วยกระบวนการง่ายๆ และประหยัด เพื่อนำเถ้าแกลบมาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต โดยพิจารณาการผลิตเถ้าแกลบไว้ 2 วิธี คือการเผาในที่โล่ง และการเผาในเตาเพอร์โรซิเมนต์ พบว่า การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่าการใช้เถ้าแกลบร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก มีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน จากนั้นยังพบอีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบมีความทนทานต่อการรุดได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบที่เผาในเตาเพอร์โรซิเมนต์ มีกำลังอัดที่ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบที่เผาในที่โล่ง

ปริญญา จินดาประเสริฐ และบัณฑิต หิรัญสถิตพร (2536) ได้ศึกษาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบ, เถ้าถ่านหิน และสารลดน้ำพิเศษ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, เถ้าแกลบดำจากโรงสี, เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และสารซัลโฟเนตเนพทาซีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสต พบว่า การใส่สารลดน้ำพิเศษจะทำให้คุณสมบัติต่างๆ โดยเฉพาะกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหิน ดีขึ้น โดยใช้สารลดน้ำพิเศษระหว่างร้อยละ 1.25–3.00 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ (2543) ได้ศึกษาคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบ โดยการบดอัดใช้วิธีแบบ โมดิฟายด์ พรอคเตอร์ (Modified Proctor) ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่าเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดละเอียดแล้วสามารถใช้ทำคอนกรีตบดอัดได้เช่นกัน แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของเถ้าแกลบเป็นหลัก โดยงานวิจัยได้ระบุว่าเถ้าแกลบดำที่มีปริมาณคาร์บอนสูงจะทำให้คอนกรีตบดอัดมีกำลังต่ำจึงควรเลือกใช้เถ้าแกลบดำที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำๆ

สหชัย แก่นอากาศ และวนิดา เพ็ญสุวรรณ (2545) ศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อก โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ 3 อัตราส่วน ได้แก่ 60:40, 50:50 และ 40:60 และเถ้าแกลบที่ใช้มี 2 ชนิด คือเถ้าแกลบขาวและเถ้าแกลบเทาดำ ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อกลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น แต่คอนกรีตบล็อกที่ใช้อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบเท่ากับ 60:40 มีกำลังอัดที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และ

ผลจากความแตกต่างของชนิดถ้าเกลือในแง่ของกำลังอัดมีไม่มากนัก คอนกรีตบล็อกที่ใช้เกลือขาวมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตบล็อกที่ผสมเกลือเกล็ดเล็กน้อย

2.5 การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

เนื่องจากคอนกรีตไม่ได้เป็นวัสดุที่ทึบน้ำแต่เป็นวัสดุที่น้ำซึมผ่านได้ในอัตราที่ช้า เมื่อน้ำไม่สามารถซึมผ่านเข้าเนื้อคอนกรีตได้หรือซึมผ่านได้ช้าลงจึงสร้างความเสียหายต่อคอนกรีตได้น้อยลง หรือเมื่อคอนกรีตมีอัตราการซึมของน้ำผ่าน คอนกรีตสูงแสดงว่าสารละลายต่างๆ สามารถเข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้เร็วขึ้น เช่น เมื่อสารละลายซัลเฟต ซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและเกิดการแตกร้าว จากนั้นสารละลายคลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดเป็นสนิมและดันคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมให้เกิดรอยร้าวและหลุดล่อนออกมาในที่สุด การทดสอบหาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตยังไม่มีมาตรฐานที่แน่นอน ปัจจุบันงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ทดสอบหาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมักพบในต่างประเทศ ส่วนในประเทศไทยงานวิจัยในด้านนี้กำลังพัฒนา และเริ่มมีผลการศึกษามากขึ้น

Khatri และ Sirivivatnanon (1997) ได้ทำการศึกษาวิธีการทดสอบการหาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต โดยวิธีที่ใช้ในการทดสอบมี 2 วิธี คือ วิธีการไหล (Flow method) และวิธีการวัดระยะการซึม (Penetration method) ซึ่งทั้ง 2 วิธีใช้หลักการไหลของน้ำคงที่และเทคนิคการวัดระยะการซึมของน้ำได้ในคอนกรีตในการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ผลการวิจัยพบว่าทั้ง 2 วิธีให้ค่าเทียบเคียงกันได้ โดยวิธี Flow method มีค่าเท่ากับ 0.75×10^{-12} เมตร/วินาที ส่วนวิธี Penetration method ให้ค่าเท่ากับ 0.60×10^{-12} เมตร/วินาที และยังแนะนำว่าวิธีการไหล เหมาะสำหรับการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่มีอัตราการซึมที่ค่อนข้างสูง ส่วนวิธีการวัดระยะการซึมเหมาะสำหรับใช้หาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่มีค่าต่ำมาก

ต่อมา Ludirdja และคณะ (1989) ได้เสนอวิธีการวัดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต โดยอาศัยหลักการไหลของน้ำผ่านตัวอย่างคอนกรีตตามแรงโน้มถ่วงของโลก วัดอัตราการไหลเป็นเวลา 20 วัน แล้วใช้ค่า 7 วันสุดท้ายเพื่อนำมาคำนวณหาค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต โดยคอนกรีตมีค่า W/C เท่ากับ 0.6 มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตประมาณ 15×10^{-12} เมตร/วินาที นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นทำให้โพรงในคอนกรีตลดลง ซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถของคอนกรีตในการต้านทานการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

Zongjin และ gnoK-gnuahC (2000) ทำการศึกษาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต โดยใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag) เถ้าถ่านหิน และซิลิกาฟูม มาแทนที่ปูนซีเมนต์ ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตดังต่อไปนี้ ปูนซีเมนต์ต่อตะกรันเตาถลุงเหล็ก เท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ต่อตะกรันเตาถลุงเหล็กต่อเถ้าถ่านหิน เท่ากับ 50:25:25 โดยน้ำหนัก และปูนซีเมนต์ต่อตะกรันเตาถลุงเหล็กต่อซิลิกาฟูม เท่ากับ 50:40:10 โดยน้ำหนัก คอนกรีตมีกำลังอัดอยู่ในช่วง 60-72 เมกะปาสกาล ที่อายุ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่าการใช้อัตราส่วนผสมของตะกรันเตาถลุงเหล็กกับเถ้าถ่านหิน ทำให้อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดลงและมีค่า เท่ากับ 7.27×10^{-13} เมตร/วินาที หรือคิดเป็นร้อยละ 0.11 ของคอนกรีตธรรมดาที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม

นอกจากนี้ Malhotra และ Metha (2002) ศึกษาการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก ใช้ความหนาของก้อนตัวอย่าง 5 เซนติเมตร โดยใช้วิธีทดสอบ Under Uniaxial Flow มีแรงดันทดสอบเท่ากับ 12.7 เมกะปาสกาล พบว่าคอนกรีตมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตน้อยกว่า 1×10^{-13} เมตร/วินาที โดยให้เหตุผลว่าการใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากทำให้อัตราส่วนปริมาตรช่องว่างโพรงภายในคอนกรีตลดลง

ในประเทศไทย ดิลก สุรัตน์เวช และคณะ (2545) ได้ทำการศึกษาค่าอัตราการซึมของน้ำ ผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน 5 แหล่งซึ่งมีคุณสมบัติต่างกัน โดยวิเคราะห์ ถึงปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ได้แก่ ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ ความละเอียดของเถ้าถ่านหิน อายุ ของตัวอย่าง และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทั้ง 5 แหล่ง ผลการวิจัยพบว่า การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าต่ำลงเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดและอายุที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเถ้าถ่านหินอีกด้วย โดยเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงเมื่อนำไปแทนที่ในคอนกรีตแล้วส่งผลให้ค่าการซึมของน้ำต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่ำ

ต่อมา Homwuttiwong (2006) ทำการศึกษากำลังอัดและค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต โดยใช้เถ้าถ่านหินคัดขนาดจาก 2 แหล่งที่ต่างกัน, เถ้าปาล์มน้ำมันบด และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บด เป็นวัสดุปอชโซลาน โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอชโซลานร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถช่วยพัฒนากำลังอัดและลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้

วลัยลักษณ์ สารจันทร์ (2550) การศึกษาผลของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันต่ออัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต โดยบดให้มีความละเอียดแตกต่างกัน 2 ขนาด คือ ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325

เท่ากับร้อยละ 15-20 (ความละเอียดปานกลาง) และน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (ความละเอียดมาก) รวมกับเถ้าแกลบ -เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบดจึงมีความละเอียดอย่างละ 3 ขนาด จากนั้นนำเถ้าแกลบเปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ขนาดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีความละเอียดปานกลางในอัตราร้อยละ 10 และความละเอียดมากในอัตราร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานมีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมากในอัตราส่วนร้อยละ 20 ให้กำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมและมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน

เพ็ญชาย เวียงใต้ และคณะ (2551) ศึกษาความสามารถการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดลงและ การบ่มที่นานกว่ามีผลทำให้ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดลงเช่นกัน โดยมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตอยู่ในช่วงระหว่าง 1.23×10^{-11} ถึง 4.03×10^{-11} เมตร/วินาที

2.6 การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

คลอไรด์ เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้คอนกรีต มีความทนทานลดลง คลอไรด์สามารถเข้าสู่ คอนกรีตได้หลายวิธี เช่น จากการใช้น้ำผสมคอนกรีตที่มีสารละลายคลอไรด์ปนอยู่ และจากมวลรวมที่มีสารคลอไรด์ปนเปื้อน หรือการแทรกซึมของน้ำที่มีคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต แม้ว่าคลอไรด์ไม่มีผลกระทบต่อคอนกรีตโดยตรง แต่ก็ยังคงเป็นปัญหาที่สำคัญของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

Bai และคณะ (2003) ได้ทดลองหล่อคอนกรีต ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหิน และดินขาวเผาเป็นวัสดุประสาน เพื่อศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลสังเคราะห์เป็นเวลา 18 เดือน พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 30 ทำให้คลอไรด์แทรกซึมไปในคอนกรีตลดลง ซึ่งเห็นผลได้ชัดเจนขึ้นเมื่อระยะเวลาการแช่น้ำทะเลสังเคราะห์นานขึ้น

Thomas และ Matthews (2004) ได้ทำการเก็บข้อมูลคอนกรีตที่อยู่ในสถานะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี คอนกรีตดังกล่าวแช่น้ำทะเลอยู่ที่ Building Research Establishment (BRE) บริเวณปากแม่น้ำ Thames Estuary เมือง Shoe Buryness ประเทศอังกฤษ Thomas รายงานว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน

ช่วยป้องกัน ปริมาณคลอไรด์ที่พยายามซึมเข้าในคอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน และการบ่มคอนกรีตให้นานขึ้นมีผลต่อการซึมของคลอไรด์เพียงเล็กน้อยเมื่อคอนกรีตนั้นแช่อยู่ในน้ำทะเลเป็นเวลานาน ขณะที่ผลกระทบของการเพิ่ม กำลังอัดที่มีต่อการต้านทานคลอไรด์ มีอิทธิพลน้อยกว่า การเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสม

ปริญญญา จินดาประเสริฐ และอุกฤษฏ์ โชศรี (2548) ได้ศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 40 – 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ที่อายุ 28 วัน ให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และที่อายุ 90 วัน มีกำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นกว่าคอนกรีตควบคุม

อรรคเดช ฤกษ์พิบูลย์ และคณะ (2551) ทำการศึกษาความทนทานของคอนกรีตที่ผสมเถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10-50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ พบว่าเถ้าขานอ้อยบดละเอียดสามารถลดระยะเวลาการแทรกซึมของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ได้ โดยการแทนที่เถ้าขานอ้อยบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้นช่วยให้ระยะเวลาการแทรกซึมของสารละลายโซเดียมคลอไรด์น้อยลง

ต่อมา วชิรกรณ์ เสนาวัง และคณะ (2554) ได้ศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์ม น้ำมันที่มีความละเอียดข้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 1.7 แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยทดสอบด้วยวิธีเร่งด้วยไฟฟ้า ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 (2001) และหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ตามมาตรฐาน AASHTO TP 64 (2003) พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม

2.7 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

สาเหตุหลักอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตคือคลอไรด์ โดยไอออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) เป็นตัวการที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กไม่ให้เกิดสนิมลดลง และเมื่อถึงจุดวิกฤตแล้วถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตได้ ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมที่เป็นสนิมจะทำให้เกิดแรงดันจากภายในของโครงสร้าง

คอนกรีตตามแนวของเหล็กเสริม และเมื่อเกิดสนิมมากขึ้นจะมีแรงดันมากพอทำให้คอนกรีตแตกร้าวตามแนวของเหล็กเสริมได้ โดยการแตกร้าวนี้อาจส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างนั้น

เอนก ศิริพานิชกร และคณะ (2548) ได้ศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลที่มีต่อปริมาณคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยนำหน้าแก้ววัสดุประสาน โดยฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร ในคอนกรีต ให้มีระยะหุ้มคอนกรีตเท่ากับ 10, 20, 50 และ 75 มิลลิเมตร ภายหลังจากการบ่มคอนกรีตในน้ำจืดมีอายุ 28 วัน นำไปแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 36 เดือน เพื่อหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริม พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้เกิดสนิมในเหล็กที่ฝังมีแนวโน้มที่ลดลง และมีทิศทางเดียวกับปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าสู่เนื้อคอนกรีต

จากนั้น กิตติชาติ เผ่าพงษ์ไพบุลย์ และวิระ หอสกุลไท (2553) ทำการศึกษาผลกระทบของโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมซัลเฟต ต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า (Impress Voltage) ซึ่งใช้กระแสไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 3 มีความสามารถในการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าไหลมากที่สุด และยังสรุปได้ว่าไอออนของสารละลายโซเดียมคลอไรด์มีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนในเหล็กเสริมมากที่สุด

ปิยพงษ์ สุวรรณณิโชติ และวิเชียร ชาลี (2555) ศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินจากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (FC) และพูลเวอร์ไรซ์ (PC) โดยแช่น้ำทะเลที่มีสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี อัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยนำหน้าแก้ววัสดุประสาน ผลการศึกษาพบว่าการใช้เถ้าถ่านหินจากการเผาแบบพูลเวอร์ไรซ์สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่า เถ้าถ่านหินบดละเอียดจากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด อย่างไรก็ตามการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินทั้งสองกลุ่มสามารถลดแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเห็นได้ชัดว่าการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติในส่วนผสมคอนกรีต ส่งผลกระทบบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วตลอดจนความทนทานของคอนกรีต ซึ่งผลกระทบดังกล่าวเป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต และการใช้วัสดุปอชโซลานในส่วนผสมคอนกรีตได้แสดงให้เห็นว่าสามารถพัฒนาคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตได้ งานวิจัยนี้จึงได้มีการนำเอาข้อดีของวัสดุปอชโซลาน คือ เถ้าแกลบซึ่งมีอยู่มากในประเทศไทยมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการนำเถ้าแกลบ

บดละเอียดมาพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต โดยพิจารณาคุณสมบัติด้านกำลังอัด การซึมผ่านของน้ำผ่านคอนกรีต ความต้านทานคลอไรด์และการเกิดสนิมของเหล็กเสริม เพื่อเป็นแรงผลักดัน ในการนำมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตไปใช้ในวงการอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตบริเวณชายฝั่งทะเล อีกทั้งการนำวัสดุที่เหลือทิ้งเหล่านี้ไปใช้จะสามารถช่วยลดปริมาณการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย

บทที่ 3 วิธีการทดสอบ

ในบทนี้กล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย วิธีการเตรียมตัวอย่าง รวมทั้งการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต อันได้แก่ กำลังอัด อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต การแทรกซึมคลอไรด์ ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม และการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. เถ้ากลบนำมาจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า จังหวัดสุพรรณบุรี
3. ทราชธรรมชาติ ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4
4. หินปูนย่อยสะอาด ขนาดไม่เกิน $\frac{3}{4}$ นิ้ว
5. มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต
6. มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต
7. สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) Type F (Polycarboxylate-base)
8. น้ำประปา
9. เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ชั้นคุณภาพ SR 24

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. ตะแกรงวิเคราะห์ขนาด
2. ขวดแก้วทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ Le Chatelier
3. เครื่องบดวัสดุ (Grinding Machine)
4. เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence Spectrometer)
5. เครื่องชั่งน้ำหนัก
6. เครื่องผสมคอนกรีต
7. ชุดทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต
8. แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร
9. เครื่องทดสอบกำลังอัด

10. เครื่องตัดตัวอย่างคอนกรีต
11. เครื่องทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำผ่านคอนกรีต
12. ชุดทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต โดยวิธีแบบเร่งตามมาตรฐาน ASTM C1202 (2001)
13. ชุดทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต

3.3 วิธีการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งเป็นขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างเถาเกลบ

งานวิจัยนี้ใช้เถาเกลบเป็นวัสดุปอชโซลาน โดยเถาเกลบได้จากการนำเถาเกลบที่เหลือจากการสีข้าวมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า จังหวัดสุพรรณบุรี มาบดจนมีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์และเถาเกลบ

ทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถาเกลบที่ได้จากการบดละเอียด โดยใช้ขวดทดลอง (Le Chatelier) ตามมาตรฐาน ASTM C188 (2001) ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับวัสดุนั้น การทดสอบนี้ใช้น้ำมันก๊าดเป็นของเหลวในการทดสอบเนื่องจากไม่ทำปฏิกิริยากับวัสดุที่ใช้ทดสอบ

ทดสอบปริมาณน้ำหนักร้อยละข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ของตัวอย่างเถาเกลบ หลังการบด ด้วยวิธี Wet Sieve Analysis โดยนำตัวอย่างมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานด้วยน้ำ เมื่อนำไปอบให้แห้งจะได้ส่วนที่เหลือบนตะแกรง ซึ่งเป็นน้ำหนักร้อยละข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325

วิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถาเกลบ ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม

ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำของมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C127 (2001) และ ASTM C128 (2001) ตามลำดับ ซึ่งเป็นการหาอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักรวมในอากาศเทียบกับ

น้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรที่เท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน และทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของมวลรวม ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการดูดซึมน้ำของมวลรวมจนเต็มช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ของมวลรวม หรือสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD)

ทดสอบหาขนาดผล ค่าโมดูลัสความละเอียด และขนาดใหญ่สุดของมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C136 (2001) ซึ่งทำการทดสอบหาขนาดผลของมวลรวมโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

3.3.4 ส่วนผสมคอนกรีต

งานวิจัยนี้ได้กำหนดปริมาณวัสดุประสานของส่วนผสมคอนกรีตควบคุม (CT) เท่ากับ 400 กก/ม³ ใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 10–15 เซนติเมตร สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติ (RC) แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35, และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (คือคอนกรีต RCR20, RCR35 และ RCR50 ตามลำดับ) กับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต (RCF) แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (คือคอนกรีต RCFR 20, RCFR35 และ RCFR50 ตามลำดับ) โดยงานวิจัยนี้ผสมคอนกรีตด้วยวิธี Two – stage mixing approach (Tam และคณะ, 2005) วิธีดังกล่าวสามารถปรับปรุงผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมกับมอร์ตาร์ที่ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต โดยซีเมนต์เพสต์ที่เหลือจะเข้าไปแทรกรอยร้าวและช่องว่างเพื่ออุดรอยร้าว และช่องว่างของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตให้มีความแน่นมากขึ้น โดยการผสม แบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนที่หนึ่งคือนำมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมาผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลา 60 วินาที จากนั้นทำการเติมน้ำครึ่งหนึ่งของปริมาณน้ำทั้งหมดที่ต้องการและผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 60 วินาที หลังจากนั้นใส่วัสดุประสานผสมให้เข้ากันต่ออีกเป็นเวลา 30 วินาที และขั้นตอนที่สองนำน้ำที่เหลืออีกครั้งเดิมเข้าไปและผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 120 วินาที จะได้คอนกรีตสดเพื่อนำไปหล่อตัวอย่างคอนกรีต ส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้แสดงในตารางที่ 3.1

3.3.5 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ทำการทดสอบกำลังอัดโดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ในการหล่อคอนกรีตแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นกระทุ้ง 25 ครั้ง ด้วยเหล็กกลมปลายมนขนาด 16 มิลลิเมตร ภายหลังการหล่อ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออกและนำตัวอย่างคอนกรีตบ่มในน้ำ จากนั้นทดสอบกำลังอัดคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39 (2001) ที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน แต่ละอายุการทดสอบได้จากค่าเฉลี่ย 3 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของคอนกรีต

Mix	Mix Proportion (kg/m ³)									W/B	Slump (cm)
	OPC	RHA	Lime stone	Sand	RFA	RCA	Mix. Water	Eff. Water	SP.		
CT	400	-	1010	826	-	-	192.3	180	0.44	0.45	10.0
RC	400	-	-	768	-	939	236.3	180	0.44	0.45	12.0
RCR20	320	80	-	757	-	925	235.4	180	1.04	0.45	11.0
RCR35	260	140	-	748	-	915	234.8	180	1.52	0.45	12.0
RCR50	200	200	-	740	-	904	234.2	180	1.68	0.45	14.0
RCF	400	-	-	-	710	867	282.4	180	0.44	0.45	13.0
RCFR20	320	80	-	-	699	855	280.9	180	1.04	0.45	14.5
RCFR35	260	140	-	-	691	845	279.7	180	1.52	0.45	13.0
RCFR50	200	200	-	-	683	835	278.6	180	1.68	0.45	14.5

หมายเหตุ

OPC คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

RHA คือ เถ้าแกลบบดละเอียด

RFA คือ มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

RCA คือ มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

Mix. Water คือ ปริมาณน้ำที่ใช้จริงโดยคิดรวมการดูดซึมน้ำของมวลรวม

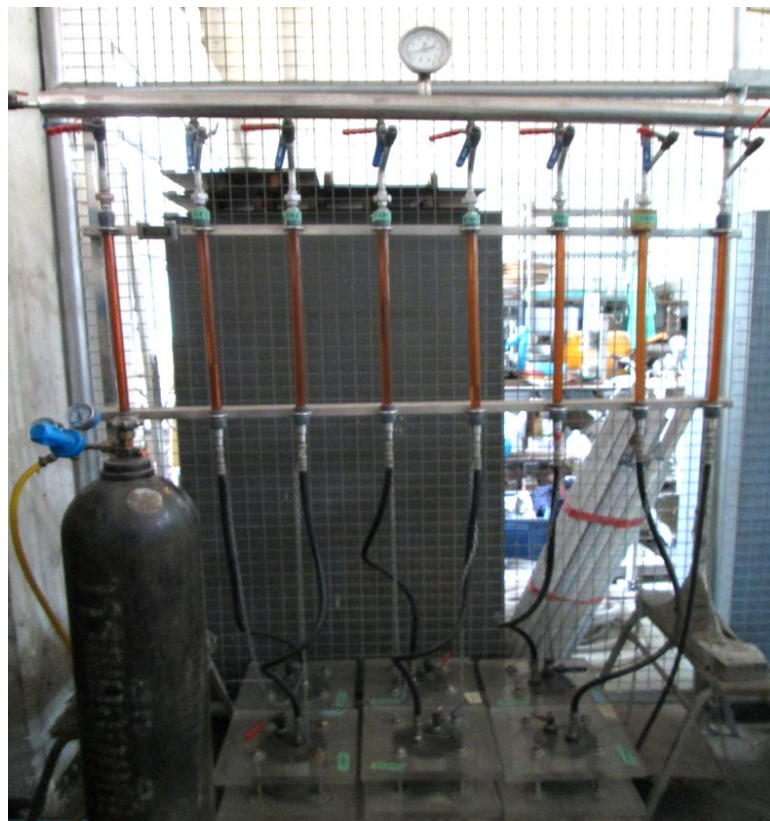
Eff. Water คือ ปริมาณน้ำที่ทำให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าเท่ากับ 0.45 ไม่รวมน้ำที่ดูดซึมของมวลรวม

SP. คือ สารลดน้ำพิเศษ

3.3.6 การทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตอาศัยหลักการวิธีการไหลคงที่ (Steady Flow Method) ทดสอบโดยการให้น้ำที่มีความดันคงที่ ไหลผ่านคอนกรีตในทิศทางเดียว ทำได้โดยนำตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร มาตัดตามขวางที่ตำแหน่งตรงกลางของแท่งตัวอย่าง โดยให้มีขนาดความสูง 4 เซนติเมตร เพื่อหลีกเลี่ยงคอนกรีตส่วนบนที่อาจมีผลกระทบจากการเย็นน้ำ และส่วนล่างที่อาจมีมวลรวมมากเกินไปเนื่องจากการกระทุ้งให้แน่น ทำ

ความสะอาดผิวของก้อนตัวอย่างให้สะอาดปราศจากฝุ่น เพื่อให้สามารถยึดติดกับอีพอกซีได้ดีและป้องกันฝุ่นละอองเข้าไปอุดตันการไหลของน้ำบริเวณผิวห น้ำตัวอย่างทดสอบจากนั้นนำตัวอย่างทดสอบมาทำการหล่ออีพอกซีที่ด้านข้างรอบตัวอย่างให้มีความหนา 2.5 เซนติเมตร และสูงเท่ากับก้อนตัวอย่างคอนกรีต ทั้งตัวอย่างที่หล่ออีพอกซีให้แข็งตัวเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง จึงนำตัวอย่างมาประกอบเข้ากับชุดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ดังรูปที่ 3.1 โดยใช้แรงดันลมเท่ากับ 5 bars ที่อายุ 90 วัน โดยจะใช้ค่าเฉลี่ยจาก 2 ตัวอย่าง ทำการบันทึกปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างกับเวลา เมื่ออัตราการไหลของน้ำผ่านตัวอย่างคอนกรีตมีค่าคงที่ คำนวณหาสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ตามสมการที่ 3.1 (Ludirdja และคณะ, 1989)



รูปที่ 3.1 ชุดทดสอบค่าการซึมน้ำผ่านคอนกรีต

$$K = \frac{\rho L g Q}{P A} \quad (3.1)$$

เมื่อ K = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (m/s)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)

$$\begin{aligned}
 g &= \text{แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s}^2\text{)} \\
 Q &= \text{อัตราการไหลของน้ำ (m}^3\text{/s)} \\
 L &= \text{ความหนาของตัวอย่างคอนกรีต (m)} \\
 P &= \text{แรงดันน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต (N/m}^2\text{)} \\
 A &= \text{พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีต (m}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

3.3.7 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีต

การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 (2001) โดยหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร หลังจากตัวอย่างมีอายุ 1 วันจึงถอดแบบ แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มน้ำที่อุณหภูมิ $23 \pm 2^\circ\text{C}$ เมื่อคอนกรีตอายุครบ 28 และ 90 วัน จึงนำไปตัดให้ได้ความหนา 50 ± 3 มิลลิเมตร จากนั้นนำคอนกรีตขณะอิมตัวผิวแห้งเคลือบผิวโดยรอบด้วยซิลิโคน (ยกเว้นผิวหน้าทั้งสอง) แล้วประกอบเข้าชุดทดสอบดังรูปที่ 3.2 บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านทุกๆ 30 นาที จนครบ 6 ชั่วโมง จากค่ากระแสไฟฟ้าจะสามารถคำนวณหาประจุไฟฟ้าสะสมที่เคลื่อนที่ผ่านก่อนตัวอย่างคอนกรีตได้จากสมการ 3.2 แต่จะอายุการทดสอบได้จากค่าเฉลี่ย 2 ตัวอย่าง

$$Q_x = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (3.2)$$

โดยที่ Q คือ ประจุไฟฟ้าสะสมที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตเส้นผ่านศูนย์กลาง x มม. (คูลอมบ์)

I_0 คือ กระแสไฟฟ้าที่เวลาเริ่มต้น (แอมแปร์)

I_t คือ กระแสไฟฟ้าที่เวลา t นาที นับเริ่มจากการทดสอบ (แอมแปร์)

ในงานวิจัยครั้งนี้ชิ้นตัวอย่างที่ทดสอบมีขนาดไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด (เส้นผ่านศูนย์กลาง 95 มม.) ดังนั้นจะต้องทำการปรับแก้ค่าที่คำนวณได้จากสมการ (3.2) ด้วยสมการ (3.3)

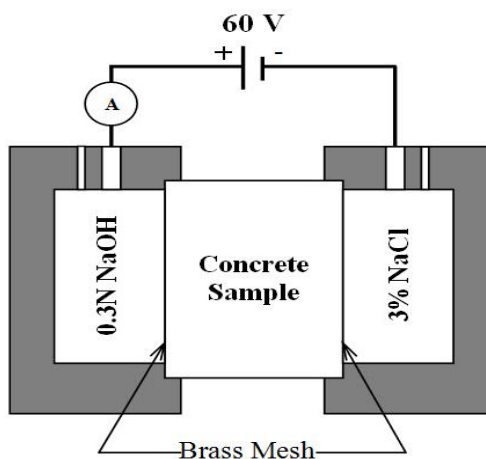
$$Q_s = Q_x \left(\frac{95}{x}\right)^2 \quad (3.3)$$

เมื่อ

Q_s = ประจุสะสมที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่างทดสอบเส้นผ่านศูนย์กลาง 95 มม. (คูลอมบ์)

Q_x = ประจุสะสมที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่างทดสอบเส้นผ่านศูนย์กลาง X มม. (คูลอมบ์)

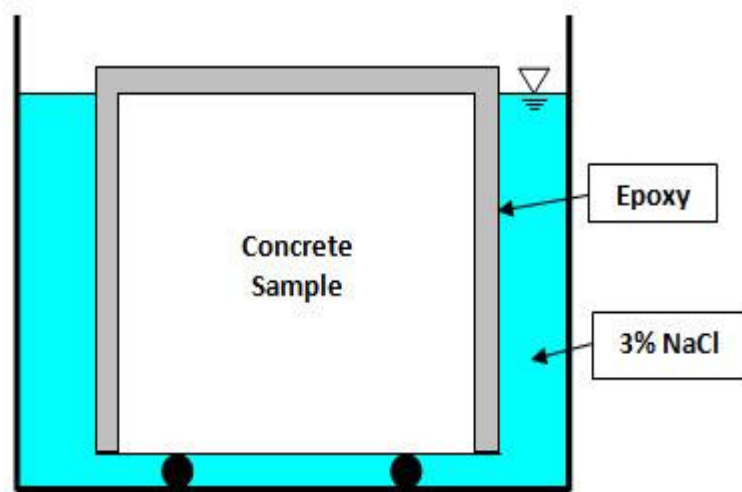
x = เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นตัวอย่างทดสอบ (มม.)



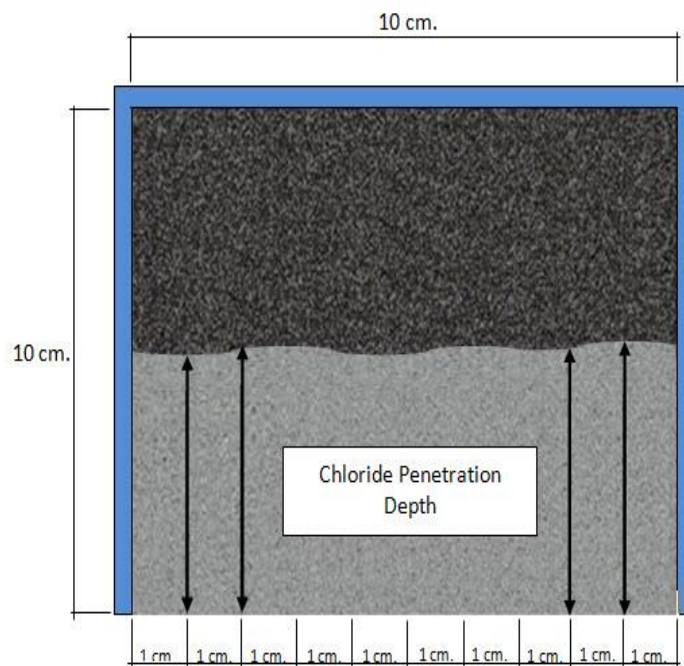
รูปที่ 3.2 ชุดทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์

3.3.8 การทดสอบระยะการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

การทดสอบระยะการแทรกซึมคลอไรด์ จากการตัดแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ที่มีอายุบ่มในน้ำประปา 26 วัน ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความสูง ได้เป็นก้อนตัวอย่างรูปทรงแท่งกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร จำนวน 2 ชิ้นหลังจากตัดแล้วปล่อยให้แห้งในอากาศ 24 ชั่วโมง จึงหล่อผิวด้านข้างและด้านบนด้วยอีพอกซี โดยเหลือพื้นที่ผิวเปิดไว้ 1 ด้านเพื่อเป็นด้านที่สัมผัสกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่แห้งในอากาศ 24 ชั่วโมง จากนั้น นำตัวอย่าง คอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร ที่หล่ออีพอกซีแล้วในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 ให้สารละลายท่วมเหนือผิวคอนกรีตพอดี จะได้ระดับความลึกของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ประมาณ 10 เซนติเมตร (รูปที่ 3.3) โดยแช่ไว้เป็นระยะเวลา 90 และ 180 วัน จึงนำก้อนตัวอย่างคอนกรีตขึ้นมาทำการผ่าซีก จากนั้นพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตบริเวณผิวคอนกรีตที่แตกออกหลังจากการผ่าซีกทางด้านที่เปิดให้คอนกรีตสัมผัสกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์วางทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อให้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตทำปฏิกิริยากับโซเดียมคลอไรด์ ที่อยู่ในเนื้อคอนกรีต ซึ่งผิวของคอนกรีตที่มีคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปจะเปลี่ยนเป็นสีเทาขาวขึ้น จึงวัดระยะการแทรกซึมที่เกิดขึ้น โดยทำการวัดระยะการแทรกซึมคลอไรด์ตามรูปที่ 3.4 แล้วหาค่าเฉลี่ยระยะการแทรกซึมของคลอไรด์



รูปที่ 3.3 ชุดทดสอบระยะการแทรกซึมคลอไรด์

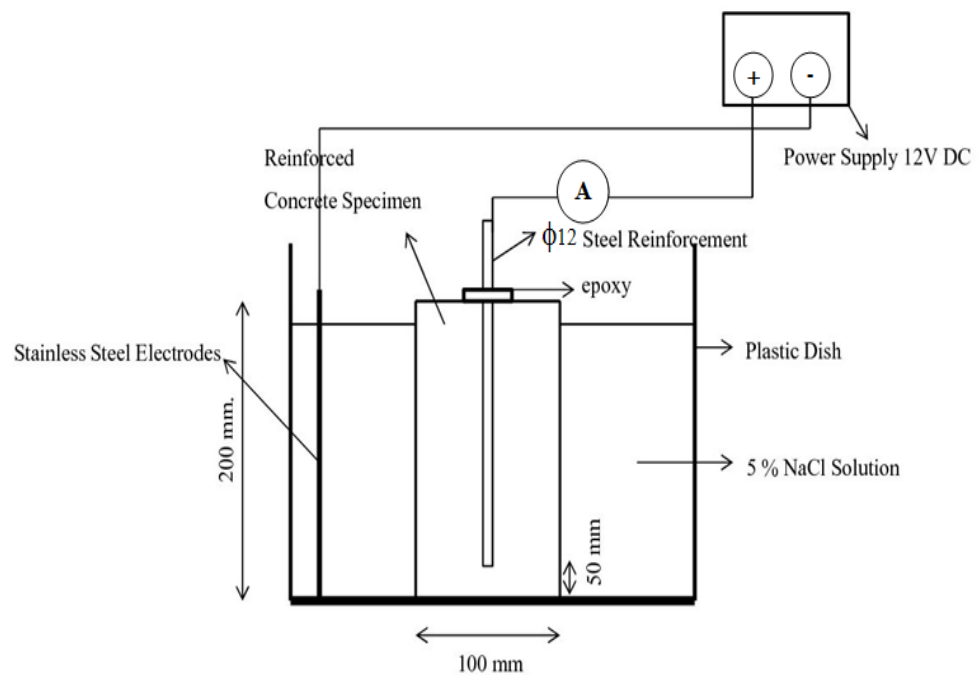


รูปที่ 3.4 การวัดระยะการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

3.3.9 การทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต

การทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต ทำการหล่อคอนกรีตในแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ทำการเสียบเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ขาว 25 เซนติเมตร ลึก 15 เซนติเมตร ที่ศูนย์กลางหน้าตัด เมื่อคอนกรีตอายุครบ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบแล้วนำไปบ่มในน้ำจืดมีอายุครบ 28 และ 90 วันจึงนำไปทดสอบ ค่ากระแสไฟฟ้าที่

ไหลผ่านคอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 ให้ระดับสารละลายอยู่ต่ำกว่าผิวบนแท่งตัวอย่างคอนกรีต 3 เซนติเมตร จากนั้นต่อวงจรไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความต่างศักย์ 12 โวลต์ เข้ากับตัวอย่างทดสอบโดยขั้วบวกต่อตัวด้านทาน 10 โอห์ม แล้วต่อเข้ากับเหล็ก ขั้วลบต่อเข้ากับแผ่นสแตนเลส ซึ่งเป็นอิเล็กโทรด ดังแสดงในรูปที่ 3.5 จากนั้นวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจร โดยวัดความต่างศักย์คร่อมตัวด้านทาน 10 โอห์ม ทุกๆ 6 ชั่วโมง เป็น เวลา 7 วัน ซึ่ง การทดสอบนี้ ประยุกต์จากการทดสอบตามมาตรฐาน Nordtest Method (1989)



รูปที่ 3.5 ชุดทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต

3.3.10 การทดสอบพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม

หลังจากทำการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตแล้วจึงนำตัวอย่างคอนกรีตมาค้ำให้แตก เพื่อนำเหล็กที่ฝังอยู่ในคอนกรีตมาทำการสำรวจสนิมของเหล็ก โดยทำการวัดพื้นที่ของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม ด้วยการใช้แผ่นกราฟพลาสติกใสที่มีช่องตาราง 1×1 มม.² มาทากรอบแท่งเหล็กแล้วใช้ปากการะบายพื้นที่ ที่เกิดสนิม นับพื้นที่สนิมที่เกิดขึ้น และนำมาเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของเหล็กทั้งหมด ค่าที่คำนวณได้คือ ร้อยละของพื้นที่ ผิวที่เกิดสนิม ดังสมการที่ 3.4 รวมทั้งใช้ภาพถ่ายรูปสนิมเหล็กประกอบการวิเคราะห์พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต

$$A (\%) = \left(\frac{RA}{SA} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ C คือ ร้อยละของพื้นที่ผิวแท่งเหล็กที่เกิดสนิม

RA คือ พื้นที่ผิวที่แท่งเหล็กเกิดสนิม (มม²)

SA คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของแท่งเหล็ก (มม²)

3.3.11 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

หลังจากนำเหล็กไปทำการหาพื้นที่การเกิดสนิมแล้ว จึงนำเหล็กมาทดสอบหาการสูญเสียน้ำหนักเหล็กเนื่องจากการเกิดสนิม โดยจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G1 (1999) นำเหล็กไปชั่งน้ำหนักแล้วนำเปรียบเทียบกับน้ำหนักของเหล็กที่ไม่เกิดสนิม ค่าที่คำนวณได้คือ ร้อยละของน้ำหนักเหล็กที่สูญหาย ดังสมการที่ 3.5

$$W_L (\%) = \left(\frac{W_B - W_A}{W_B} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ W_L คือ ร้อยละของน้ำหนักเหล็กที่สูญหาย

W_B คือ น้ำหนักเหล็กก่อนการทดสอบ (กรัม)

W_A คือ น้ำหนักเหล็กหลังการทดสอบ (กรัม)

3.4 สัญลักษณ์ในงานวิจัย

CT หมายถึง คอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยมีหินปูนย่อยและทรายธรรมชาติเป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ตามลำดับ

{RC, RCF} {R} {20, 35, 50} หมายถึงการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมธรรมชาติ และใช้วัสดุ ปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างกัน

{RC} หมายถึง การใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมด และใช้ทรายธรรมชาติเป็นมวลรวมละเอียด

{RCF} หมายถึง การใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมด และใช้มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่ทรายธรรมชาติทั้งหมด

{R} {20, 35, 50} หมายถึง การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

RC หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมด และใช้ทรายธรรมชาติเป็นมวลรวมละเอียด และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

RCR35 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมด และใช้ทรายธรรมชาติเป็นมวลรวมละเอียด และใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

RCFR20 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมด และใช้มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่ทรายแม่น้ำทั้งหมด และใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบและ วิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติ จำเพาะ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบ และคุณสมบัติจำเพาะของมวลรวม ตลอดจนผลการทดสอบและ วิเคราะห์ผลการทดสอบ ได้แก่ กำลังอัด อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต การแทรกซึมคลอไรด์ ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมและ การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

4.1 คุณสมบัติจำเพาะของวัสดุประสาน

ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสานเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ได้แก่ ความ ต้องการน้ำในส่วนผสม กำลังอัดของคอนกรีตตลอดจนความทนทานของคอนกรีต ดังนั้นจึงจำเป็นต้อง ศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสานเพื่อจะได้วิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง

4.1.1 ลักษณะทั่วไปและสีของเถ้าแกลบ

เถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรงพบว่ามีลักษณะเป็นสีดำ มีสีขาวปนสามารถ มองเห็นด้วยตาเปล่า เมื่อสัมผัสด้วยมือจะรู้สึกมีความหยาบมาก เมื่อนำเถ้าแกลบไปบดให้ละเอียด จะมี สีดำที่สม่ำเสมอทั้งหมดและมีความละเอียดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดจากกระบวนการบดทำให้ส่วนที่เป็น สีขาวมีความละเอียดปนกัน ส่งผลให้อนุภาคที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันมีสีดำทั้งหมด ดังรูปที่.1



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะทั่วไปและสีของเถ้าแกลบก่อนและหลังการบด

4.1.2 ความถ่วงจำเพาะ

สำหรับค่าความถ่วงจำเพาะ ของวัสดุคงแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3.15 ซึ่งเป็นที่อยู่ในเกณฑ์ปกติทั่วไปของปูนซีเมนต์ คือ มีค่าระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 (Lea, 1970) และถ้าแลบก่อนบดมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.89 เมื่อปรับปรุงความละเอียดของแลบจะมีความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็น 2.24 ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ค่าความถ่วงจำเพาะของแลบ อยู่ระหว่าง 1.9-2.3 (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2552)

4.1.3 ความละเอียด

ความละเอียดของแลบ เมื่อพิจารณาความละเอียดของวัสดุโดยการหาน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) จากตารางที่ 4.1 พบว่าแลบก่อนบดมีอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 76.6 ซึ่งสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C618 (2001) กำหนดไว้ที่ไม่เกินร้อยละ 34 อยู่มาก และเมื่อนำแลบไปปรับปรุงคุณภาพด้วยการบด พบว่ามีปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ลดลงเหลือร้อยละ 4.60 เนื่องจากการบดเป็นการเพิ่มความละเอียด ลดความพรุนและเพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของแลบให้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของวัสดุ

Sample	Specific Gravity	Retained on a Sieve No. 325 (%)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)	3.15	-
แลบก่อนบด (O-RHA)	1.89	76.6
แลบหลังบด (RHA)	2.24	4.60

4.1.4 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแลบ แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักคือร้อยละ 65.4 ค่าการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ร้อยละ 1 และมี SO_3 ไม่เกินร้อยละ 2.7 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบดังกล่าวแล้วปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าอยู่ในเกณฑ์ตามที่มาตรฐาน ASTM C 150 (2001) กำหนดไว้ สำหรับแลบ มีองค์ประกอบของ SiO_2 เป็นหลัก โดยมีถึง ร้อยละ 93.5 มี SO_3 ร้อยละ 0.2 และมีค่าการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับร้อยละ 8.7

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมี

Chemical Composition (%)	Cement Type 1	Rice Husk Ash
Silicon Dioxide (SiO_2)	20.9	93.5
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	4.8	0.2
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	3.4	0.4
Calcium Oxide (CaO)	65.4	0.9
Sulfur Trioxide (SO_3)	2.7	0.2
Magnesium Oxide (MgO)	1.3	0.4
Sodium Oxide (Na_2O)	0.3	-
Potassium Oxide (K_2O)	0.4	3.3
Loss On Ignition (LOI)	1.0	8.7

4.2 คุณสมบัติจำเพาะของมวลรวม

คุณสมบัติจำเพาะของมวลรวมเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญ ที่ใช้ในการออกแบบและกำหนดอัตราส่วนผสมคอนกรีต และยังเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีต ตลอดจนด้านความคงทนของคอนกรีต สำหรับมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ประกอบไปด้วย หินปูนย่อย ทรายธรรมชาติ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต โดยคุณสมบัติของมวลรวมได้แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติจำเพาะของมวลรวม

Properties	River Sand	Crushed Limestone	Recycled Aggregates	
			Fine (RFA)	Coarse (RCA)
Fineness Modulus	2.65	6.94	2.77	6.56
Specific Gravity (SSD)	2.62	2.71	2.35	2.49
Water Absorption (%)	0.91	0.48	8.02	5.26
Crushing Value (%)	-	17.11	-	19.85

4.2.1 ลักษณะรูปร่างของมวลรวม

ลักษณะรูปร่างของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่ามวลรวมมีขนาดที่ใหญ่กว่าทรายธรรมชาติ เนื่องจากประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ของ

เศษคอนกรีต และเศษหินปูนย่อยที่แตกหักเนื่องจากกระบวนการย่อย โดยค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 2.77 และ 2.65 ตามลำดับ

สำหรับลักษณะรูปร่าง ของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแสดงในรูปที่ 4.3 มีลักษณะใกล้เคียงกับหินปูนย่อย คือมีความเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างที่ไม่แน่นอน ขนาดเฉลี่ยของมวลรวมมีขนาดเล็กกว่าหินปูนย่อย ที่ผิวมวลรวมส่วนใหญ่มีซีเมนต์พาสต์เกาะติดอยู่ และมีค่าโมดูลัสความละเอียดที่ต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ โดยค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและหินปูนย่อยมีค่าเท่ากับ 6.56 และ 6.94 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติ



รูปที่ 4.3 มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและหินปูนย่อย

4.2.2 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวม

มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.49 และ 2.35 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าหินปูนย่อยและทรายธรรมชาติ ที่มีค่าเท่ากับ 2.71

และ 2.62 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเพสต์หรือมอร์ดำที่เกาะอยู่ที่ผิวของมวลรวมมีความพรุนทำให้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติ (Chen และคณะ, 2003) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ปกป้อง รัตนชู (2551) ที่พบว่ามวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติเท่ากับ 2.49 และสุพัทธ์ จำคล้าย (2552) พบว่ามวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติเท่ากับ 2.48 และ 2.40 ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าไม่ต่างกันมากนัก

ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าเท่ากับร้อยละ 5.26 และ 8.02 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าหินปูนย่อยและทรายธรรมชาติ ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.48 และ 0.91 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุรศักดิ์ ภูสันติพงษ์ และคณะ (2545) ที่พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 5.20-5.46 และมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่างร้อยละ 8.03-9.62 นอกจากนี้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต จัดอยู่ในประเภทมวลรวมหยาบ ใช้แล้วระดับชั้นคุณภาพที่ 2 ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1014-46 (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2550)

4.2.3 ค่าความต้านทานการแตกหักของมวลรวมหยาบ

ค่าความต้านทานการแตกหักซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน BS 812 (1975) พบว่ามวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษ คอนกรีตมีค่าความต้านทานการแตกหักเท่ากับร้อยละ 19.85 ซึ่งสูงกว่าค่าความต้านทานการแตกหักของหินปูนย่อยที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 17.11 เห็นได้ชัดว่ามวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีคุณภาพที่ต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติ เพราะมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษ คอนกรีตมีซีเมนต์เพสต์และมอร์ดำติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมซึ่งมีความแข็งแรงต่ำกว่าหินปูนย่อย นอกจากนี้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตยังผ่านกระบวนการย่อยมาแล้ว ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของมวลรวมมีค่าลดลง

4.3 กำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตเป็นส่วนสำคัญที่สามารถประเมินคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตได้ ซึ่งจากการใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนมวลรวมธรรมชาติและใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วน ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยแบ่งส่วนผสมคอนกรีตออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรก คือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติ (RC) และ กลุ่มที่สอง คือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต (RCF) คอนกรีตทั้งสอง กลุ่มนี้ใช้

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมค่ายุบตัวให้อยู่ในช่วง 10-15 ซม. และเปรียบเทียบผลการทดสอบของคอนกรีตทั้งสองกลุ่มนี้กับคอนกรีตควบคุม ซึ่งผลการทดสอบกำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม มได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

Sample	Compressive Strength (ksc)- <i>Normalized Compressive Strength (%)</i>			
	7 days	28 days	60 days	90 days
CT	366-(100)	473-(100)	491-(100)	499-(100)
RC	303-(83)	392-(83)	415-(85)	423-(85)
RCR20	289-(79)	390-(83)	422-(86)	434-(87)
RCR35	249-(68)	351-(74)	372-(76)	384-(77)
RCR50	185-(51)	275-(58)	304-(62)	316-(63)
RCF	250-(68)	326-(69)	340-(69)	349-(70)
RCFR20	249-(68)	319-(67)	343-(70)	359-(72)
RCFR35	192-(53)	258-(55)	284-(58)	305-(61)
RCFR50	158-(43)	227-(48)	246-(50)	261-(52)

4.3.1 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตปกติ ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุม (CT) ที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 366, 473, 491 และ 499 กก/ซม² ตามลำดับ ซึ่งพบว่าคอนกรีตมีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มและมี แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นช้าลงเมื่อมีอายุเพิ่มขึ้น ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ วชิรกรณ์ เสนาวัง (2554) ที่ใช้ปูนซีเมนต์เท่ากับ 425 กก/ม³ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 พบว่ากำลังอัดมีค่าเท่ากับ 512 กก/ซม² ที่อายุ 90 วัน ซึ่งการพัฒนากำลังมีอย่างรวดเร็วจนถึงอายุ 28 วัน จากนั้นกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงอายุ 90 วัน

4.3.2 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต ที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติ

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต แสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติและใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (RC) ที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 303, 392, 415 และ 423 กก/ชม² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 83, 83, 85 และ 85 ของคอนกรีตควบคุม จากผลการทดสอบกำลังอัดพบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมดส่งผลให้มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบ ซึ่งสอดคล้อง กับงานวิจัยของ Gomez-Soberon (2002) ที่พบว่าการใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตส่งผลทำให้กำลังอัดมีค่าต่ำลงเนื่องจากมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต มีความพรุนสูงส่งผลทำให้คอนกรีตมีความพรุนและโพรงอากาศมากขึ้น และจากค่าการแตกหักของมวลรวมที่ทดสอบตามมาตรฐาน BS 812 (1975) พบว่ามวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าการแตกหักร้อยละ 19.85 ซึ่งสูงกว่าหินปูนย่อยที่มีค่าการแตกหักร้อยละ 17.11 จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

4.3.3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต ที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติร่วมกับเถ้าแกลบละเอียด

ตารางที่ 4.4 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติที่ใช้เถ้าแกลบละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (RCR20) มีกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วันเท่ากับ 289, 390, 422 และ 434 กก/ชม² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 79, 83, 86 และ 87 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ส่วนการใช้เถ้าแกลบละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 35 และ 50 ของน้ำหนักวัสดุประสาน (RCR35 และ RCR50) มีกำลังอัดที่อายุ 90 วัน เท่ากับ 384 และ 316 กก/ชม² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 77 และ 63 ตามลำดับ

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าแกลบละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่ต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อุกฤษณ์ โชศรี (2548) และ Tangchirapat และคณะ (2008) ที่พบว่าการใช้เถ้าแกลบหรือเถ้าแกลบ- เปลือกไม้บดละเอียดในปริมาณที่เหมาะสม สามารถทำให้กำลังอัดสูงขึ้น แต่ถ้าใช้เถ้าแกลบละเอียดในปริมาณที่มากเกินไปทำให้กำลังอัดต่ำลง เนื่องจากการใช้เถ้าแกลบละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ใช้ในการทำ

ปฏิกิริยาปอซโซลานลดลงตามไปด้วย แต่การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสามารถช่วยพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตให้ดีขึ้นได้ เห็นได้จากรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทฤษฎีพบว่าการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ของน้ำหนักวัสดุประสาน ที่อายุ 60 วันขึ้นไปสามารถพัฒนากำลังอัดให้มีค่าสูงกว่าคอนกรีต RC ได้ แต่ยังคงมีค่าที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบ

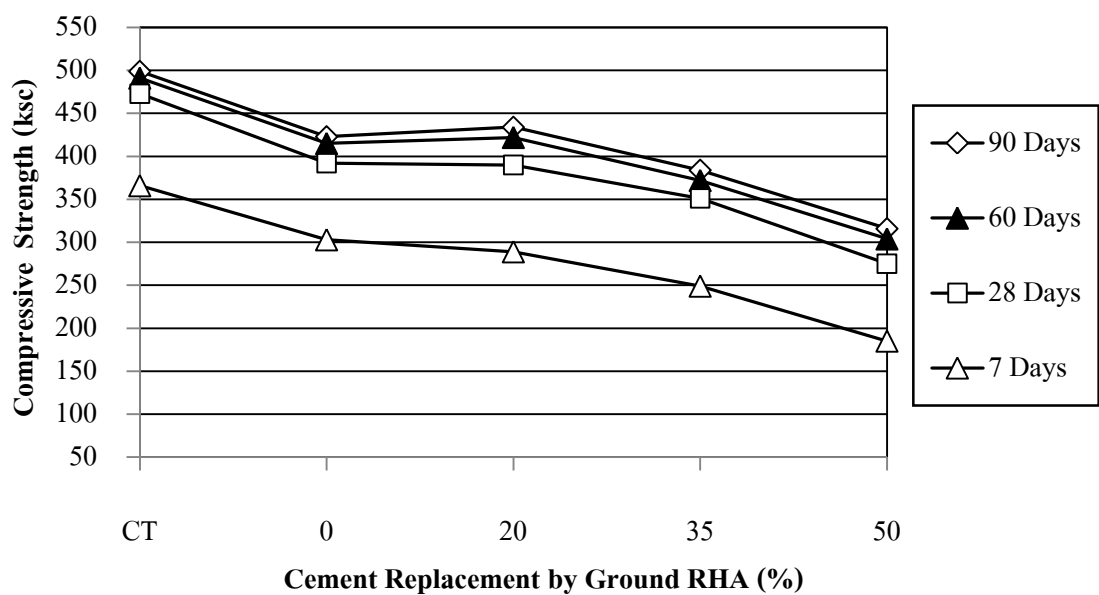
4.3.4 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต ที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต จากตารางที่ 4.4 พบว่ามีค่ากำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 250, 326, 340 และ 349 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 68, 69, 69 และ 70 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมธรรมชาติทั้งหมดส่งผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตทุกอายุการทดสอบมีค่าต่ำลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุพัทธ์ จำคล้าย (2552) ที่พบว่าการใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตส่งผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง เนื่องจากมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีความแข็งแรงที่ต่ำกว่าหินปูนย่อย และมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีขนาดที่ใหญ่กว่าทฤษฎีทำให้มวลรวมดังกล่าวเข้าไปอุดช่องว่าง ในคอนกรีตได้น้อยลง

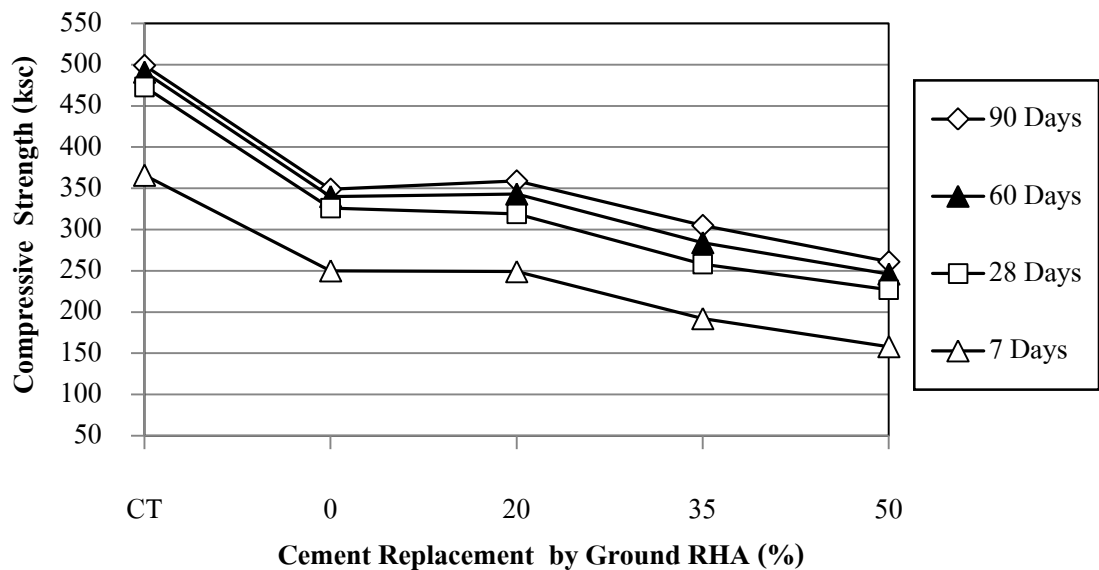
4.3.5 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต ที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียด

ตารางที่ 4.4 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทุกส่วนผสมมีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบ โดยการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 249, 319, 343 และ 359 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 68, 67, 70 และ 72 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ และการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีกำลังอัดที่อายุ 90 วัน เท่ากับ 305 และ 261 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 61 และ 52 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 สามารถพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตให้ดีขึ้นได้ จากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด พบว่า การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสามารถพัฒนากำลังอัดให้สูงกว่าคอนกรีต RCF ที่อายุ 60 วันขึ้นไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang and Mohan (1996) ที่พบว่าการใช้เถ้าแกลบในส่วนผสมคอนกรีต สามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตให้มีค่าสูงขึ้นได้เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าแกลบ แต่การแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 35 และ 50 ทำให้กำลังอัดของคอนกรีต ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งคล้ายกับคอนกรีต RC ที่ใช้เถ้าแกลบ ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้มีกำลังอัดที่ลดลง



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทราขธรรมชาติกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด

4.4 อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

ตารางที่ 4.5 แสดงอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่แสดงในรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (K) และค่าอัตราส่วนอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติ และคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ปูปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพียงอย่างเดียว และใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วน ผลการทดสอบพบว่าอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตควบคุม มีค่าเท่ากับ 4.03×10^{-13} เมตรต่อวินาที โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 499 กก/ซม² ซึ่งใกล้เคียงกับงานของ รัฐพล สมณา และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554) ที่มีค่าอัตราการซึมของน้ำที่อายุ 90 วันเท่ากับ 5.82×10^{-13} เมตรต่อวินาที โดยมีค่ากำลังอัด เท่ากับ 450 กก/ซม²

4.4.1 อัตราการซึมของน้ำผ่าน คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียด

การใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมธรรมชาติในส่วนผสมคอนกรีต ส่งผลให้อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม จากตารางที่ 4.5 พบว่าที่อายุ 90 วันคอนกรีต RC มีค่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 8.32×10^{-13} เมตรต่อวินาที

หรือคิดเป็น 2.06 เท่าของคอนกรีตควบคุม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ รัฐพล สมณา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554) ที่มีค่าเท่ากับ 8.60×10^{-13} เมตรต่อวินาที โดยมี ค่ากำลังอัดเท่ากับ 416 กก/ชม² การที่คอนกรีต RC มีค่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงขึ้นเป็นผลมาจากกำลังอัดที่ต่ำลงของ คอนกรีตและมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต มีความพรุนสูงกว่าการใช้หินปูนย่อยใน ส่วนผสมคอนกรีต

ตารางที่ 4.5 อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ที่อายุ 90 วัน

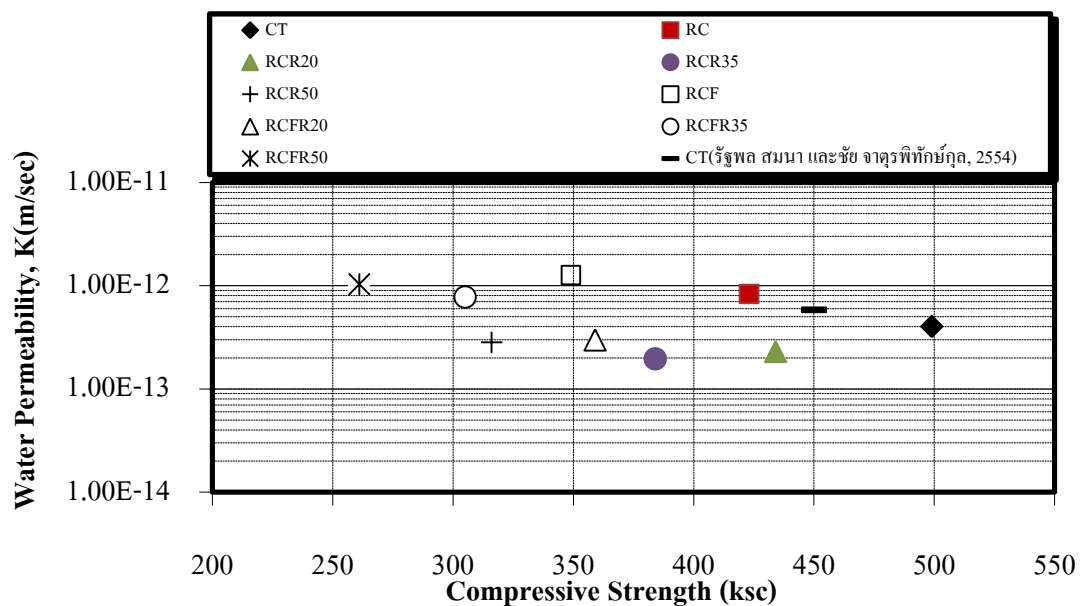
Sample	Compressive Strength at 90 days (ksc)	Coefficient of Water Permeability ($K \times 10^{-13}$) at 90 days, m/sec (K/K_{CT})
CT	499	4.03 (1.00)
RC	423	8.32 (2.06)
RCR20	434	2.30 (0.57)
RCR35	384	1.96 (0.49)
RCR50	316	2.82 (0.70)
RCF	349	12.67 (3.14)
RCFR20	359	2.99 (0.74)
RCFR35	305	7.77 (1.93)
RCFR50	261	10.36 (2.57)

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียด ผลการ ทดสอบพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด ในอัตราส่วน ร้อยละ 20 - 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานช่วยลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้อย่างเห็นได้ ชัดทุกอัตราส่วนการแทนที่ โดยคอนกรีต RCR20, RCR35, และ RCR50 มีค่าอัตราการซึมของน้ำผ่าน คอนกรีตเท่ากับ 2.30×10^{-13} , 1.96×10^{-13} และ 2.82×10^{-13} เมตรต่อวินาที ตามลำดับหรือคิดเป็นร้อยละ 0.57, 0.49, และ 0.70 เท่าของคอนกรีตควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วลัยลักษณ์ สาระจันทร์ และคณะ (2550) ที่พบว่าการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้สามารถลดการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ให้มีค่าต่ำ กว่าคอนกรีตควบคุมได้ที่อายุ 90 วัน เนื่องจากผลของขนาดอนุภาคที่ละเอียดของเถ้าแกลบบดละเอียด เข้าไปอุดช่องว่างในคอนกรีตและผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีต

4.4.2 อัตราการซึมของน้ำผ่าน คอนกรีตที่ใช้มวลรวม หยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียด

จากตารางที่ 4.5 การใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมธรรมชาติทั้งหมดทำให้คอนกรีตมีค่าอัตราการซึมของน้ำที่สูงขึ้นมากอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม โดยมีค่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 12.67×10^{-13} เมตรต่อวินาที หรือคิดเป็น 3.14 เท่าของคอนกรีตควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุพัตร จาคสัย (2552) ที่พบว่าการใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมธรรมชาติส่งผลทำให้คอนกรีตมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงขึ้นมาก ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีความแข็งแรงที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมซึ่งทำให้กำลังอัดมีค่าต่ำลง และความพรุนของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีความพรุนสูงกว่ามวลรวมธรรมชาติ จึงทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำที่ต่ำลง

การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดเป็นส่วนผสมในคอนกรีต จากรูปที่ 4.6 พบว่าการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสามารถทำให้อัตราการซึมของน้ำต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมได้ โดยมีค่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 2.99×10^{-13} เมตรต่อวินาที หรือคิดเป็น 0.74 เท่าของคอนกรีตควบคุม และการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 35 และ 50 สามารถทำให้มีค่าอัตราการซึมของน้ำต่ำลงได้แต่ยังคงมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม โดยมีค่าเท่ากับ 7.77×10^{-13} และ 10.36×10^{-13} เมตรต่อวินาที ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 1.93 และ 10.36 เท่าของคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้เนื่อง จากยังมีเถ้าแกลบบดละเอียดบางส่วนที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาปอซโซลานอยู่เนื่องจากมีปริมาณปูนซีเมนต์ในปริมาณที่น้อย ทำให้มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลงตามไปด้วยจึงทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่มีอยู่ในเถ้าแกลบบดละเอียดได้น้อยลง ดังนั้นเถ้าแกลบบดละเอียดส่วนที่เหลือดังกล่าวเป็นส่วนที่ทำให้เกิดช่องว่างในภายในคอนกรีตเพิ่มขึ้น (ปกป้อง รัตนชู, 2551)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียด

4.5 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

ตารางที่ 4.6 แสดงการแทรกซึมคลอไรด์และร้อยละการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ซึ่งแสดงผลเป็นค่าของประจุไฟฟ้ารวมทั้งหมดหรือคูลอมบ์ (Coulombs) มาตรฐาน ASTM C 1202 (2001) ได้กำหนดให้ค่าการแทรกซึมคลอไรด์ระดับต่ำมากเท่ากับ 100 – 1000 คูลอมบ์, ระดับต่ำ 1000 – 2000 คูลอมบ์, ระดับปานกลาง 2000 – 4000 คูลอมบ์ และระดับสูงคือตั้งแต่ 4000 คูลอมบ์ขึ้นไป

การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตควบคุม (ดังตารางที่ 4.6) พบว่าคอนกรีตควบคุมมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 2440 คูลอมบ์ โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 473 กก/ซม² ซึ่งจัดอยู่ในระดับปานกลางตามมาตรฐาน ASTM C 1202 (2001) และเมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นเป็น 90 วัน พบว่ามีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่ลดลงเท่ากับ 2060 คูลอมบ์ และมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 499 กก/ซม² ซึ่งจัดอยู่ในระดับปานกลางเช่นกัน ผลการทดสอบ เห็นได้ว่าระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้นมีผลทำให้การพัฒนากำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นและทำให้การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตควบคุมลดลง

4.5.1 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียด

ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติพบว่า มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 6144 คูลอมบ์หรือคิดเป็น

2.52 เท่าของคอนกรีตควบคุม และที่อายุ 90 วันมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์เท่ากับ 5526 คูลอมป์หรือคิดเป็น 2.68 เท่าของคอนกรีตควบคุม ซึ่งจัดอยู่ในระดับที่สูง การใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนหินปูนย่อยทั้งหมดมีผลทำให้การแทรกซึมคลอไรด์มีค่าที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของรัฐพล สมนา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554) ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตดังกล่าวมีค่ากำลังอัดที่ลดลง ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำที่ต่ำลง การแทรกซึมของคลอไรด์ก็จะเข้าสู่คอนกรีตได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 4.6 การแทรกซึมคลอไรด์และร้อยละการแทรกซึมคลอไรด์

Sample	Total charge passed (Coulombs) – (<i>Coulombs/Coulomb_{CT}</i>)	
	28 days	90 days
CT	2440 - (1.00)	2060 - (1.00)
RC	6144 - (2.52)	5526 - (2.68)
RCR20	1914 - (0.78)	1355 - (0.66)
RCR35	1053 - (0.43)	708 - (0.34)
RCR50	610 - (0.25)	347 - (0.17)
RCF	9864 - (4.04)	8863 - (4.30)
RCFR20	2743 - (1.12)	1919 - (0.93)
RCFR35	1070 - (0.44)	831 - (0.40)
RCFR50	831 - (0.34)	426 - (0.21)

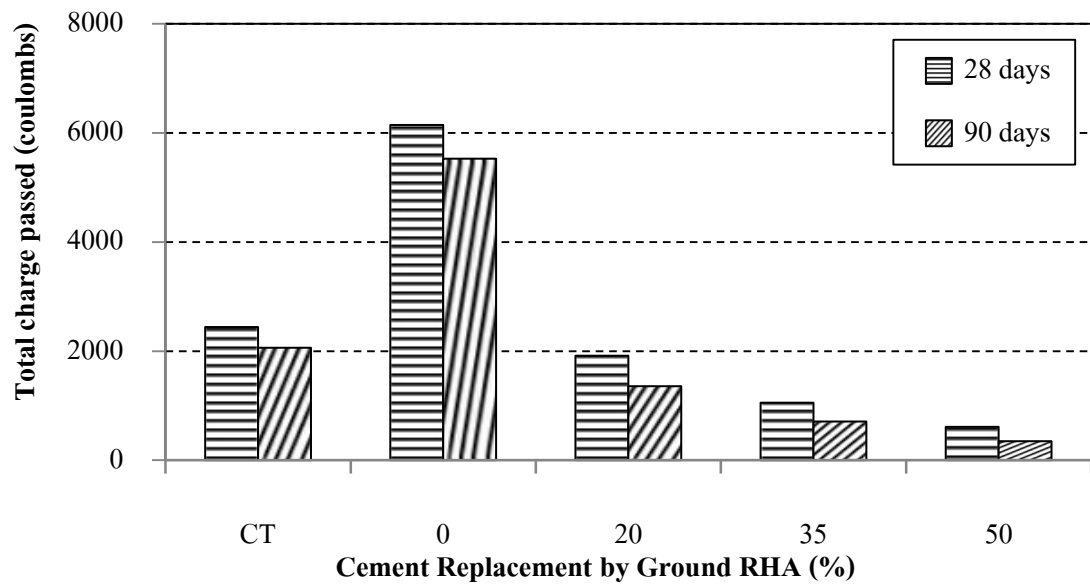
จากรูปที่ 4.7 พบว่าการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในส่วนผสมคอนกรีต ที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติสามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์ได้อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 1914, 1053 และ 610 คูลอมป์หรือคิดเป็น 0.78, 0.43 และ 0.25 เท่าของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ และที่อายุ 90 วันมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่ลดลงเท่ากับ 1355, 708 และ 347 คูลอมป์หรือคิดเป็น 0.66, 0.34 และ 0.17 เท่าของคอนกรีตควบคุม ซึ่งการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดทุกอัตราส่วนผสมมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบถึงแม้ว่าจะมีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อุกฤษฏ์ โชศรี (2548) และการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์จัดอยู่ในระดับที่ต่ำมากทุกอายุการทดสอบ เห็นได้ว่าการแทรกซึมคลอไรด์ลดลงตามปริมาณ การใช้เถ้าแกลบบดละเอียด ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลของความละเอียดของเถ้าแกลบ

บดละเอียดที่เข้าไปอุดช่องว่างในคอนกรีตและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้คอนกรีตมีช่องว่างในคอนกรีตลดลงและมีการซึมผ่านของคลอไรด์ได้น้อยลงตามไปด้วย

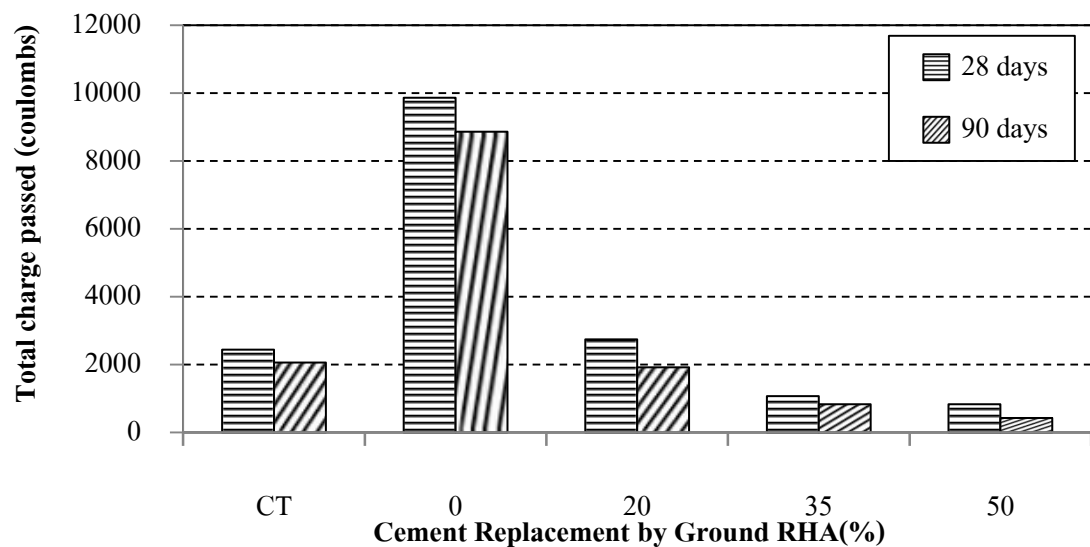
4.5.2 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียด

ตารางที่ 4.6 พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 28 วันมีค่าเท่ากับ 9864 คูลอมบ์หรือคิดเป็น 4.04 เท่าของคอนกรีตควบคุม และที่อายุ 90 วันมีค่าเท่ากับ 8863 คูลอมบ์หรือคิดเป็น 4.30 เท่าของคอนกรีตควบคุม ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สูงมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Limbachiya และคณะ (2000) ที่พบว่าการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตไม่สามารถช่วยลดค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ ทั้งนี้เนื่องจากการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมธรรมชาติทั้งหมดมีผลต่อการแทรกซึมคลอไรด์ค่อนข้างมาก เนื่องมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีความพรุนและมีความแข็งแรงที่ต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติ ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่ต่ำและความหนาแน่นที่ลดลง ทำให้มีการแทรกซึมคลอไรด์ที่สูงตามมา

การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตสามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์ได้ ซึ่งคล้ายกับการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในคอนกรีต RC ดังรูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด พบว่าการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่อายุ 28 วัน มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์เท่ากับ 2743 คูลอมบ์ ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่เมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นเป็น 90 วันสามารถทำให้ค่าการแทรกซึมคลอไรด์ มีค่าเท่ากับ 1919 คูลอมบ์หรือคิดเป็น 0.93 เท่าของคอนกรีตควบคุม สำหรับคอนกรีตที่ใช้ เถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสามารถทำให้มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมได้ทุกอายุการทดสอบ ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ อุกฤษณ์ ไชศรี (2548) ที่พบว่าการใช้เถ้าแกลบในส่วนผสมคอนกรีตสามารถลดค่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตได้ ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดสามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์ได้อย่างชัดเจน ถึงแม้ว่าจะมีกำลังอัดที่ต่ำลงก็ตาม



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด

4.6 ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

ระยะการแทรกซึมคลอไรด์แสดงดังตารางที่ 4.7 โดยแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 จากนั้นนำก้อนตัวอย่างมาผ่าซีกและหาระยะการแทรกซึมคลอไรด์โดยการ ฟันด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตและพบว่าเนื้อคอนกรีตที่มีการแทรกซึมของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเทาขาว จากนั้น วัดระยะที่สารละลายแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีต ทุกๆ ความกว้าง 1 เซนติเมตร แล้วหาค่าเฉลี่ย ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต พบว่าระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตควบคุมที่แช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 17.6 มิลลิเมตร และที่อายุ 180 วันมีระยะการแทรกซึมเพิ่มขึ้นเป็น 22.9 มิลลิเมตร ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น มีการแทรกซึมคลอไรด์เพิ่มขึ้น แต่ด้วยอัตราที่ช้าลงทั้งนี้เนื่องจากการพัฒนากำลังของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.7 ระยะการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

Mix	Chloride Penetration Depth (mm)	
	90 days	180 days
CT	17.6	22.9
RC	23.8	34.3
RCR20	13.9	17.8
RCR35	10.4	12.8
RCR50	6.4	9.6
RCF	27.5	41.8
RCFR20	15.5	21.1
RCFR35	12.1	14.9
RCFR50	8.7	12.2

4.6.1 ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของ คอนกรีต ที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียด

ตารางที่ 4.7 พบว่าระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและทรายธรรมชาติที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3 มีที่ระยะเวลา 90 วัน มีค่าเท่ากับ 23.8 มิลลิเมตร และที่แช่เป็นระยะเวลา 180 วันมีค่าเท่ากับ 34.3 มิลลิเมตร เห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและทรายธรรมชาติและใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมดส่งผลทำให้มีการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ง่ายขึ้นเนื่องจาก

มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีซีเมนต์หรือมอร์ตาร์ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมซึ่งมีโพรงอากาศหรือช่องว่างสูงกว่าหินปูนย่อย

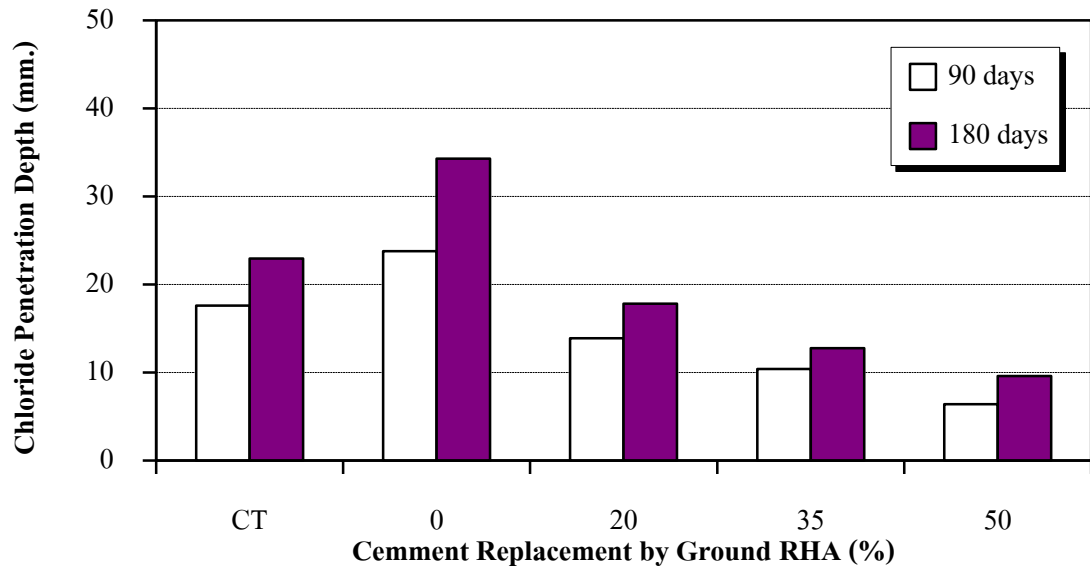
ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติและใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วน 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่แชนอายุ 90 วัน จากตารางที่ 4.7 พบว่ามีค่าเท่ากับ 13.9, 10.4 และ 6.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ และที่ อายุ 180 วัน มีค่าเท่ากับ 17.8, 12.8, 9.6 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากรูปที่ 4.9 พบว่าการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในส่วนผสมคอนกรีตสามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตได้ และทำให้มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุก อายุการทดสอบ ซึ่งเห็นได้ชัดจากรูปที่ 4.11 และ 4.12 เนื่องมาจากเถ้าแกลบมีความละเอียดที่สูงสามารถแทรกเข้าไปอุดช่องว่างช่องว่างของซีเมนต์หรือมอร์ตาร์ที่ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมได้ดี นอกจากนี้ความละเอียดของเถ้าแกลบยังสามารถทำให้เนื้อคอนกรีตมีความแน่นกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียด ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ อรรถเดช ฤกษ์พิบูลย์ (2551) ที่ใช้เถ้าขานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุพอซโซลานในส่วนผสมคอนกรีต และพบว่าสามารถลดระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตได้

4.6.2 ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของ คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียด

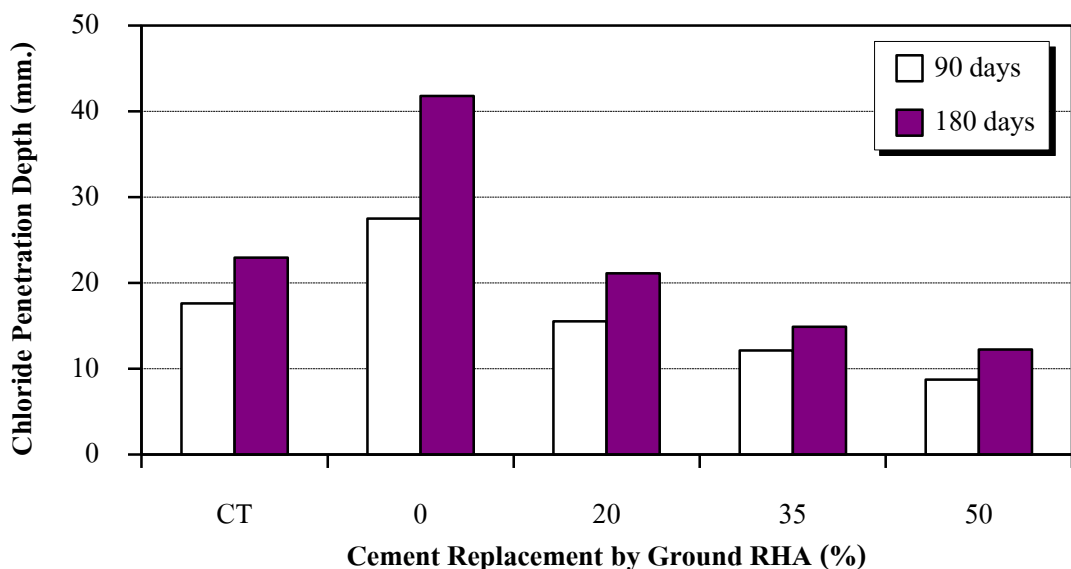
ตารางที่ 4.7 พบว่าที่อายุ การแช่ 90 วัน คอนกรีต RCF มีระยะการแทรกซึมคลอไรด์ เท่ากับ 27.5 มิลลิเมตร และเมื่อมีอายุการแช่เพิ่มขึ้นเป็น 180 วันมีค่าเท่ากับ 41.8 มิลลิเมตร ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตควบคุมค่อนข้างมากทุกอายุการทดสอบ ผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าการใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมธรรมชาติทั้งหมดมีผลต่อการแทรกซึมคลอไรด์ค่อนข้างมาก เนื่องจากมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดมีความพรุนที่สูงกว่ามวลรวมธรรมชาติ ทำให้มีการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ง่าย แม้ว่าการใช้วิธีการผสมแบบ Two-stage mixing approach (Tam และคณะ, 2005) สามารถช่วยลดรูพรุนและช่องว่างในคอนกรีตได้ก็ตาม แต่ไม่เพียงพอที่จะทำให้คอนกรีตมีระยะการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด พบว่าการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสามารถทำให้คอนกรีตดังกล่าวมีระยะการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบ และเห็นได้จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 ซึ่งคล้ายกับคอนกรีต RC โดยระยะการแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียดที่เพิ่มขึ้น ซึ่ง

การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีระยะการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำที่สุดทุกอายุการทดสอบและ เห็นได้ชัดว่าการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดสามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์ได้อย่างชัดเจนถึงแม้ว่าจะมีค่ากำลังอัดที่ต่ำก็ตาม



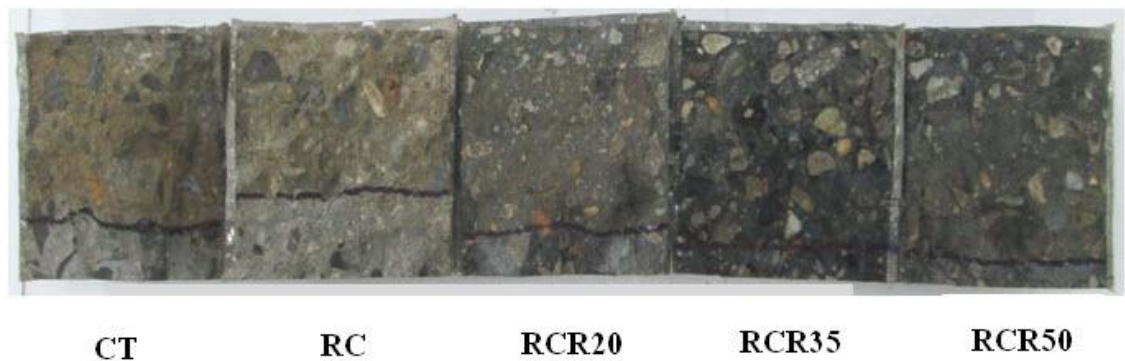
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด



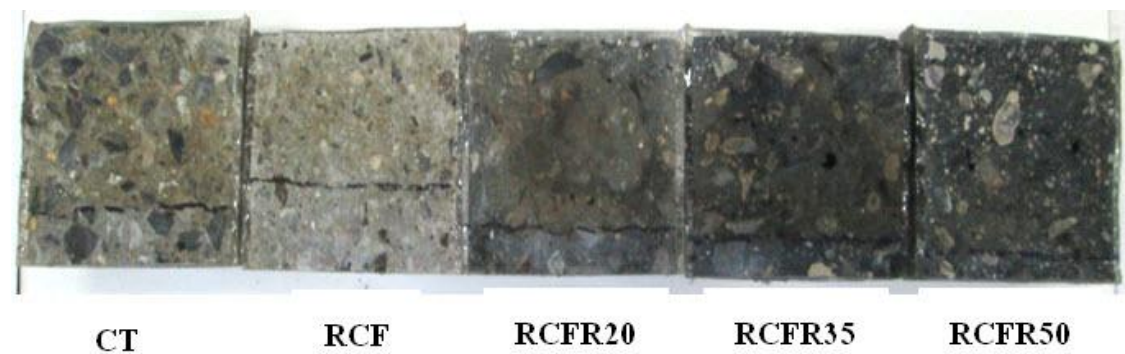
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด



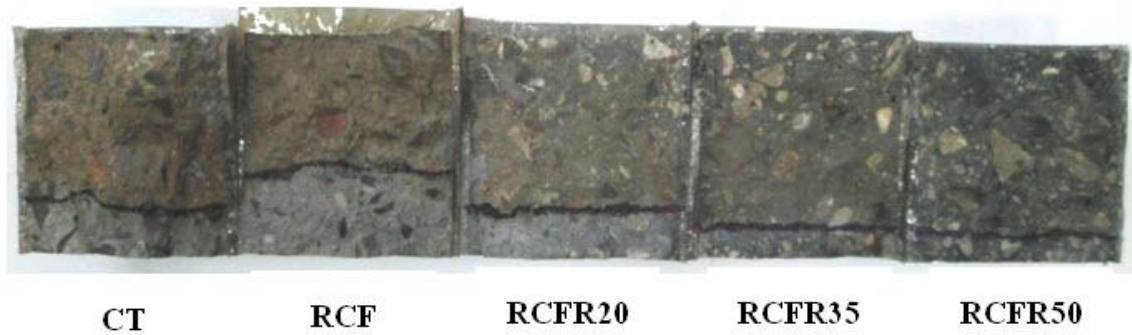
รูปที่ 4.11 ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต และทรายธรรมชาติร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียดที่อายุ 90 วัน



รูปที่ 4.12 ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต และทรายธรรมชาติร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียดที่อายุ 180 วัน



รูปที่ 4.13 ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียดที่อายุ 90 วัน



รูปที่ 4.14 ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียดที่อายุ 180 วัน

4.7 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต

การทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตเป็นวิธีการเร่งการเกิดสนิมด้วยไฟฟ้า ซึ่งงานวิจัยของ กิตติชาติ เผ่าพงษ์ไพบุลย์ และ วีระ หอสกุลไท (2553) พบว่าผลกระทบของโซเดียมคลอไรด์ส่งผลต่อ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตมากที่สุด งานวิจัยนี้จึงได้นำโซเดียมคลอไรด์มาใช้ในการทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วันมีค่า เริ่มต้นที่ 65 มิลลิแอมป์ และ มีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านก่อนตัวอย่างลดลง ตามระยะเวลาที่ทำการ ทดสอบ โดยทดสอบเป็นระยะเวลา 168 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตควบคุม ที่ระยะเวลาทดสอบ 168 ชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 37.5 มิลลิแอมป์ สำหรับตัวอย่างคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วันดังแสดงในตารางที่ 4.9 มีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเริ่มต้นเท่ากับ 58.5 มิลลิแอมป์ หลังจากนั้น มี ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านลดลงคล้ายกับตัวอย่างการทดสอบที่อายุ 28 วัน เมื่อทดสอบจนถึง ระยะเวลา 168 ชั่วโมงพบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านก่อนตัวอย่างเท่ากับ 33 มิลลิแอมป์ จากผล การทดสอบเห็นได้ว่าเมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นจะมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตน้อยลง ซึ่งมี ผลมาจากการพัฒนา ของกำลังอัดทำให้มีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตควบคุมได้น้อยลง ซึ่ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ อุกฤษณ์ โชศรี (2548) ที่พบว่าการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นจะมี กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตต่ำลง

ตารางที่ 4.8 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

Time (hr.)	Current (mA)								
	CT	RC	RCR 20	RCR 35	RCR 50	RCF	RCFR 20	RCFR 35	RCFR 50
0	65	103.5	42.5	23.5	14	118.5	51	25.5	17.5
6	56.5	94.5	40.5	22	12.5	111	48.5	23	14.5
12	53.5	85.5	37.5	21	12.5	109	46.5	23.5	13.5
18	52.5	83	37	20	11.5	103.5	45	22.5	14
24	46.5	83.5	37	20.5	11.5	99	43	22.5	14
30	44.5	82	37	20	12	99	43	23	14
36	46	78	35	19	12	100.5	44.5	22	14.5
42	46.5	78.5	36	19	11.5	100	45	20.5	14.5
48	45	77	36	19	11	95	43.5	20.5	13.5
54	45.5	76	35.5	19	11.5	95	42.5	22	13.5
60	45.5	76.5	35	18.5	11.5	93.5	44	21	14.5
66	44	75	35	18.5	11.5	90.5	44.5	19.5	14.5
72	41.5	71.5	34.5	18.5	11	88	43	19.5	13.5
78	40.5	71	34	18	11	93.5	41	20.5	12.5
84	43.5	71.5	34	18	11	95.5	42	21.5	13.5
90	41.5	71	34.5	18	10.5	94	42	20.5	13.5
96	40.5	69.5	34	18	10.5	93.5	43	21.5	13.5
102	40	72	33	18	10.5	108	43	20.5	13.5
108	40.5	72.5	32.5	17	10.5	108.5	43	20.5	13.5
114	43	73	32.5	17	10.5	108.5	43.5	19.5	13.5
120	40	74	31	17	9.5	109.5	43	19	12.5
126	40	75.5	33	17	9.5	119	43.5	20.5	12
132	41	80	33	17	9.5	123	48.5	20	12.5
138	39.5	81.5	33	16.5	9.5	124	50	18	12.5
144	37.5	85	31.5	16	9.5	124	51.5	18	11.5
150	37	87	30.5	16	9.5	132.5	52.5	19.5	11.5
156	38.5	89.5	31.5	16	9.5	131.5	59.5	20	12
162	37.5	92.5	29.5	16	9.5	135.5	59.5	18	12
168	37.5	96	32	16	9.5	137.5	63	18	10.5

ตารางที่ 4.9 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 90 วัน

Time (hr.)	Current (mA)								
	CT	RC	RCR 20	RCR 35	RCR 50	RCF	RCFR 20	RCFR 35	RCFR 50
0	58.5	94.5	24.5	15.5	6.5	110	30	18.5	8.5
6	55.5	87.5	22	15	6.5	99	28	16.5	7.5
12	50.5	82.5	21.5	14.5	6.5	93.5	27.5	15.5	7
18	47	76	21.5	14.5	6.5	93	27.5	14.5	6.5
24	46	75.5	21.5	14.5	6	92.5	27.5	14.5	6.5
30	45.5	75.5	21.5	14	6.5	91	27.5	14.5	6.5
36	43.5	73.5	21	14	6	89.5	27	15	6.5
42	42.5	71.5	20.5	13	6	89.5	27	14.5	6
48	42	70.5	20	13	6	90	27	15	6
54	41.5	69.5	20	13	5.5	88	26.5	15	6
60	41.5	68.5	20	13	5.5	86	25	15.5	6.5
66	37.5	67.5	19.5	13	5.5	85.5	26	15	6
72	37	69	20	13	5.5	85.5	26	14.5	6
78	37	68	19	13	5.5	86	25.5	14.5	6
84	39	68	19.5	13	5.5	87	25	16	6.5
90	39	68	20	13	5.5	89.5	24.5	16	6.5
96	37	67	19.5	13.5	5.5	96	25	15	6.5
102	36.5	68	20	13.5	5.5	100.5	25	15	6.5
108	37	68.5	20	13.5	5.5	106.5	25	15	6.5
114	36.5	69	20	13.5	5.5	108.5	25	15	6
120	35.5	68.5	20	13.5	5.5	112	25	15	6
126	35.5	72.5	20	13.5	5.5	112.5	25	15.5	6
132	35	75.5	20	13	5.5	116	25	15	6
138	34.5	76	20	13	5.5	119	24	15	6
144	33.5	77	20	13	5.5	121.5	24	15	6
150	33	81	20	13	5.5	121.5	24	14.5	6
156	33	84	20	13	5.5	125.5	23.5	15	6
162	33	88.5	20	13	5.5	126	24	15	6
168	33	92	20	13	5.5	127.5	24	15	6

4.7.1 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียด

ตารางที่ 4.8 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบ ที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติที่อายุ 28 วัน มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 103.5 มิลลิแอมป์ และมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ก่อนตัวอย่างลดลงอย่างรวดเร็วไปจนถึงระยะเวลาการทดสอบที่ 102 ชั่วโมงเริ่มมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านก่อนตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.16 และสังเกตเห็นว่าก่อนตัวอย่างเริ่มมีการแตกร้าวซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.15 และผลการทดสอบดังตารางที่ 4.9 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติที่อายุ 90 วัน มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 94.5 มิลลิแอมป์ จากนั้นมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านลดลงจนกระทั่งมีระยะเวลาทดสอบ 126 ชั่วโมง จึงมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเพิ่มขึ้น และพบการแตกร้าวของก่อนตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งผลการทดสอบของคอนกรีตดังกล่าวที่ไม่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียดเป็นส่วนผสมจะพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบ

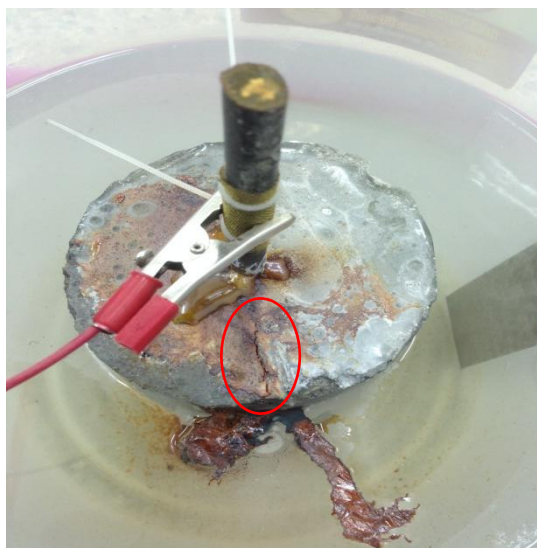
ผลการทดสอบ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติและใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 ที่อายุ 28 วัน จากรูปที่ 4.16 พบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต ที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุก ส่วนผสม สำหรับผลการทดสอบที่อายุ 90 วัน ดังรูปที่ 4.17 พบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตค่อนข้างคงที่และต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเพิ่มมากขึ้นทุกส่วนผสม ถึงแม้ว่าคอนกรีตทั้งหมดมีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อุกฤษณ์ ไชศรี (2548) ที่พบว่าการใช้เถ้าแกลบในส่วนผสมคอนกรีตสามารถทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตลดลงได้ ทั้งนี้เป็นผลมาจากเถ้าแกลบมีความละเอียดที่สูงสามารถแทรกเข้าไปอุดช่องว่างช่องว่างของซีเมนต์หรือมอร์ตาร์ที่ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมได้ดี นอกจากนี้ความละเอียดของเถ้าแกลบยังสามารถทำให้เนื้อคอนกรีตมีความแน่นกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียด ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ยากขึ้น

4.7.2 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียด

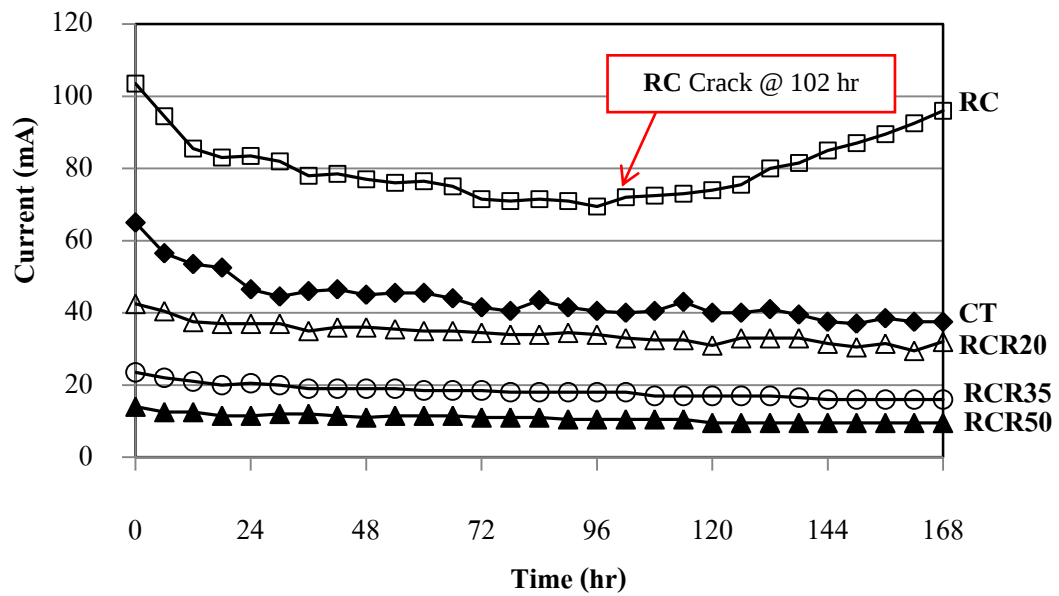
ตารางที่ 4.8 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 118.5 มิลลิแอมป์ และมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ก่อนตัวอย่างลดลงอย่างรวดเร็วไปจนถึงระยะเวลาการทดสอบที่ 78 ชั่วโมงเริ่มมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านก่อนตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.18 และสังเกตเห็นว่าก่อนตัวอย่างเริ่มมีการ

แตกร้าวซึ่งมีลักษณะ ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งคล้ายกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติ และผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่อายุ 90 วันดังตารางที่ 4.9 มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 110 มิลลิแอมป์ จากนั้นมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านลดลงดังรูปที่ 4.19 ที่ระยะเวลาทดสอบ 86 ชั่วโมง มีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเพิ่มสูงขึ้น และพบการแตกร้าวของก้อนตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งผลการทดสอบของคอนกรีตดังกล่าวที่ไม่ใช่เจ้าแกลบบดละเอียดเป็นส่วนผสมจะพบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุมค่อนข้างมากทุกอายุการทดสอบ

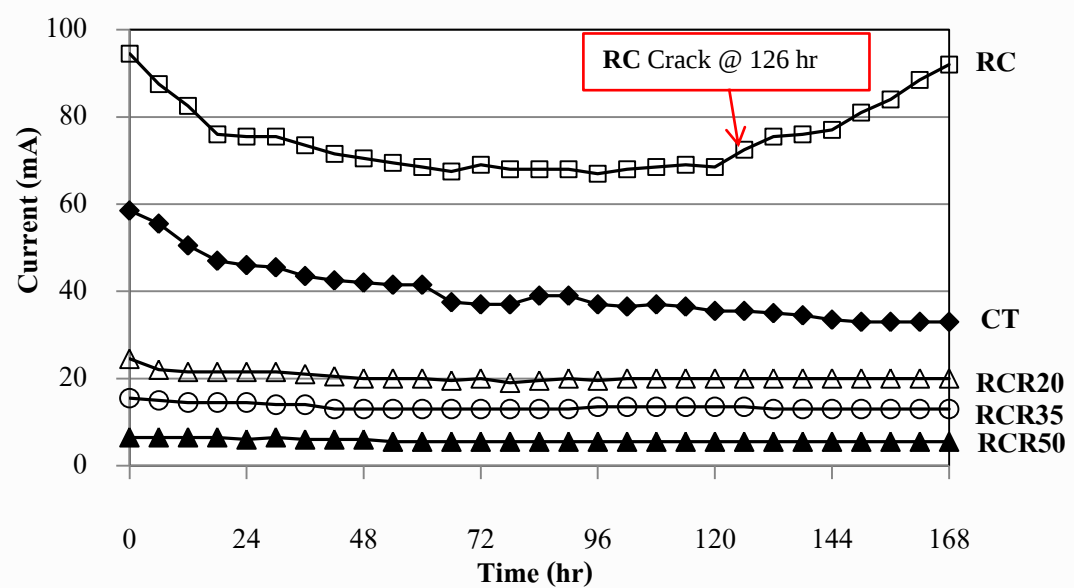
ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต และใช้เจ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ที่อายุ 28 วัน จากรูปที่ 4.18 พบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต เริ่มต้นที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมและหลังจากนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน จนระยะเวลาทดสอบที่ 132 ชั่วโมงจะมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน เพิ่มขึ้นและตัวอย่างเกิดการแตกร้าว สำหรับอัตราส่วนร้อยละ 35 และ 50 ที่อายุ 28 วัน พบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกส่วนผสม ผลการทดสอบที่อายุ 90 วันดังรูปที่ 4.19 พบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตค่อนข้างคงที่และต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกส่วนผสมถึงแม้ว่าคอนกรีตทั้งหมดมีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม มากก็ตาม ทั้งนี้เป็นผลมาจากเจ้าแกลบมีความละเอียดที่สูงสามารถแทรกเข้าไปอุดช่องว่างช่องว่างของซีเมนต์หรือมอร์ตาร์ที่ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมได้ดี นอกจากนี้ความละเอียดของเจ้าแกลบยังสามารถทำให้เนื้อคอนกรีตมีความแน่นกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช่เจ้าแกลบบดละเอียดทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ยากขึ้นซึ่งคล้ายกับกลุ่มของคอนกรีต RC



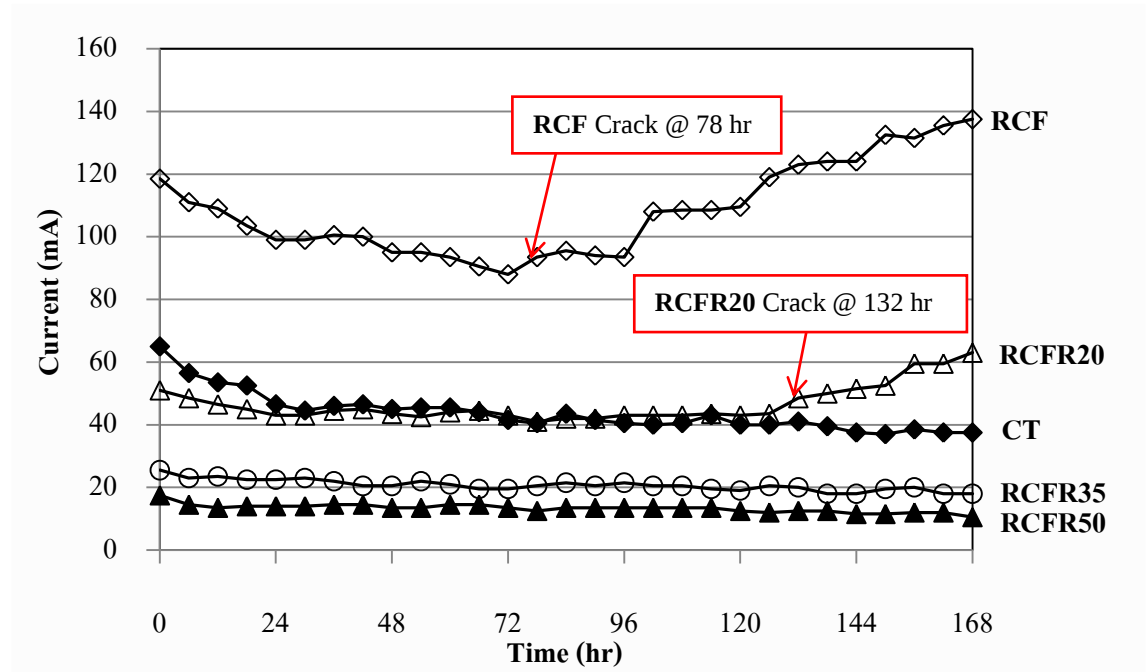
รูปที่ 4.15 ลักษณะการแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีต



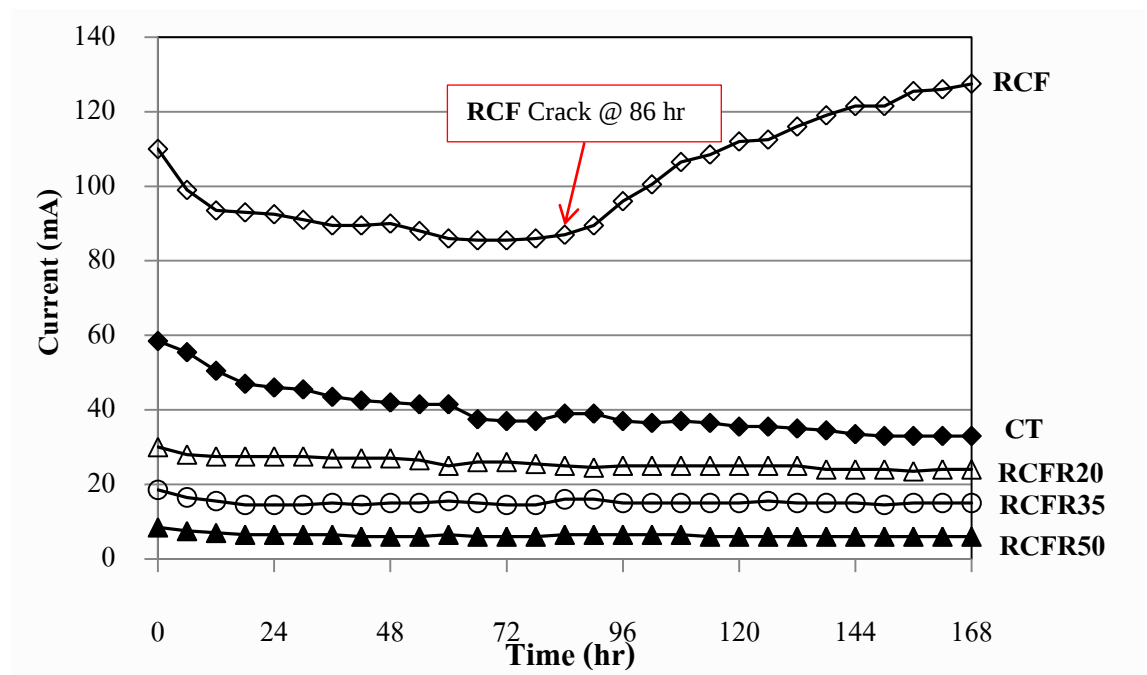
รูปที่ 4.16 ค่าการแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติ ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.17 ค่าการแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติ ที่อายุ 90 วัน



รูปที่ 4.18 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติ ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.19 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ที่อายุ 90 วัน

4.8 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม

การทดสอบพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมนั้นได้นำก้อนตัวอย่างจากการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตมาทำการผ่าซีกเพื่อนำเหล็กที่ฝังอยู่ในคอนกรีตมาทำการหาพื้นที่การเกิดสนิม ซึ่งผล

การทดสอบดังตารางที่ 4.10 พบว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน มีพื้นที่การเกิดสนิม ของเหล็กเสริม เท่ากับร้อยละ 65 ของพื้นที่ผิวเหล็กทั้งหมด และเมื่อคอนกรีตมีอายุ 90 วัน มีพื้นที่การเกิดสนิมเท่ากับ ร้อยละ 55 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด แสดงว่าเมื่อคอนกรีตควบคุมมีอายุเพิ่มขึ้นทำให้การเกิดสนิมของเหล็ก เสริมลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่มีค่ากระแสไฟฟ้าที่ ไหลผ่านคอนกรีตลดลงตามอายุที่เพิ่มมากขึ้น

4.8.1 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษ คอนกรีตและทรายธรรมชาติร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียด

ตารางที่ 4.10 พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติ ที่ไม่ ใช้เถ้าแกลบบดละเอียดมีพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม ที่อายุ 28 วันเท่ากับร้อยละ 97 ของพื้นที่ผิว ทั้งหมด และที่อายุ 90 วันมีพื้นที่การเกิดสนิม ของเหล็กเสริมเท่ากับร้อยละ 91 ของพื้นที่ผิวเหล็ก ทั้งหมด คอนกรีตดังกล่าวมีพื้นที่การเกิดสนิมที่สูงเนื่องจากมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่สูง และคอนกรีตเกิดการแตกร้าวทำให้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วทำให้เหล็กเกิด สนิมได้เร็วตามไปด้วย

สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติที่ใช้เถ้าแกลบ บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนัก ของวัสดุประสาน จากรูปที่ 4.20 พบว่าที่อายุ 28 วัน มีพื้นที่การเกิดสนิม ของเหล็กเสริมเท่ากับร้อยละ 62, 41 และ 33 ของพื้นที่ผิวเหล็กทั้งหมด ตามลำดับ และจากรูปที่ 4.21 ที่อายุ 90 วัน มีพื้นที่การเกิด สนิมเท่ากับร้อยละ 43, 36 และ 31 ของพื้นที่ผิวเหล็กทั้งหมด ตามลำดับ ซึ่งเห็นว่าการเกิดสนิมของ เหล็กเสริมลดลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ บดละเอียดที่เพิ่มขึ้นถึงแม้ว่า มีค่ากำลังอัดที่ต่ำก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ รัชชัย สาสกุล (2550) ที่พบว่าการใช้วัสดุปอซโซลานในส่วนผสม คอนกรีตสามารถลดพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้

4.8.2 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียด

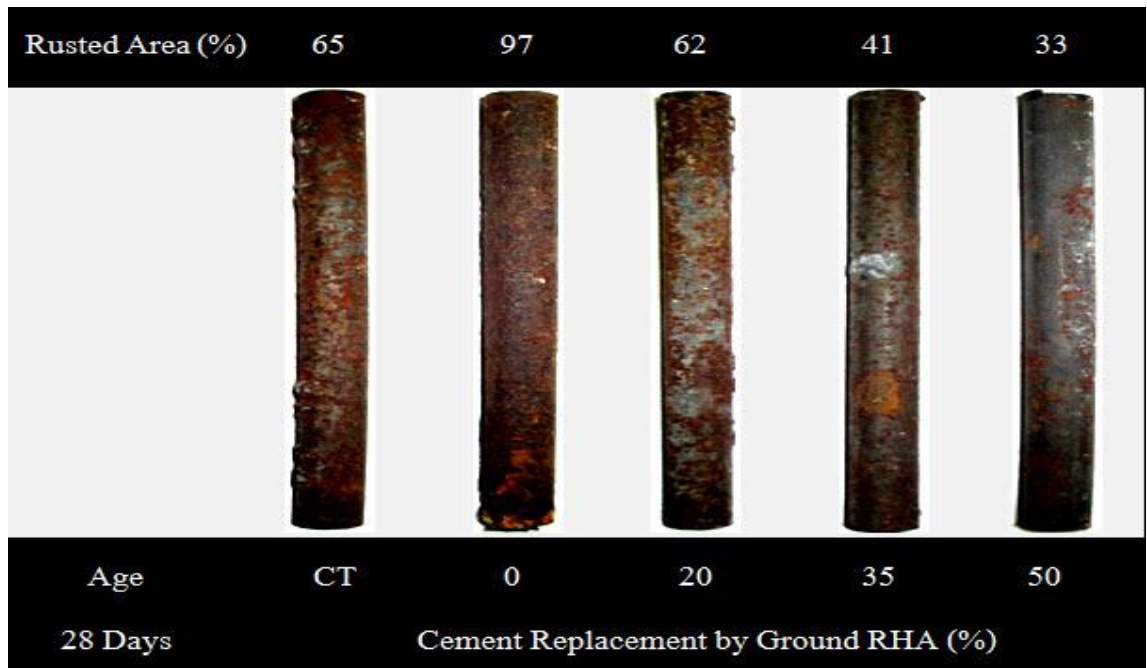
ตารางที่ 4.10 พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ ไม่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียดพบว่าพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 28 วันเท่ากับร้อยละ 99 ของ พื้นที่ผิวทั้งหมด และที่อายุ 90 วันมีพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเท่ากับร้อยละ 98 ของพื้นที่ผิว เหล็กทั้งหมด แสดง ว่าคอนกรีตดังกล่าวมีพื้นที่การเกิดสนิมที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุมค่อนข้างมาก

เนื่องจากมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่สูงและคอนกรีตเกิดการแตกร้าวทำให้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วทำให้เหล็กเกิดสนิมได้เร็วตามไปด้วย

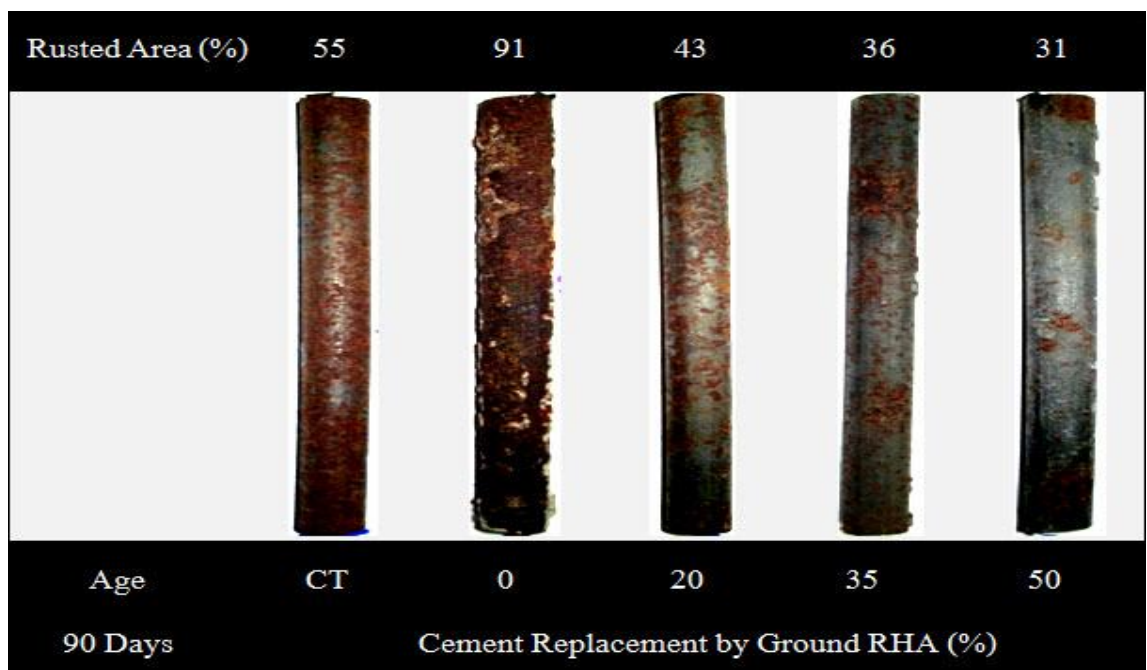
ตารางที่ 4.10 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

Mix	Rusted Area of Embedded Steel (%)	
	28 days	90 days
CT	65	55
RC	97	91
RCR20	62	43
RCR35	41	36
RCR50	33	31
RCF	99	98
RCFR20	84	48
RCFR35	62	42
RCFR50	48	35

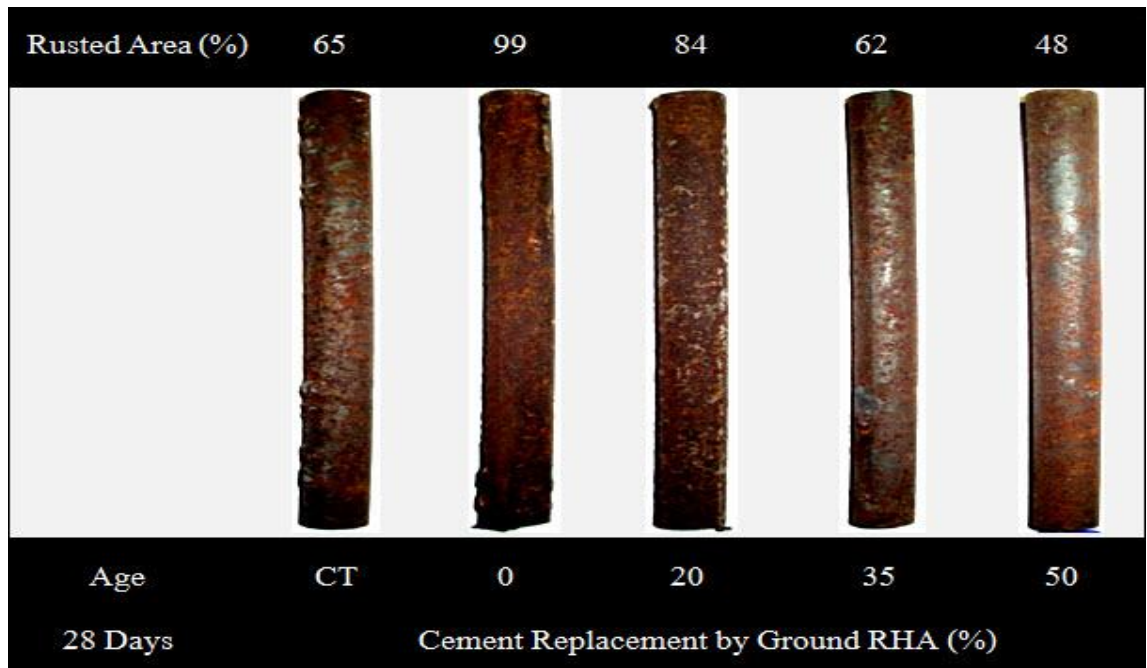
สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ใช้เก่าเกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จากรูปที่ 4.22 พบว่าที่อายุ 28 วัน มีพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเท่ากับร้อยละ 84, 62 และ 48 ของพื้นที่ผิวเหล็กทั้งหมด ตามลำดับ และ จากรูปที่ 4.23 ที่อายุ 90 วัน มีพื้นที่การเกิดสนิมเท่ากับร้อยละ 48, 42 และ 35 ของพื้นที่ผิวเหล็กทั้งหมด ตามลำดับ ซึ่ง เห็นว่าการใช้เก่าเกลบบดละเอียดแทนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่อายุ 28 วัน ยังคงมีพื้นที่การเกิดสนิม ที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม เนื่องจากมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านก้อนตัวอย่างใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม แต่มีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าควบคุมทำให้เกิดแตกร้าวของก้อนตัวอย่างได้ง่ายขึ้นสารละลายสามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้ง่ายและเกิดสนิมได้เร็วตามไปด้วย และพบว่า การใช้เก่าเกลบบดละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้พื้นที่การเกิดสนิมลดลง ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ เอนก ศิริพานิชกร และคณะ (2548) ที่พบว่าการใช้เก่าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้การเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตมีแนวโน้มที่ลดลง



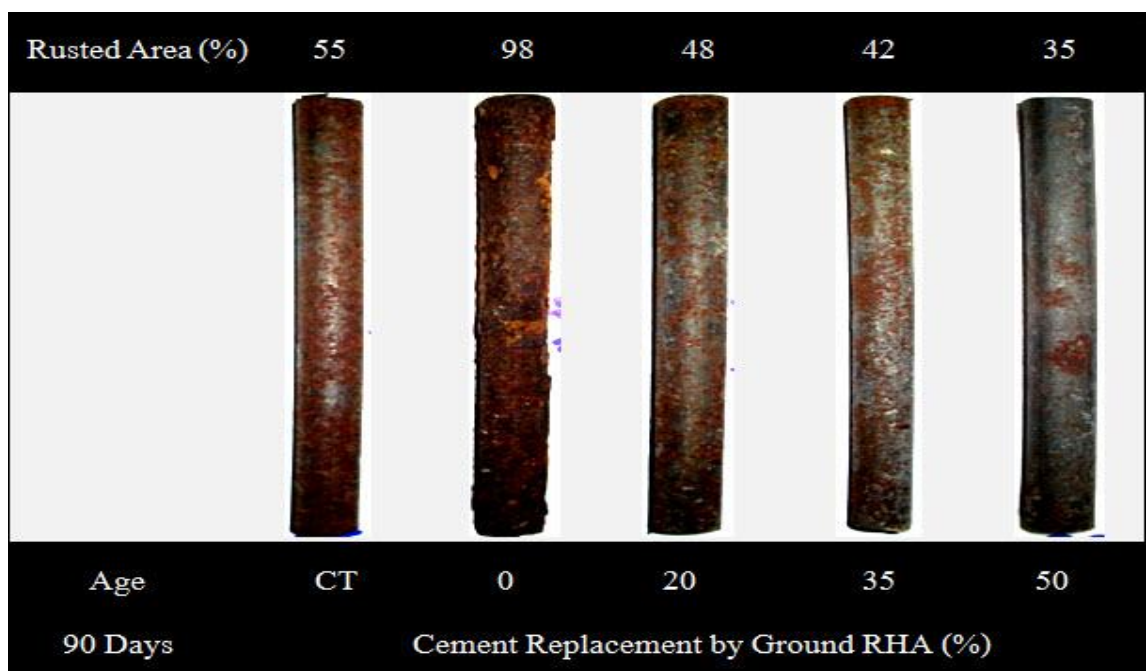
รูปที่ 4.20 ลักษณะการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติ ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.21 ลักษณะการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติ ที่อายุ 90 วัน



รูปที่ 4.22 ลักษณะการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.23 ลักษณะการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ที่อายุ 90 วัน

4.9 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G1 (1999) โดยนำเหล็กหลังจากการหาพื้นที่การเกิดสนิม แล้วมาทำการทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบ ดังตารางที่ 4.11 พบว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน มีค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเท่ากับร้อยละ 1.884 ของน้ำหนักเหล็กทั้งหมด และที่อายุ 90 วันมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.563 ของน้ำหนักเหล็กทั้งหมด การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคอนกรีตควบคุมมีค่าลดลงตามอายุที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีต ซึ่งเหมือนกับพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม

4.9.1 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมใน คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียด

ตารางที่ 4.11 พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติที่ไม่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในส่วนผสมมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมที่อายุ 28 วันเท่ากับร้อยละ 6.440 ของน้ำหนักเหล็กทั้งหมด และที่อายุ 90 วันมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเท่ากับร้อยละ 5.974 ของน้ำหนักเหล็กทั้งหมด จะเห็นว่าคอนกรีตดังกล่าวมี การสูญเสียน้ำหนักของเหล็ก ที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบ เนื่องจากมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่สูงและคอนกรีตเกิดการแตกร้าวทำให้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วทำให้เหล็กเกิดสนิมได้เร็ว และลึกลงไปในเนื้อของเหล็กเสริม

สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติที่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าที่อายุ 28 วัน มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเท่ากับร้อยละ 1.753, 1.262 และ 1.069 ของน้ำหนักเหล็กทั้งหมด ตามลำดับ และที่อายุ 90 วัน มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเท่ากับร้อยละ 1.213, 1.048 และ 0.774 ของน้ำหนักเหล็กทั้งหมด ตามลำดับ จากรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ชัดว่าการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีตสามารถช่วยลดการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมได้อย่างชัดเจนและการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดที่มากขึ้นก็จะสามารถช่วยลดการสูญเสีย น้ำหนักของเหล็กเสริมเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยถึงแม้ว่าจะมีค่ากำลังอัดที่ต่ำลงก็ตาม

4.9.2 การสูญเสีย น้ำหนักของเหล็กเสริมใน คอนกรีต ที่ใช้มวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียด

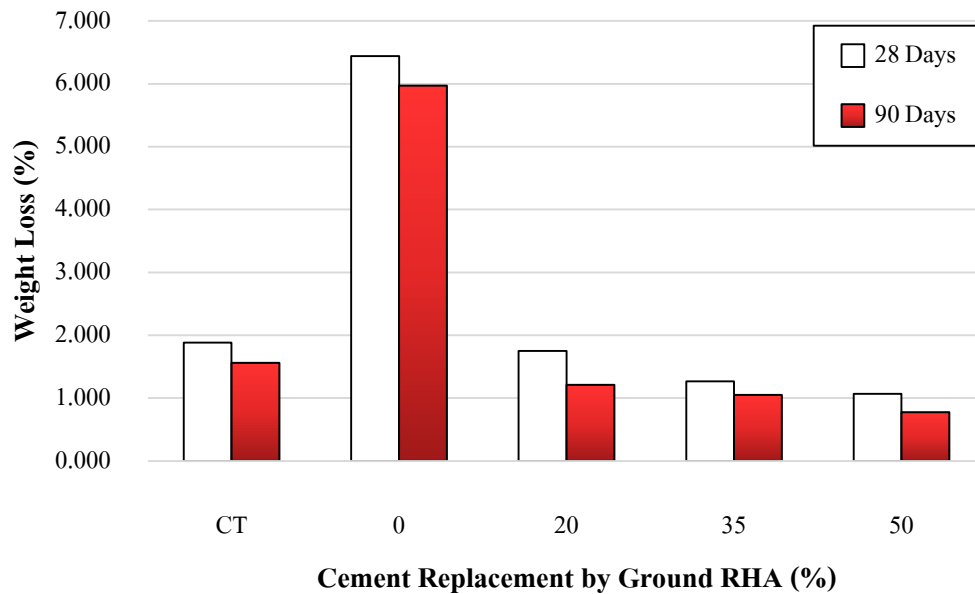
ตารางที่ 4.11 พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในส่วนผสมมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมที่อายุ 28 วันเท่ากับร้อยละ

8.043 ของน้ำหนักเหล็กทั้งหมด และที่อายุ 90 วันมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเท่ากับร้อยละ 7.689 ของน้ำหนักเหล็กทั้งหมด จะเห็นว่าคอนกรีตดังกล่าวมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม มากทุกอายุการทดสอบ เนื่องจากมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่สูงและคอนกรีตเกิดการแตกร้าวทำให้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วทำให้เหล็กเกิดสนิมได้เร็วและลึกลงไปในเนื้อของเหล็กเสริม ซึ่งคล้ายกับคอนกรีต RC

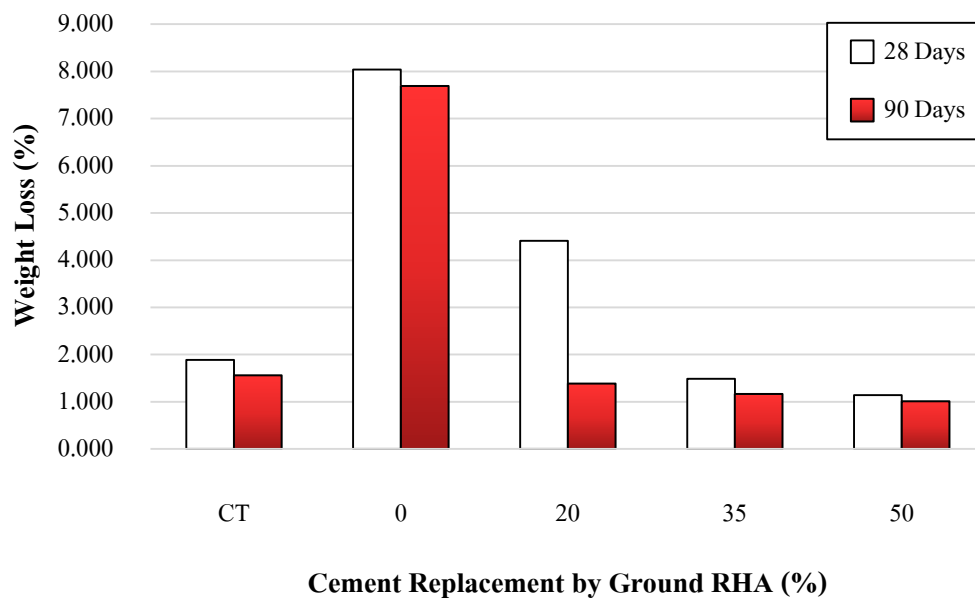
สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติที่ใช้ถ้าเกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าที่อายุ 28 วัน มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเท่ากับร้อยละ 4.405, 1.482 และ 1.144 ของน้ำหนักเหล็กทั้งหมด ตามลำดับ และที่อายุ 90 วัน มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมเท่ากับร้อยละ 1.386, 1.164 และ 1.009 ของน้ำหนักเหล็กทั้งหมด ตามลำดับ จากรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ชัดว่าการใช้ถ้าเกลบบดละเอียดใน อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่อายุ 28 วัน ยังคงมีค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่เมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นเป็น 90 วันสามารถทำให้มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมได้ สำหรับการใช้อถ้าเกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถทำให้มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมได้ทุกอายุการทดสอบ

ตารางที่ 4.11 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีต

Mix	Weight Loss of Embedded Steel (%)	
	28 days	90 days
CT	1.884	1.563
RC	6.440	5.974
RCR20	1.753	1.213
RCR35	1.262	1.048
RCR50	1.069	0.774
RCF	8.043	7.689
RCFR20	4.405	1.386
RCFR35	1.482	1.164
RCFR50	1.144	1.009



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้มวลรวม
หยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์
ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ใช้มวลรวม
หยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์
ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด

บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การใช้ไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 สามารถช่วยเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตให้สูงขึ้นได้ตั้งแต่อายุ 60 วันขึ้นไป แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม

5.1.2 การใช้ไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ถึง 50 ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติ และ ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ช่วยทำให้อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมถึงแม้ว่าจะมีกำลังอัดที่ต่ำกว่า

5.1.3 การใช้ไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ถึง 50 ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ช่วยทำให้คอนกรีตมีการแทรกซึมคลอไรด์และระยะการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำลงอย่างมากและต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมถึงแม้ว่าจะมีกำลังอัดที่ต่ำกว่าก็ตาม

5.1.4 การใช้ไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ถึง 50 ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ช่วยทำให้คอนกรีตมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม และการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมที่ต่ำลง อย่างชัดเจน และต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมถึงแม้ว่าจะมีกำลังอัดที่ต่ำกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นในอนาคตควร

ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าแกลบบดละเอียดในด้านอื่นๆ เพิ่มเติม เช่น การคืบและการหดตัวแห้งว่ามีผลกระทบเล็กน้อยเพียงใด

5.2.2 ควรศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยการนำคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตไปแช่ในน้ำทะเลแล้วเปรียบเทียบผลการทดสอบกับวิธีการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยไฟฟ้าในห้องทดสอบ

5.2.3 ควรศึกษาการนำมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตจากแหล่งอื่นหรือในสถานะต่างๆมาทำการทดสอบเพิ่มเติมว่ามีผลกระทบแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด เพื่อที่จะสามารถนำมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมาใช้ได้อย่างมั่นใจในอนาคต

5.2.4 ควรศึกษาการนำคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตไปใช้ใน โครงสร้างจริงว่าสามารถใช้งานและมีความทนทานแตกต่างจากคอนกรีตทั่วไปมากน้อยเพียงใด

เอกสารอ้างอิง

กษิดิศ มานะพัฒนานุกุล, 2554, การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้กากแกลเลียมคาร์ไบด์ผสมผงวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุประสานร่วมกับมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 28

กิตติชาติ เผ่าพงษ์ไพบูลย์ และวีระ หอสกุลไท, 2553, “ผลกระทบของโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมซัลเฟต ต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยทดสอบด้วยวิธีเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, ครั้งที่ 15, อุบลราชธานี

ดิลก กุรัตนเวช, สหลาก หอมวุฒิพงศ์, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2545, “ผลกระทบของเถาถ่านหินที่มีต่อการซึมผ่านน้ำในคอนกรีต”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, ครั้งที่ 10, ชลบุรี, หน้า 55 - 60

ธวัชชัย สาสกุล, 2550, กำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และการกัดกร่อนของเหล็กในคอนกรีตที่ใช้เถาถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่แช่ในน้ำทะเล, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 28

ปกป้อง รัตนชู, 2551, กำลังอัดและอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมร่วมกับ เถ้าถ่านหิน และเถ้าขานอ้อย, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 142

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2552, ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 2, สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ, หน้า 317-330

ปริญญา จินดาประเสริฐ และบัณฑิต หิรัญสถิตพร, 2536, “ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าแกลบ ซีเถ้าลอยและสารลดน้ำพิเศษ”, การสัมมนาทางวิชาการ เรื่องศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์, สำนักงานวิจัยและพัฒนาวิชาการการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, หน้า 1-19

ปริญญา จินดาประเสริฐ, สมศักดิ์ เมตะนันท์, สุรเชษฐ์ มั่งมีศรี และธีรวัฒน์ สันศิริ, 2543, “คุณสมบัติของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบดำ”, **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ**, ครั้งที่ 6, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า MAT-47

ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ และวิเชียร ชาลี, 2555, “กำลังอัด การแทรกซึมคลอไรด์ และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5” **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**, ปีที่ 22, ฉบับที่ 3, หน้า 526-538

พิชัย นิมิตรยงสกุล และสรรค์ สยามภักดิ์, 2538, “คุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้เศษหินปูนเก่าและอิฐหัก”, **การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ**, ครั้งที่ 2, เชียงใหม่, หน้า 87-93

เพ็ญชาย เวียงใต้, 2551, “ความสามารถการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด”, **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี**, ครั้งที่ 4, 20-22 ตุลาคม, โรงแรมลายทอง, อุบลราชธานี, หน้า MAT198-MAT203

รัฐพล สมณา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, “การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่า”, **วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา**, ปีที่ 34, ฉบับที่ 4, หน้า 369-381

วชิรกรณ์ เสนาวัง, 2554, **ผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัด การซึมของน้ำ และการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 111-125

วลัยลักษณ์ สาระจันทร์, วิรัชชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และเอกชัย ภัทรวงศ์ไพบุญย์, 2550, “ผลกระทบของความละเอียดและอัตราทดแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ต่อกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต”, **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ**, ครั้งที่ 12, 2-4 พฤษภาคม 2550, จ.พิษณุโลก, หน้า MAT55-MAT60

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2550, **ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต**, มาตรฐาน ว.ศ.ท. 1014, กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์

สหชัย แก่นอากาศ และวนิดา เพ็ญสุวรรณ, 2545, “กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกผสมเถ้าแกลบ”, **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8**, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า MAT-138

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, **ผลผลิตข้าวโลก** [Online], Available : http://www.oae.go.th/ewtadmin/ewt/oae_web/download/journal/trends2556, [Accessed on 2014, February 6].

สุพัทธ์ ขำคล้าย, 2552, การศึกษาค่าการซึมผ่านน้ำและการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมร่วมกับเถ้าปลาล่มน้ำมันบดละเอียด, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 129

สุรศักดิ์ ภูสันติพงษ์, 2545, การศึกษาคอนกรีตที่ถูกทำลายมาใช้ทดแทนมวลรวมในคอนกรีต, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 122

อรรคเดช ฤกษ์พิบูลย์, 2551, ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อยบดละเอียด, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 142

อุกฤษฏ์ โช้ศรี, 2548, กำลังรับแรงและความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, หน้า 172

เอนก ศิริพานิชกร, ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, มณเฑียร ทิฆมาณิช, ประสิทธิ์ อุดส้าห์พานิช และวิเชียร ชาลี, 2548, “ผลกระทบของน้ำทะเลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่าน”, **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, ครั้งที่ 10**, 2-4 พฤษภาคม, เพชรบุรี, หน้า MAT 49-54

Ajdukiewicz, A. and Kliszczewicz, A., 2002, “Influence of Recycled Aggregates on Mechanical Properties of HS/HPC”, **Cement and Concrete Composites**, Vol. 24, No. 2, pp. 269-279.

Alex, B.W.,1981, **Production of Rice Husk Ash and Its Application in Motar and Concrete**, Master of Engineering Thesis, Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, Asian Institute of Technology, pp.1-50.

American Society for Testing and Materials, 1999, “ASTM G1: Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens”, **In Annual Book of ASTM Standard**, Philadelphia, pp. 15-21.

American Society for Testing and Materials, 2001, “ASTM C 1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”, **In Annual Book of ASTM Standard**, Philadelphia, Vol. 04.02, pp. 634-636.

American Society for Testing and Materials, 2001, “ASTM C 127: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate”, **In 2001 Annual Book of ASTM Standard**, Philadelphia, Vol. 04.02, pp. 64-68.

American Society for Testing and Materials, 2001, “ASTM C 128: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate”, **In 2001 Annual Book of ASTM Standard**, Philadelphia, Vol. 04.02, pp. 69-73.

American Society for Testing and Materials, 2001, “ASTM C 136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates”, **In 2001 Annual Book of ASTM Standard**, Philadelphia, Vol. 04.02, pp. 78-82.

American Society for Testing and Materials, 2001, “ASTM C 150: Standard Specification for Portland Cement”, **In 1997 Annual Book of ASTM Standard**, Philadelphia, Vol. 04.02, pp. 149-155.

American Society for Testing and Materials, 2001, “ASTM C 618 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete”, **In Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 310-311.

American Society for Testing and Materials, 2001, “ASTM C 188: Standard Test Method for Density of hydraulic cements”, **In 2009 Annual Book of ASTM Standard**, Philadelphia, Vol. 04.01, pp. 179-180.

American Society for Testing and Materials, 2001, “ASTM C 39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, **In 2009 Annual Book of ASTM Standard**, Philadelphia, Vol. 04.02, pp. 18-22.

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.

Bai, J., Wild, S. and Sabir, B.B., 2003, “Chloride Ingress and Strength Loss in Concrete with Difference PC-PFA-MK Binder Compositions Exposed to Synthetic Seawater”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 33, No. 3, pp. 353-362.

Bhanumathidas, N. and Mehta, P.K., 2004, “Concrete Mixtures Made with Ternary Blended Cements Containing Fly Ash and Rice Husk Ash”, **CANMET/ACI International Conference**. Vol. 199 pp. 379–391.

British Standards Institution Methods, 1975, “BS 812 Part 3 : Standard Testing aggregates Methods for determination of aggregate crushing value”, **Annual Book of British Standards**. pp. 6-8.

Chen, H.J., Yen, T. and Chen, K.H., 2003, “Use of Building Rubbles as Recycled Aggregates”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 33, No. 1, pp. 125-132.

Gomez-Soberon, M.V., 2002, “Porosity of Recycled Concrete with Substitution of Recycled Concrete Aggregate an Experimental Study”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 32, No. 8, pp. 1301-1311.

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

Homwuttiwong, S., 2006, **Study of Strength and Water Permeability of Concrete Containing Various Pozzolanic Materials**, Doctoral Philosophy Dissertation, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, pp. 123.

Justin, A.D.S., 1980, **Current Stage of Research on Reactivity of Rice Husk Ash Cement**, Master of Engineering Thesis, Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, Asian Institute of Technology, pp.1-54.

Kumar, K., Karthikeyan, M.S. and Palaniswamy, N., 2008, "Evaluation of Performance of Grout Materials in Protection of Prestressing Steel", **International Journal of Electrochemical Science**, pp. 315-324.

Khatri, R.P. and Sirivivatnanon, V., 1997, "Method for the Determination of Water Permeability of Concrete", **ACI Materials Journal**, Vol. 94, pp. 257-261.

Lea, F.M., 1970, **The Chemistry of Cement and Concrete**, Edward Arnold Publishers, pp. 414-423.

Limbachiya, M. C., Leelawat, T. and Dhir, R. K., 2000, "Use of Recycled Concrete Aggregate in High strength Concrete", **Materials and Structures**, Vol. 33, pp. 574-580.

Ludirdja, D., Berger, R.L. and Young, J.F., 1989, "Simple Method for Measuring Water Permeability of Concrete", **ACI Materials Journal**, Vol. 86, No. 5, pp. 433-439.

Malhotra, V.M. and Mehta, P.K., 2002, "High-performance", **High-volume Fly Ash concrete**, Marquardt printing Ltd., Ottawa, Canada, pp. 50-53.

Mazlum, F. and Uyan, M., 1992, "Strength of Mortar Made with Cement Containing Rice Husk Ash and Cured in Sodium Sulphate Solution", **CANMET/ACI International Conference**, on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Istanbul, Turkey 1992 V. 1. pp. 513-532

Mehta, P.K. and Folliard, K.J., 1995, “Rice Husk Ash a Unique Supplementary Cementing Material: Durability Aspect”, **ACI Special Publication**, Vol.154, pp. 531-541

Mehta, P.K., 1977, Abstract of “Properties of Blended Cements Made From Rice Husk Ash”, **ACI Journal Proceedings**, Electronic, Vol.74, Issue9, pp. 440-442

Nordtest Method, 1989, “Concrete, Repairing Materials and Protective Coating: Embedded Steel Method, Chloride Permeability”, **NT BUILD 356 Espoo**, Finland: Nordtest

Oliveira, M.B. and Vezquez, E., 1996, “The Influence of Retained Moisture in Aggregate from Recycled on the Properties of New Hardened Concrete”, **Waste Management**, Vol. 16, No. 1-3, pp. 113-117.

Ryu, J.S., 2002, “Improvement on Strength and Impermeability of Recycled Concrete made from Crushed Concrete Coarse Aggregate”, **Journal of Materials Science Letters**, Vol. 21, pp. 1565-1567.

Sugita, S., Shoya, M. and Tokuda, H., 1992, “Evaluation of Pozzolanic Activity of Rice Husk Ash (SP-132)”, **Proceedings Fourth International Conference**, Fly Ash, Silica Fume, and Natural Pozzolans in Concrete, Vol.1, Istanbul, Turkey, pp. 495-512.

Tam, W.Y.V., Gao, X.F. and Tam, C.M., 2005, “Micro-Structural Analysis of Recycled Aggregate Concrete Produced from Two-Stage Mixing Approach”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 35, No. 6, pp. 1195-1203.

Tomas, M.D.A. and Matthews, J.D., 2004, “Performance of PFA Concrete in a Marine Environment Ten year Results”, **Cement and Concrete Composites**, Vol. 26, No. 1, pp. 5-20.

Weerachart Tangchirapat, Rak Buranasing, Chai Jaturapitakkul and Prinya Chindaprasirt, 2008, “Influence of Rice Husk–bark ash on Mechanical Properties of Concrete Containing High Amount of Recycled Aggregates”, **Construction and Building Materials**, Vol. 22, Issue 8, pp. 1812-1819.

Zhang, M.H. and Mohan, M.V. 1996. "High-Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash as a Supplementary Cementing Material", **ACI Materials Journal**. Vol. 93, Issue 6, pp. 629-636.

Zongin, L. and Chung-Kong, C., 2000, "New Water Permeability Test Scheme for Concrete", **ACI Materials Journal**, Vol. 97, No.1, pp. 84-90.

ภาคผนวก ก
คุณสมบัติจำเพาะของวัสดุ

ตารางที่ ก.1 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

Materials Identification	Sample 1	Sample 2
Temperature of water (°C)	25.4	25.4
Weight of cement, A (g)	64	64
Volume of kerosene, B (ml)	0.7	0.6
Volume of kerosene + cement, C (ml)	20.9	21.0
Specific Gravity of cement, A/(C-B) (g/cm ³)	3.17	3.14
Average (g/cm ³)	3.15	

ตารางที่ ก.2 ความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบก่อนบดละเอียด

Materials Identification	Sample 1	Sample 2
Temperature of water (°C)	25.3	25.4
Weight of pozzolanic materials, A (g)	40.0	40.0
Volume of kerosene, B (ml)	0.7	0.6
Volume of kerosene + pozzolanic materials, C (ml)	21.9	21.8
Specific Gravity of pozzolanic materials, A/(C-B) (g/cm ³)	1.89	1.89
Average (g/cm ³)	1.89	

ตารางที่ ก.3 ความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบหลังบดละเอียด

Materials Identification	Sample 1	Sample 2
Temperature of water (°C)	25.4	25.4
Weight of pozzolanic materials, A (g)	47.0	47.0
Volume of kerosene, B (ml)	0.7	0.7
Volume of kerosene + pozzolanic materials, C (ml)	21.7	21.6
Specific Gravity of pozzolanic materials, A/(C-B) (g/cm ³)	2.24	2.25
Average (g/cm ³)	2.24	

ตารางที่ ก.4 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของทรายธรรมชาติ

Materials Identification	Sample 1	Sample 2	Average
Weight of Flash +Water, B (g)	654.30	654.10	654.20
Weight of Sand in SSD, S (g)	500.10	500.00	500.05
Weight of Flash + Water + Sand, C (g)	962.60	963.80	963.20
Weight of Sang in Oven-Dry, A (g)	495.50	495.60	495.55
Bulk specific gravity : $A/(B+S-C)$	2.58	2.60	2.59
Bulk specific gravity, SSD : $S/(B+S-C)$	2.61	2.63	2.62
Apparent specific gravity : $A/(B+A-C)$	2.65	2.67	2.66
Absorption: $[(S-A/A) \times 100 (\%)]$	0.93	0.89	0.91

ตารางที่ ก.5 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหินปูนย่อย

Materials Identification	Sample 1	Sample 2	Average
Weight of Lime Stone in SSD,B (g)	3003.20	3001.5	3002.35
Weight of Lime Stone in Water (g)	1900.20	1889.2	1894.70
Weight of Lime Stone in Oven-Dry, A (g)	2987.90	2988.3	2988.10
Bulk specific gravity : $A/(B-C)$	2.71	2.69	2.70
Bulk specific gravity, SSD : $B/(B-C)$	2.72	2.70	2.71
Apparent specific gravity : $A/(A-C)$	2.75	2.72	2.73
Absorption: $[(B-A/A) \times 100 (\%)]$	0.51	0.44	0.48

ตารางที่ ก.6 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

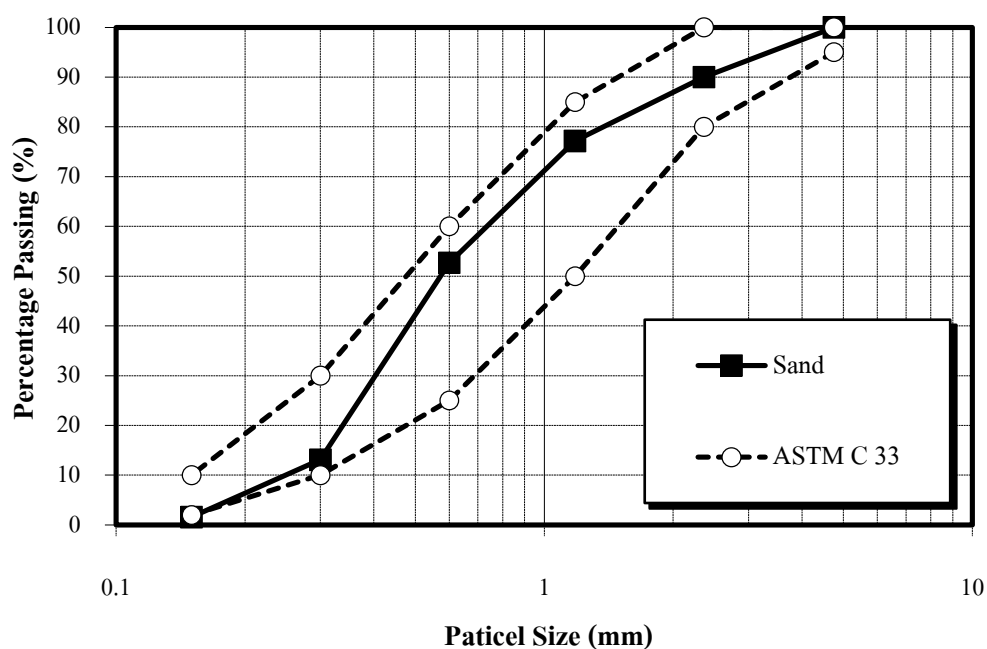
Materials Identification	Sample 1	Sample 2	Average
Weight of Flash +Water, B (g)	653.90	653.40	653.65
Weight of RFA in SSD, S (g)	500.00	500.00	500.00
Weight of Flash + Water + RFA, C (g)	942.80	938.80	940.80
Weight of RFA in Oven-Dry, A (g)	463.30	642.45	462.88
Bulk specific gravity : $A/(B+S-C)$	2.19	2.15	2.17
Bulk specific gravity, SSD : $S/(B+S-C)$	2.37	2.33	2.35
Apparent specific gravity : $A/(B+A-C)$	2.66	2.61	2.63
Absorption: $[(S-A/A) \times 100 (\%)]$	7.92	8.12	8.02

ตารางที่ ก.7 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

Materials Identification	Sample 1	Sample 2	Average
Weight of RCA in SSD,B (g)	3000.2	3000.50	3000.35
Weight of RCA in Water (g)	1795.00	1799.20	1797.10
Weight of RCA in Oven-Dry, A (g)	2852.50	2848.50	2850.65
Bulk specific gravity : $A/(B-C)$	2.37	2.37	2.37
Bulk specific gravity, SSD : $B/(B-C)$	2.49	2.50	2.49
Apparent specific gravity : $A/(A-C)$	2.70	2.71	2.71
Absorption: $[(B-A/A) \times 100 (\%)]$	5.18	5.34	5.26

ตารางที่ ก.8 การกระจายตัวของทรายธรรมชาติ

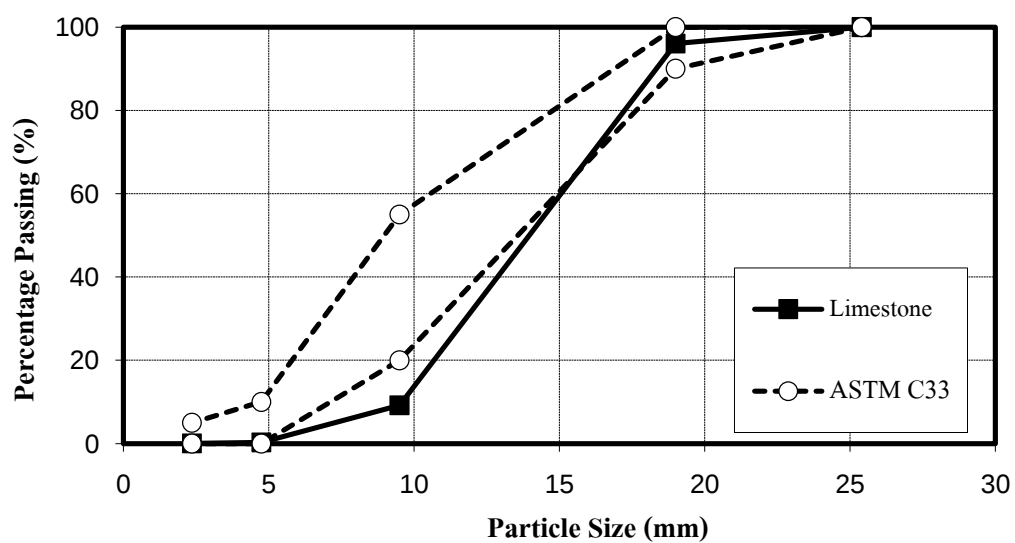
Sieve No.	Sieve Opening (mm)	Sieve Weight (g)	Sieve and Fine Agg. (g)	Fine Agg. Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Passing (%)
#4	4.75	778.1	778.1	0.00	0.00	0.00	100
#8	2.36	699.4	749.4	50.00	10.00	10.00	90.00
#16	1.18	652.6	716.8	64.20	12.84	22.84	77.16
#30	0.60	596.4	718.8	122.40	24.48	47.31	52.69
#50	0.30	549.2	747.2	198.00	39.59	86.90	13.10
#100	0.15	515.8	573.4	57.60	11.52	98.42	1.58
Pan	-	477.7	485.6	7.90	1.58	-	0.00
Sum				500.10	100	265.47	
Finessed Modulus				= 2.65			



รูปที่ ก.1 การกระจายตัวของทรายธรรมชาติ

ตารางที่ ก.9 การกระจายตัวของหินปูนย่อย

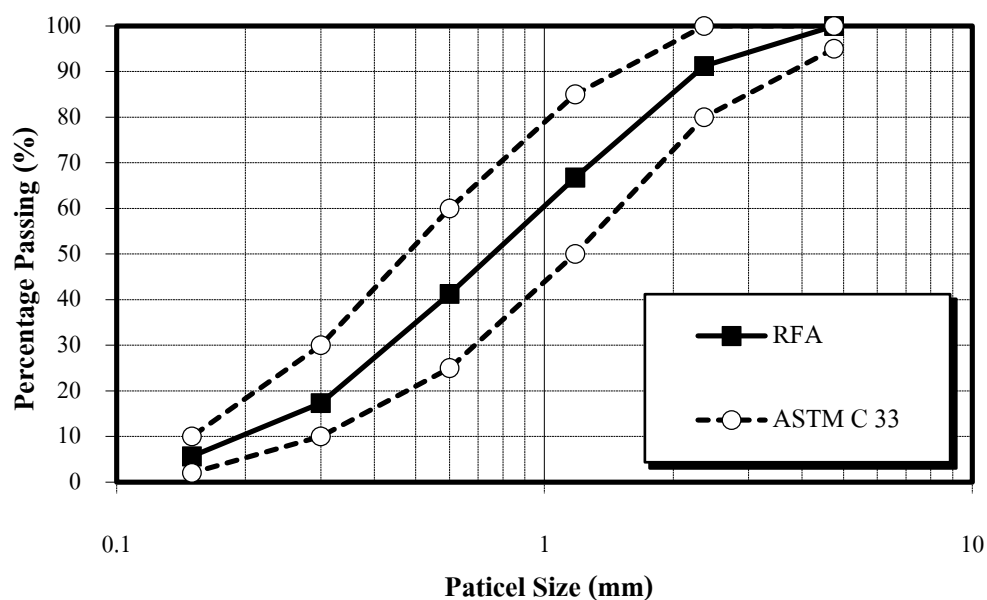
Sieve No.	Sieve Opening (mm)	Sieve Weight (g)	Sieve and Corase Agg. (g)	Corase Agg. Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Passing (%)
1"	25.40	660.75	660.75	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00	806.3	885.50	79.20	3.96	3.96	96.04
3/8"	9.50	795.8	2532.50	1736.70	86.83	90.79	9.21
#4	4.75	778.1	956.80	178.70	8.93	99.72	0.28
#8	2.36	499.4	503.60	4.20	0.21	99.93	0.07
#16	1.18	556.59	556.59	0.00	0.00	100.00	0.00
#30	0.60	383.2	383.20	0.00	0.00	100.00	0.00
#50	0.30	498.8	498.80	0.00	0.00	100.00	0.00
#100	0.15	525.17	525.17	0.00	0.00	100.00	0.00
Pan	-	477.7	479.10	1.40	0.07	-	0.00
Sum				2000.20	100	694.40	
Finessed Modulus				= 6.94			



รูปที่ ก.2 การกระจายตัวของหินปูนย่อย

ตารางที่ ก.10 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

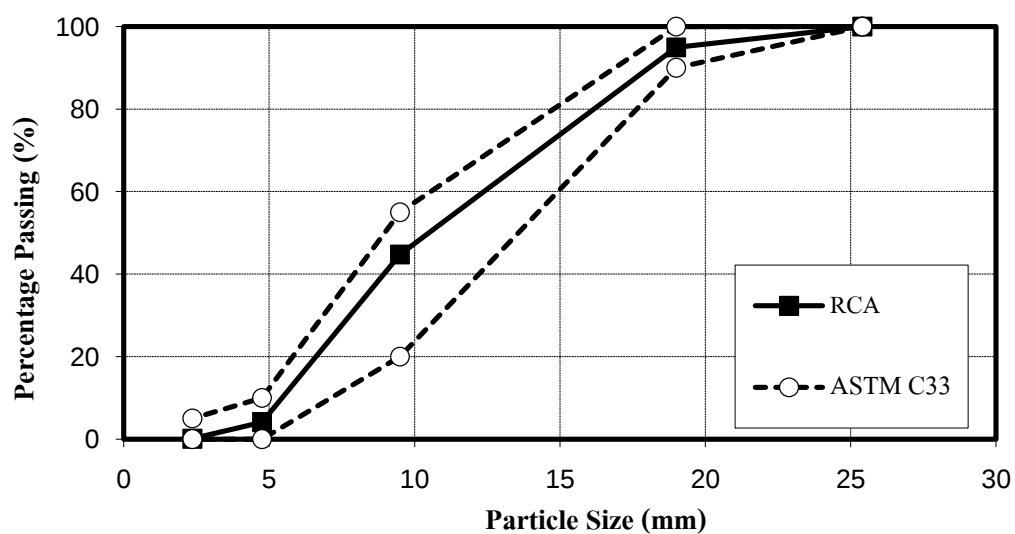
Sieve No.	Sieve Opening (mm)	Sieve Weight (g)	Sieve and Fine Agg. (g)	Fine Agg. Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Passing (%)
#4	4.75	778.0	778.1	0.10	0.02	0.00	100
#8	2.36	699.4	743.4	44.0	8.80	8.80	91.20
#16	1.18	652.6	774.9	122.30	24.45	33.25	66.75
#30	0.60	596.4	724.0	127.60	25.51	58.76	41.24
#50	0.30	549.2	668.8	119.60	23.91	82.67	17.33
#100	0.15	515.6	574.1	58.50	11.70	94.36	5.64
Pan	-	477.7	505.8	28.10	5.62	-	0.00
Sum				500.2	100	277.83	
Finessed Modulus				= 2.77			



รูปที่ ก.3 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

ตารางที่ ก.11 การกระจายตัวของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

Sieve No.	Sieve Opening (mm)	Sieve Weight (g)	Sieve and Coarse Agg. (g)	Coarse Agg. Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent Retained (%)	Percent Passing (%)
1"	25.40	660.75	660.75	0.00	0.00	0.00	100
3/4"	19.00	806.40	907.30	100.90	5.04	5.04	94.96
3/8"	9.50	795.8	1800.90	1005.10	50.24	55.28	44.72
#4	4.75	778.1	1590.30	812.20	40.60	95.88	4.12
#8	2.36	499.4	579.90	80.50	4.02	99.91	0.09
#16	1.18	556.59	556.59	0.00	0.00	100.00	0.00
#30	0.60	383.2	383.20	0.00	0.00	100.00	0.00
#50	0.30	498.8	498.80	0.00	0.00	100.00	0.00
#100	0.15	525.17	525.17	0.00	0.00	100.00	0.00
Pan	-	477.7	479.60	1.90	0.09	-	0.00
Sum				2000.60	100	656.11	
Finessed Modulus				= 6.56			



รูปที่ ก.4 การกระจายตัวของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

ตารางที่ ก.12 การแตกหักของหินปูนย่อย

Material Identification	Sample 1	Sample 2
Total Weight of aggregate (g)	2843	3009
Weight of Aggregate Retain No.8 (g)	2337	2515
Weight of Aggregate passing No.8 (g)	506	494
Crushing of Aggregate (%)	17.80	16.42
Average Crushing of Aggregate (%)	17.11	

ตารางที่ ก.13 การแตกหักของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

Material Identification	Sample 1	Sample 2
Total Weight of aggregate (g)	2778	2620
Weight of Aggregate Retain No.8 (g)	2239	2088
Weight of Aggregate passing No.8 (g)	539	532
Crushing of Aggregate (%)	19.40	20.31
Average Crushing of Aggregate (%)	19.85	

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต CT

Concrete : CT (W/B = 0.45)							Slump = 100 mm		
Age (Days)	Sample	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (kg)	Density (kg/m ³)		Load (kN)	Comp. Strength (kg/cm ²)	
7	1	10.09	19.80	3.795	2,397	2,406	286.6	365	366
	2	10.00	20.10	3.796	2,405		280.8	364	
	3	9.99	19.60	3.713	2,417		283.7	369	
28	1	10.00	19.85	3.716	2,384	2,402	358.3	465	473
	2	10.00	19.70	3.729	2,410		364.7	473	
	3	9.99	20.00	3.782	2,413		369.1	480	
60	1	10.00	19.80	3.748	2,410	2,394	380.4	494	491
	2	10.03	19.74	3.763	2,413		347.4	448	
	3	10.11	19.90	3.769	2,359		385.1	489	
90	1	10.13	20.10	3.864	2,385	2,389	389.5	493	499
	2	10.14	20.19	3.893	2,388		401.2	506	
	3	10.04	20.04	3.798	2,394		387.6	499	

หมายเหตุ



ค่าที่ไม่นำมาพิจารณา

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต RC

Concrete : RC (W/B = 0.45)							Slump = 120 mm		
Age (Days)	Sample	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (kg)	Density (kg/m ³)		Load (kN)	Comp. Strength (kg/cm ²)	
7	1	10.01	19.81	3.575	2,293	2,309	230.8	299	303
	2	10.02	19.71	3.595	2,313		232.5	301	
	3	10.00	19.82	3.612	2,320		283.2	309	
28	1	10.01	19.80	3.616	2,321	2,297	311.2	403	392
	2	10.02	20.00	3.638	2,307		302.7	391	
	3	10.09	19.97	3.615	2,264		298.9	381	
60	1	10.05	20.05	3.661	2,302	2,324	320.1	411	415
	2	10.07	20.05	3.716	2,327		316.9	406	
	3	9.95	19.92	3.627	2,342		325.6	427	
90	1	10.00	20.03	3.652	2,321	2,318	328.7	427	423
	2	10.02	20.02	3.659	2,318		317.8	411	
	3	10.02	20.10	3.671	2,316		334.3	432	

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต RCR20

Concrete : RCR20 (W/B = 0.45)							Slump = 110 mm		
Age (Days)	Sample	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (kg)	Density (kg/m ³)		Load (kN)	Comp. Strength (kg/cm ²)	
7	1	10.03	19.90	3.601	2,290	2,292	223.2	288	289
	2	10.04	19.87	3.591	2,283		227.6	293	
	3	10.00	19.89	3.597	2,303		219.3	285	
28	1	10.00	19.84	3.529	2,265	2,265	303.8	394	390
	2	10.04	20.09	3.614	2,272		298.3	384	
	3	10.04	19.84	3.548	2,259		304.7	392	
60	1	9.97	19.75	3.544	2,299	2,307	326.2	426	422
	2	10.01	19.80	3.587	2,302		322.6	418	
	3	10.00	19.94	3.634	2,320		282.2	366	
90	1	10.07	20.00	3.628	2,278	2,309	337.6	432	434
	2	10.02	20.14	3.737	2,353		340.1	440	
	3	10.00	19.80	3.571	2,296		331.3	430	

หมายเหตุ



ค่าที่ไม่นำมาพิจารณา

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต RCR35

Concrete : RCR35 (W/B = 0.45)						Slump = 120 mm			
Age (Days)	Sample	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (kg)	Density (kg/m ³)		Load (kN)	Comp. Strength (kg/cm ²)	
7	1	10.05	20.10	3.556	2,230	2,247	192.5	247	249
	2	10.06	20.14	3.621	2,262		196.1	251	
	3	10.01	19.81	3.505	2,248		191.7	248	
28	1	10.02	19.96	3.555	2,259	2,262	273.1	353	351
	2	10.02	20.04	3.585	2,269		267.3	346	
	3	10.00	19.95	3.538	2,258		273.7	355	
60	1	9.97	20.00	3.576	2,290	2,283	289.1	377	372
	2	10.00	19.90	3.545	2,268		284.4	369	
	3	9.99	19.95	3.581	2,290		283.7	369	
90	1	10.08	19.93	3.551	2,233	2,254	302.1	386	384
	2	10.16	19.96	3.701	2,287		302.9	381	
	3	10.04	19.95	3.543	2,243		298.3	384	

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต RCR50

Concrete : RCR50 (W/B = 0.45)							Slump = 140 mm		
Age (Days)	Sample	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (kg)	Density (kg/m ³)		Load (kN)	Comp. Strength (kg/cm ²)	
7	1	10.00	19.94	3.488	2,227	2,199	141.0	183	185
	2	10.02	19.76	3.368	2,162		147.6	191	
	3	10.05	19.98	3.498	2,207		141.0	181	
28	1	10.01	19.91	3.508	2,239	2,215	216.1	280	275
	2	10.10	19.86	3.549	2,230		216.8	276	
	3	10.10	19.70	3.435	2,176		211.9	270	
60	1	10.01	19.74	3.467	2,232	2,224	238.3	309	304
	2	10.00	19.80	3.463	2,227		232.0	301	
	3	10.00	20.00	3.477	2,214		233.1	303	
90	1	10.10	19.83	3.471	2,185	2,198	252.1	321	316
	2	10.06	19.87	3.475	2,200		243.8	313	
	3	10.00	19.96	3.463	2,209		243.2	316	

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต RCF

Concrete : RCF (W/B = 0.45)						Slump = 130 mm			
Age (Days)	Sample	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (kg)	Density (kg/m ³)		Load (kN)	Comp. Strength (kg/cm ²)	
7	1	10.00	20.00	3.478	2,214	2,207	194.1	252	250
	2	10.01	19.98	3.470	2,207		194.1	251	
	3	10.01	19.84	3.434	2,199		189.3	245	
28	1	10.00	19.95	3.428	2,192	2,209	254.2	331	326
	2	10.02	19.86	3.471	2,216		249.8	323	
	3	10.01	19.80	3.456	2,218		249.8	324	
60	1	10.14	19.65	3.591	2,263	2,233	264.7	309	340
	2	10.00	20.00	3.504	2,231		265.7	301	
	3	10.04	19.96	3.483	2,204		264.4	303	
90	1	10.01	20.09	3.493	2,209	2,208	271.3	351	349
	2	10.05	20.12	3.503	2,195		269.8	347	
	3	10.05	20.12	3.545	2,221		230.4	296	

หมายเหตุ



ค่าที่ไม่นำมาพิจารณา

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต RCFR20

Concrete : RCFR20 (W/B = 0.45)							Slump = 145 mm		
Age (Days)	Sample	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (kg)	Density (kg/m ³)		Load (kN)	Comp. Strength (kg/cm ²)	
7	1	10.05	19.96	3.433	2,168	2,173	189.4	243	249
	2	10.00	19.94	3.446	2,200		198.4	258	
	3	10.05	19.80	3.380	2,152		191.7	246	
28	1	10.10	19.64	3.473	2,220	2,215	251.4	322	319
	2	10.00	19.83	3.444	2,194		249.5	321	
	3	10.00	19.50	3.417	2,231		241.8	314	
60	1	10.00	19.70	3.421	2,211	2,204	267.5	347	343
	2	10.00	19.70	3.391	2,192		259.7	337	
	3	10.00	19.80	3.434	2,208		265.1	344	
90	1	10.20	19.61	3.548	2,214	2,197	283.6	354	359
	2	10.05	19.55	3.426	2,209		282.3	363	
	3	10.10	19.64	3.409	2,166		282.8	360	

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต RCFR35

Concrete : RCFR35 (W/B = 0.45)							Slump = 130 mm		
Age (Days)	Sample	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (kg)	Density (kg/m ³)		Load (kN)	Comp. Strength (kg/cm ²)	
7	1	10.05	19.60	3.315	2,132	2,115	154.3	198	192
	2	10.10	19.86	3.317	2,089		141.0	180	
	3	10.01	19.79	3.310	2,125		153.4	199	
28	1	10.10	19.94	3.469	2,193	2,169	198.4	255	258
	2	10.00	19.97	3.399	2,158		200.7	259	
	3	10.08	19.90	3.414	2,154		203.4	260	
60	1	9.99	19.73	3.361	2,173	2,164	219.8	286	284
	2	10.00	20.03	3.386	2,152		188.5	245	
	3	9.98	19.94	3.380	2,167		216.7	282	
90	1	10.03	19.78	3.364	2,152	2,158	239.1	308	305
	2	10.10	19.94	3.442	2,155		237.9	303	
	3	10.06	19.82	3.412	2,166		237.5	305	

หมายเหตุ



ค่าที่ไม่นำมาพิจารณา

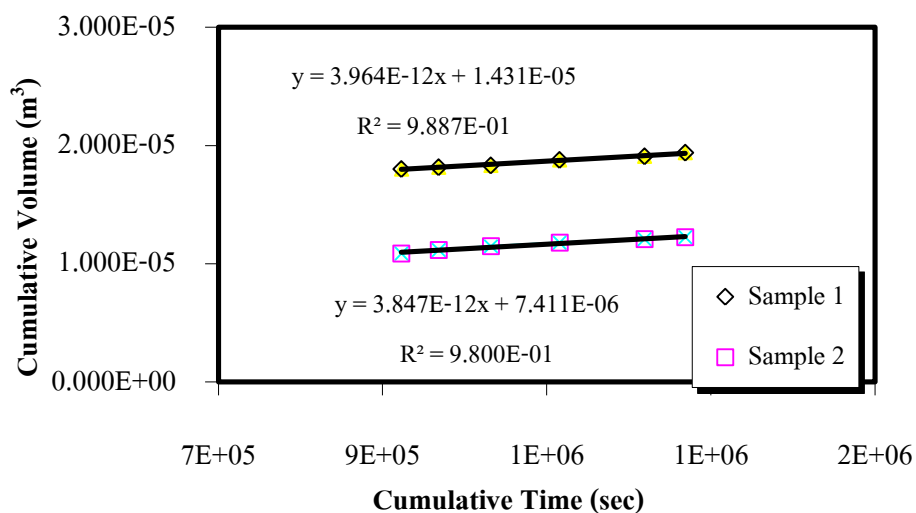
ตารางที่ ข.9 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต RCFR50

Concrete : RCFR50 (W/B = 0.45)							Slump = 145 mm		
Age (Days)	Sample	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (kg)	Density (kg/m ³)		Load (kN)	Comp. Strength (kg/cm ²)	
7	1	10.05	19.90	3.306	2,094	2,123	124.2	160	158
	2	10.10	20.00	3.413	2,130		124.2	158	
	3	10.01	20.05	3.383	2,144		121.4	157	
28	1	10.00	19.80	3.368	2,166	2,151	178.1	231	227
	2	10.00	19.70	3.338	2,157		173.0	225	
	3	9.99	19.90	3.322	2,130		174.1	226	
60	1	10.02	19.60	3.293	2,131	2,138	190.9	247	246
	2	10.01	19.69	3.304	2,132		188.1	244	
	3	9.99	19.61	3.308	2,152		191.1	249	
90	1	10.07	19.94	3.355	2,113	2,148	203.0	260	261
	2	10.00	20.02	3.404	2,165		207.6	269	
	3	10.20	19.75	3.494	2,165		202.7	253	

ภาคผนวก ค
ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต CT ที่อายุ 90 วัน

Water Permeability at the age of 90 days of CT concrete						
Date	Time	Cum. Time	Sample 1		Sample 2	
			Reading (cm)	Volume (cu.m.)	Reading (cm)	Volume (cu.m.)
7/1/2014	17:40:00		39.80		34.65	
18/1/2014	10:04:00	923,040	28.10	1.801E-05	27.60	1.085E-05
18/1/2014	22:40:00	968,400	28.00	1.816E-05	27.40	1.116E-05
19/1/2014	16:20:00	1,032,000	27.90	1.832E-05	27.20	1.147E-05
20/1/2014	15:36:00	1,115,760	27.60	1.878E-05	27.00	1.178E-05
21/1/2014	20:23:00	1,219,380	27.40	1.909E-05	26.80	1.208E-05
22/1/2014	10:10:00	1,269,000	27.20	1.940E-05	26.70	1.224E-05
Dia. 1	=	0.0990 m.	L1	=	0.0413 m.	
Dia. 2	=	0.1000 m.	L2	=	0.0404 m.	
P	=	500,000 N/m ²	Volume	=	1.5394 cm ³	
Q1	=	3.964E-12 m ³	K1	=	4.173E-13 m ³	
Q2	=	3.847E-12 m ³	K2	=	3.883E-13 m ³	
			Kav	=	4.03E-13 m ³	

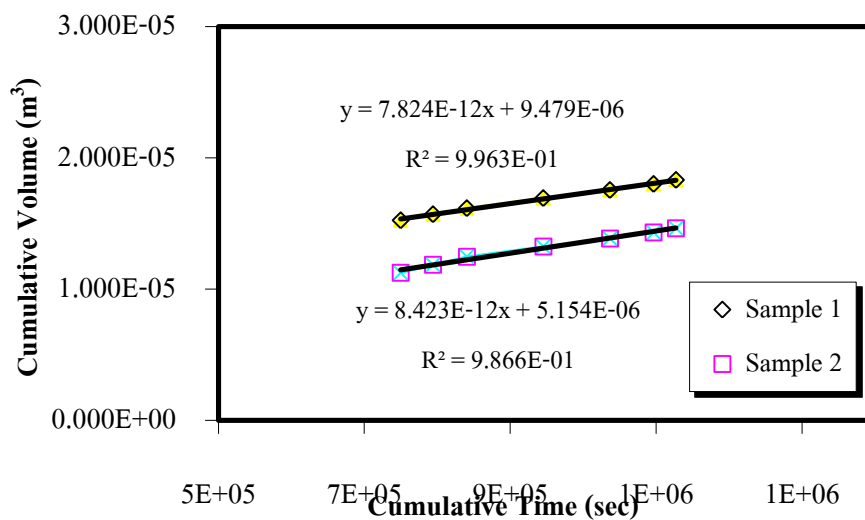


รูปที่ ค.1 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต CT ที่อายุ 90 วัน

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RC ที่อายุ 90 วัน

Water Permeability at the age of 90 days of RC concrete						
Date	Time	Cum. Time	Sample 1		Sample 2	
			Reading (cm)	Volume (cu.m.)	Reading (cm)	Volume (cu.m.)
9/2/2014	17:48:00		40.60		35.50	
18/2/2014	10:04:00	749,760	30.70	1.524E-05	28.20	1.124E-05
18/2/2014	22:23:00	794,100	30.40	1.570E-05	27.80	1.185E-05
19/2/2014	11:16:00	840,480	30.10	1.616E-05	27.40	1.247E-05
20/2/2014	16:24:00	945,360	29.60	1.693E-05	26.90	1.324E-05
21/2/2014	17:47:00	1,036,740	29.20	1.755E-05	26.50	1.385E-05
22/2/2014	10:26:00	1,096,680	28.90	1.801E-05	26.20	1.432E-05
22/2/2014	18:58:00	1,127,400	28.70	1.832E-05	26.00	1.462E-05

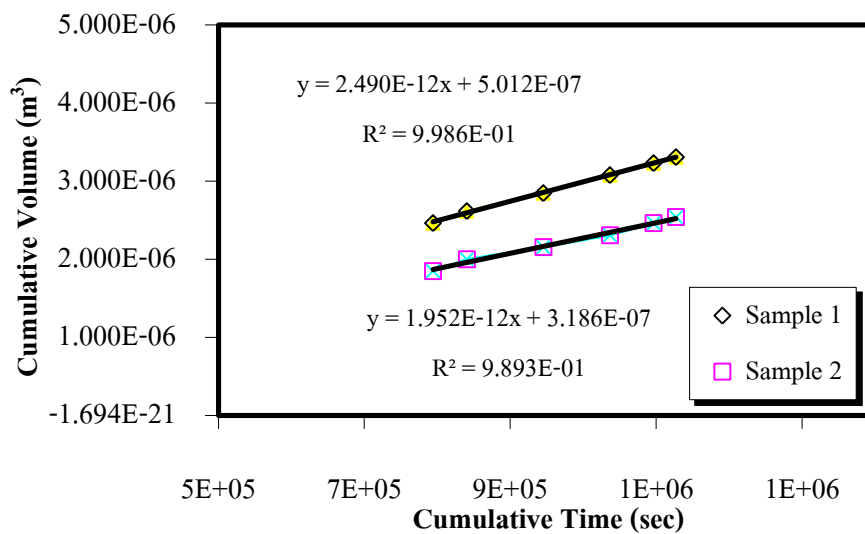
Dia. 1	=	0.1000	m.	L1	=	0.0413	m.
Dia. 2	=	0.1000	m.	L2	=	0.0407	m.
P	=	500,000	N/m ²	Volume	=	1.5394	cm ³
Q1	=	7.824E-12	m ³	K1	=	8.072E-13	m ³
Q2	=	8.423E-12	m ³	K2	=	8.564E-13	m ³
				Kav	=	8.32E-13	m ³



รูปที่ ค.2 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RC ที่อายุ 90 วัน

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCR20 ที่อายุ 90 วัน

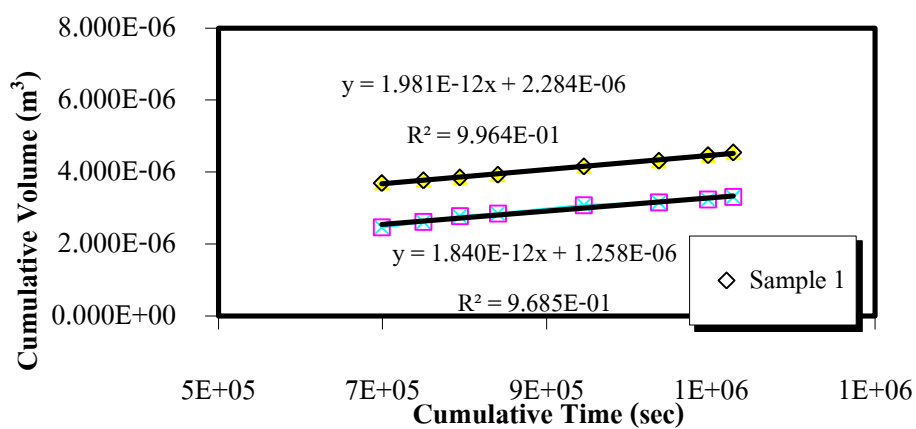
Water Permeability at the age of 90 days of RCR20 concrete						
Date	Time	Cum. Time	Sample 1		Sample 2	
			Reading (cm)	Volume (cu.m.)	Reading (cm)	Volume (cu.m.)
9/2/2014	17:49:00		39.80		38.90	
18/2/2014	22:24:00	794,100	38.20	2.463E-06	37.70	1.847E-06
19/2/2014	11:17:00	840,480	38.10	2.617E-06	37.60	2.001E-06
20/2/2014	16:25:00	945,360	37.95	2.848E-06	37.50	2.155E-06
21/2/2014	17:48:00	1,036,740	37.80	3.079E-06	37.40	2.309E-06
22/2/2014	10:27:00	1,096,680	37.70	3.233E-06	37.30	2.463E-06
22/2/2014	18:59:00	1,127,400	37.65	3.310E-06	37.25	2.540E-06
Dia. 1	=	0.1000 m.	L1	=	0.0418 m.	
Dia. 2	=	0.1000 m.	L2	=	0.0408 m.	
P	=	500,000 N/m ²	Volume	=	1.5394 cm ³	
Q1	=	2.490E-12 m ³	K1	=	2.600E-13 m ³	
Q2	=	1.952E-12 m ³	K2	=	1.990E-13 m ³	
			Kav	=	2.30E-13 m ³	



รูปที่ ค.3 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCR20 ที่อายุ 90 วัน

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCR35 ที่อายุ 90 วัน

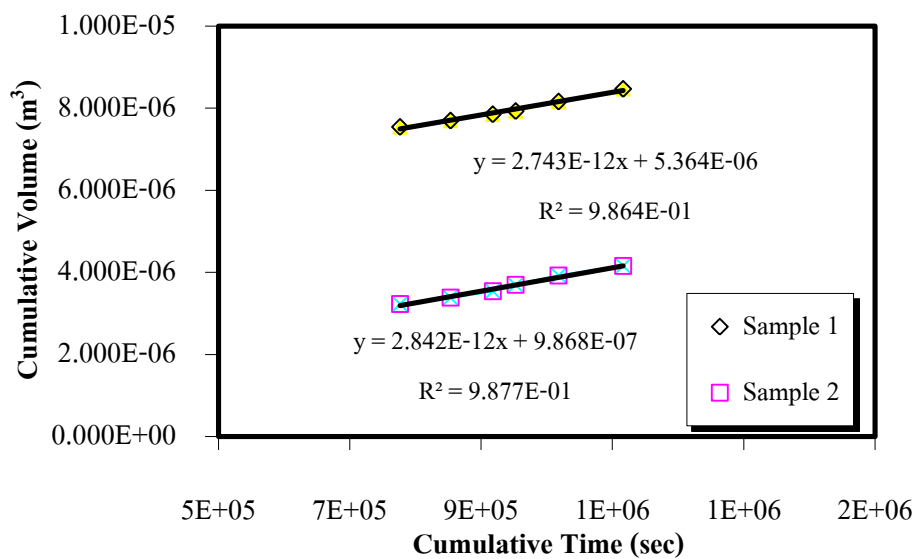
Water Permeability at the age of 90 days of RCR35 concrete						
Date	Time	Cum. Time	Sample 1		Sample 2	
			Reading (cm)	Volume (cu.m.)	Reading (cm)	Volume (cu.m.)
9/2/2014	17:49:00		38.80		37.10	
17/2/2014	19:59:00	699,000	36.40	3.695E-06	35.50	2.463E-06
18/2/2014	10:05:00	749,760	36.35	3.771E-06	35.40	2.617E-06
18/2/2014	22:24:00	794,100	36.30	3.848E-06	35.30	2.771E-06
19/2/2014	11:17:00	840,480	36.25	3.925E-06	35.25	2.848E-06
20/2/2014	16:25:00	945,360	36.10	4.156E-06	35.10	3.079E-06
21/2/2014	17:48:00	1,036,740	36.00	4.310E-06	35.05	3.156E-06
22/2/2014	10:27:00	1,096,680	35.90	4.464E-06	35.00	3.233E-06
22/2/2014	18:59:00	1,127,400	35.85	4.541E-06	34.95	3.310E-06
Dia. 1	=	0.1000 m.	L1	=	0.0410 m.	
Dia. 2	=	0.1000 m.	L2	=	0.0412 m.	
P	=	500,000 N/m ²	Volume	=	1.5394 cm ³	
Q1	=	1.981E-12 m ³	K1	=	2.029E-13 m ³	
Q2	=	1.840E-12 m ³	K2	=	1.894E-13 m ³	
			Kav	=	1.96E-13 m ³	



รูปที่ ค.4 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCR35 ที่อายุ 90 วัน

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCR50 ที่อายุ 90 วัน

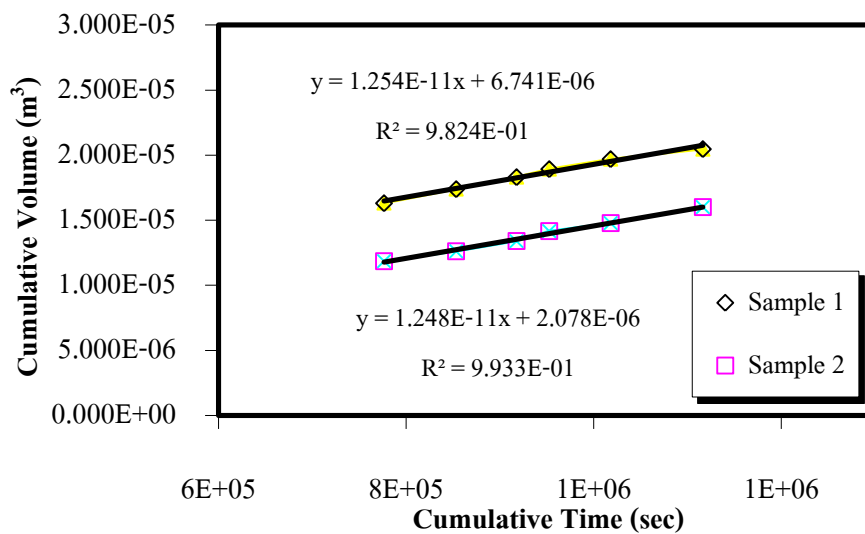
Water Permeability at the age of 90 days of RCR50 concrete						
Date	Time	Cum. Time	Sample 1		Sample 2	
			Reading (cm)	Volume (cu.m.)	Reading (cm)	Volume (cu.m.)
25/1/2014	18:25:00		40.10		37.50	
3/2/2014	18:08:00	776,580	35.20	7.543E-06	35.40	3.233E-06
4/2/2014	15:30:00	853,500	35.10	7.697E-06	35.30	3.387E-06
5/2/2014	9:23:00	917,880	35.00	7.851E-06	35.20	3.541E-06
5/2/2014	19:04:00	952,740	34.95	7.928E-06	35.10	3.695E-06
6/2/2014	13:14:00	1,018,140	34.80	8.159E-06	34.95	3.925E-06
7/2/2014	16:33:00	1,116,480	34.60	8.467E-06	34.80	4.156E-06
Dia. 1	=	0.1000 m.	L1	=	0.0401 m.	
Dia. 2	=	0.0997 m.	L2	=	0.0405 m.	
P	=	500,000 N/m ²	Volume	=	1.5394 cm ³	
Q1	=	2.743E-12 m ³	K1	=	2.748E-13 m ³	
Q2	=	2.842E-12 m ³	K2	=	2.893E-13 m ³	
			Kav	=	2.82E-13 m ³	



รูปที่ ค.5 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCR50 ที่อายุ 90 วัน

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCF ที่อายุ 90 วัน

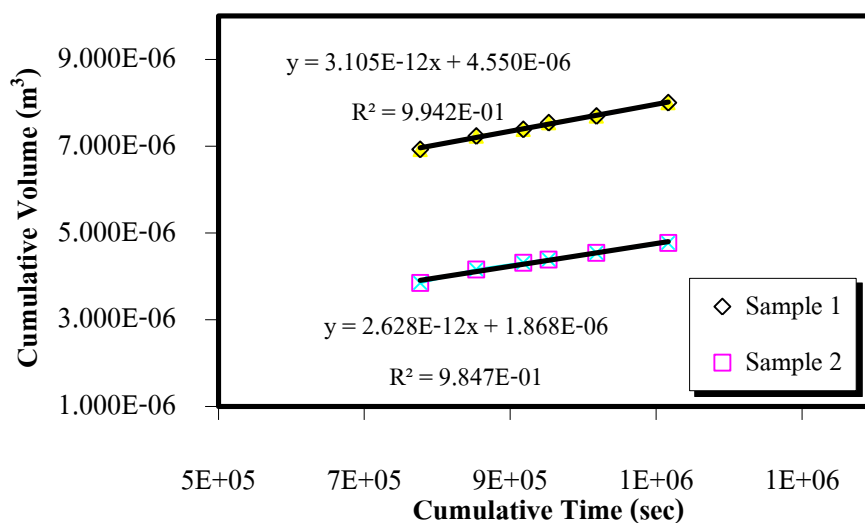
Water Permeability at the age of 90 days of RCF concrete						
Date	Time	Cum. Time	Sample 1		Sample 2	
			Reading (cm)	Volume (cu.m.)	Reading (cm)	Volume (cu.m.)
25/1/2014	18:23:00		40.60		35.50	
3/2/2014	18:06:00	776,580	30.00	1.632E-05	27.80	1.185E-05
4/2/2014	15:28:00	853,500	29.30	1.739E-05	27.30	1.262E-05
5/2/2014	9:21:00	917,880	28.70	1.832E-05	26.80	1.339E-05
5/2/2014	19:02:00	952,740	28.30	1.893E-05	26.30	1.416E-05
6/2/2014	13:12:00	1,018,140	27.80	1.970E-05	25.90	1.478E-05
7/2/2014	16:31:00	1,116,480	27.30	2.047E-05	25.10	1.601E-05
Dia. 1 = 0.1000 m.			L1 = 0.0404 m.			
Dia. 2 = 0.1000 m.			L2 = 0.0407 m.			
P = 500,000 N/m ²			Volume = 1.5394 cm ³			
Q1 = 1.254E-11 m ³			K1 = 1.266E-12 m ³			
Q2 = 1.248E-11 m ³			K2 = 1.269E-12 m ³			
			Kav = 12.67E-13 m ³			



รูปที่ ค.6 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCF ที่อายุ 90 วัน

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCFR20 ที่อายุ 90 วัน

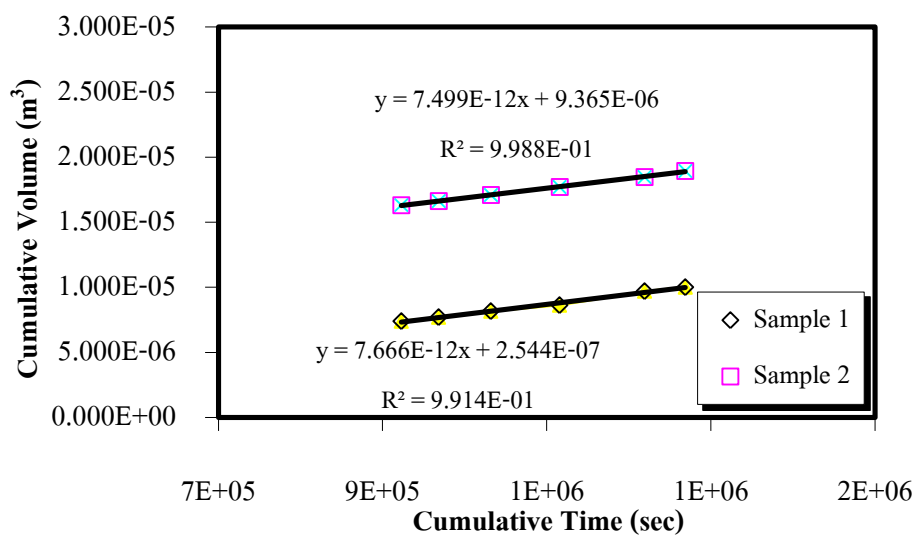
Water Permeability at the age of 90 days of RCFR20 concrete						
Date	Time	Cum. Time	Sample 1		Sample 2	
			Reading (cm)	Volume (cu.m.)	Reading (cm)	Volume (cu.m.)
25/1/2014	18:24:00		40.40		39.90	
3/2/2014	18:07:00	776,580	35.90	6.927E-06	37.40	3.848E-06
4/2/2014	15:29:00	853,500	35.70	7.235E-06	37.20	4.156E-06
5/2/2014	9:22:00	917,880	35.60	7.389E-06	37.10	4.310E-06
5/2/2014	19:03:00	952,740	35.50	7.543E-06	37.05	4.387E-06
6/2/2014	13:13:00	1,018,140	35.40	7.697E-06	36.95	4.541E-06
7/2/2014	16:32:00	1,116,480	35.20	8.005E-06	36.80	4.772E-06
Dia. 1	=	0.0993 m.	L1	=	0.0413 m.	
Dia. 2	=	0.1000 m.	L2	=	0.0416 m.	
P	=	500,000 N/m ²	Volume	=	1.5394 cm ³	
Q1	=	3.105E-12 m ³	K1	=	3.249E-13 m ³	
Q2	=	2.628E-12 m ³	K2	=	2.731E-13 m ³	
			Kav	=	2.99E-13 m ³	



รูปที่ ค.7 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCFR20 ที่อายุ 90 วัน

ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCFR35 ที่อายุ 90 วัน

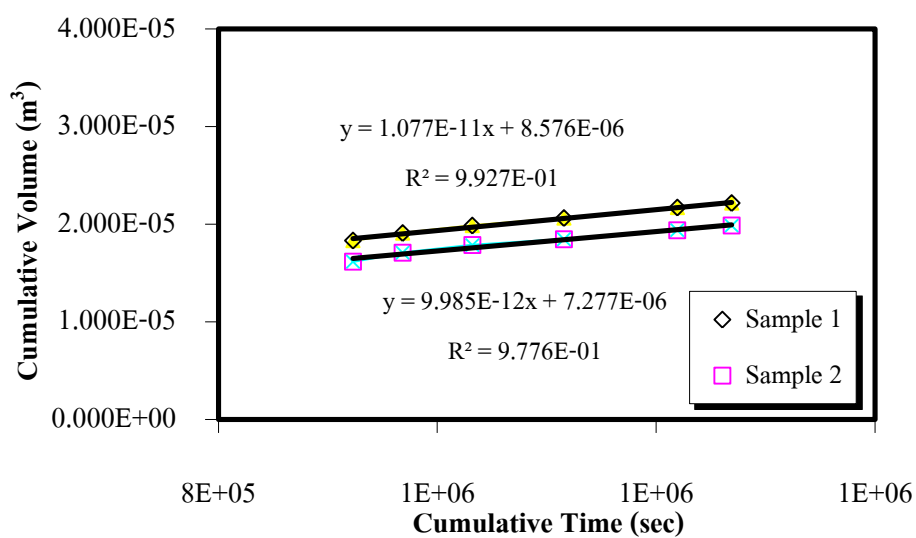
Water Permeability at the age of 90 days of RCFR35 concrete						
Date	Time	Cum. Time	Sample 1		Sample 2	
			Reading (cm)	Volume (cu.m.)	Reading (cm)	Volume (cu.m.)
7/1/2014	17:41:00		34.90		40.20	
18/1/2014	10:04:00	922,980	30.10	7.389E-06	29.60	1.632E-05
18/1/2014	22:41:00	968,400	29.90	7.697E-06	29.40	1.663E-05
19/1/2014	16:21:00	1,032,000	29.60	8.159E-06	29.10	1.709E-05
20/1/2014	15:37:00	1,115,760	29.30	8.621E-06	28.70	1.770E-05
21/1/2014	20:24:00	1,219,380	28.60	9.698E-06	28.20	1.847E-05
22/1/2014	10:11:00	1,269,000	28.40	1.001E-05	27.90	1.893E-05
Dia. 1	=	0.0993 m.	L1	=	0.0401 m.	
Dia. 2	=	0.0992 m.	L2	=	0.0407 m.	
P	=	500,000 N/m ²	Volume	=	1.5394 cm ³	
Q1	=	7.666E-12 m ³	K1	=	7.788E-13 m ³	
Q2	=	7.499E-12 m ³	K2	=	7.748E-13 m ³	
			Kav	=	7.77E-13 m ³	



รูปที่ ค.8 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCFR35 ที่อายุ 90 วัน

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCFR50 ที่อายุ 90 วัน

Water Permeability at the age of 90 days of RCFR50 concrete						
Date	Time	Cum. Time	Sample 1		Sample 2	
			Reading (cm)	Volume (cu.m.)	Reading (cm)	Volume (cu.m.)
7/1/2014	17:42:00		40.30		40.10	
18/1/2014	10:05:00	922,980	28.40	1.832E-05	29.60	1.616E-05
18/1/2014	22:42:00	968,400	27.90	1.909E-05	29.00	1.709E-05
19/1/2014	16:22:00	1,032,000	27.40	1.986E-05	28.50	1.786E-05
20/1/2014	15:38:00	1,115,760	26.90	2.063E-05	28.10	1.847E-05
21/1/2014	20:25:00	1,219,380	26.20	2.171E-05	27.50	1.940E-05
22/1/2014	10:12:00	1,269,000	25.90	2.217E-05	27.20	1.986E-05
Dia. 1	=	0.0997 m.	L1	=	0.0406 m.	
Dia. 2	=	0.1010 m.	L2	=	0.0398 m.	
P	=	500,000 N/m ²	Volume	=	1.5394 cm ³	
Q1	=	1.077E-11 m ³	K1	=	1.099E-12 m ³	
Q2	=	9.985E-12 m ³	K2	=	9.732E-13 m ³	
			Kav	=	10.36E-13 m ³	



รูปที่ ค.9 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต RCFR50 ที่อายุ 90 วัน

ภาคผนวก ง
ผลการทดสอบการแทรกซึมคลองไรด์

ตารางที่ ง.1 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต CT

Age (Day)	Sample	Properties				Current at t minutes (mA)													Charge passed (Q _x)	Charge passed (coulombs)	Avg. Charge passed (coulombs)
		Dia. (cm.)	Thick (cm.)	Area (cm. ²)	Volume (cm. ³)	I ₀	I ₃₀	I ₆₀	I ₉₀	I ₁₂₀	I ₁₅₀	I ₁₈₀	I ₂₁₀	I ₂₄₀	I ₂₇₀	I ₃₀₀	I ₃₃₀	I ₃₆₀			
28	1	10.01	5.03	78.70	395.85	96	102	107	112	119	124	130	132	133	140	143	145	147	2715	2446	2440
	2	10.00	5.08	78.54	398.98	94	101	107	112	119	123	129	131	134	138	141	144	146	2698	2435	
90	1	9.96	5.00	77.91	389.56	82	90	92	94	99	102	103	105	107	107	107	108	108	2176	1980	2060
	2	9.95	4.99	77.76	388.00	85	92	96	100	106	109	111	113	116	118	119	121	121	2347	2140	

ตารางที่ ง.2 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต RC

Age (Day)	Sample	Properties				Current at t minutes (mA)													Charge passed (Q _x)	Charge passed (coulombs)	Avg. Charge passed (coulombs)
		Dia. (cm.)	Thick (cm.)	Area (cm. ²)	Volume (cm. ³)	I ₀	I ₃₀	I ₆₀	I ₉₀	I ₁₂₀	I ₁₅₀	I ₁₈₀	I ₂₁₀	I ₂₄₀	I ₂₇₀	I ₃₀₀	I ₃₃₀	I ₃₆₀			
28	1	10.10	5.00	80.12	400.59	179	204	214	232	248	269	278	294	318	335	347	394	427	6185	5472	6144
	2	10.04	5.02	79.17	397.43	197	249	265	289	312	339	346	372	401	420	436	451	502	7613	6816	
90	1	9.97	5.00	78.07	390.35	176	195	219	244	251	270	286	295	308	317	323	329	331	5923	5378	5526
	2	10.00	5.01	78.54	393.48	184	206	224	249	274	289	302	316	324	337	344	352	367	6287	5674	

ตารางที่ ง.3 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต RCR20

Age (Day)	Sample	Properties				Current at t minutes (mA)													Charge passed (Q _x)	Charge passed (coulombs)	Avg. Charge passed (coulombs)
		Dia. (cm.)	Thick (cm.)	Area (cm. ²)	Volume (cm. ³)	I ₀	I ₃₀	I ₆₀	I ₉₀	I ₁₂₀	I ₁₅₀	I ₁₈₀	I ₂₁₀	I ₂₄₀	I ₂₇₀	I ₃₀₀	I ₃₃₀	I ₃₆₀			
28	1	10.00	5.10	78.54	400.55	74	81	88	93	99	102	105	110	112	116	118	120	122	2236	2018	1914
	2	10.00	5.05	78.54	396.63	69	75	78	84	89	92	94	99	101	104	104	106	107	2005	1810	
90	1	10.00	4.98	78.54	391.13	60	62	64	66	68	69	69	70	70	71	71	72	73	1473	1330	1355
	2	10.05	5.05	79.33	400.60	61	63	65	66	68	70	72	75	76	77	77	79	80	1545	1380	

ตารางที่ ง.4 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต RCR35

Age (Day)	Sample	Properties				Current at t minutes (mA)													Charge passed (Q _x)	Charge passed (coulombs)	Avg. Charge passed (coulombs)
		Dia. (cm.)	Thick (cm.)	Area (cm. ²)	Volume (cm. ³)	I ₀	I ₃₀	I ₆₀	I ₉₀	I ₁₂₀	I ₁₅₀	I ₁₈₀	I ₂₁₀	I ₂₄₀	I ₂₇₀	I ₃₀₀	I ₃₃₀	I ₃₆₀			
28	1	10.03	5.03	79.01	397.43	49	51	53	53	54	57	59	59	61	61	62	62	64	1239	1112	1053
	2	10.00	5.05	78.54	396.63	43	44	47	48	49	50	52	52	54	55	55	56	56	1161	993	
90	1	10.01	5.02	78.70	395.06	32	33	33	34	35	35	36	36	36	36	37	37	37	761	685	708
	2	10.05	5.04	79.33	399.81	35	36	37	38	38	38	38	38	38	39	39	39	39	819	732	

ตารางที่ ๔.5 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต RCR50

Age (Day)	Sample	Properties				Current at t minutes (mA)													Charge passed (Q _x)	Charge passed (coulombs)	Avg. Charge passed (coulombs)
		Dia. (cm.)	Thick (cm.)	Area (cm. ²)	Volume (cm. ³)	I ₀	I ₃₀	I ₆₀	I ₉₀	I ₁₂₀	I ₁₅₀	I ₁₈₀	I ₂₁₀	I ₂₄₀	I ₂₇₀	I ₃₀₀	I ₃₃₀	I ₃₆₀			
28	1	10.00	5.06	78.54	397.41	28	29	30	31	32	32	33	33	33	34	34	34	35	696	628	610
	2	10.02	5.11	78.85	402.95	27	28	29	29	30	31	31	32	31	31	32	32	32	658	591	
90	1	10.10	4.97	80.12	398.19	15	16	16	17	17	17	18	18	18	18	18	19	19	376	333	347
	2	9.99	4.91	78.38	384.86	16	17	17	18	18	18	19	19	19	19	20	20	20	399	361	

ตารางที่ ๔.6 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต RCF

Age (Day)	Sample	Properties				Current at t minutes (mA)													Charge passed (Q _x)	Charge passed (coulombs)	Avg. Charge passed (coulombs)
		Dia. (cm.)	Thick (cm.)	Area (cm. ²)	Volume (cm. ³)	I ₀	I ₃₀	I ₆₀	I ₉₀	I ₁₂₀	I ₁₅₀	I ₁₈₀	I ₂₁₀	I ₂₄₀	I ₂₇₀	I ₃₀₀	I ₃₃₀	I ₃₆₀			
28	1	10.00	5.01	78.54	393.48	260	312	350	391	426	455	491	540	583	618	642	674	699	10730	9684	9864
	2	10.01	4.97	78.70	391.12	260	324	372	401	432	484	531	579	607	638	655	686	713	11152	10044	
90	1	10.00	4.95	78.54	388.77	257	271	294	333	364	406	449	476	523	544	562	584	605	9426	8508	8863
	2	10.02	4.98	78.85	392.69	258	299	335	383	427	465	493	514	547	569	595	622	639	10255	9219	

ตารางที่ ง.7 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต RCFR20

Age (Day)	Sample	Properties				Current at t minutes (mA)													Charge passed (Q _x)	Charge passed (coulombs)	Avg. Charge passed (coulombs)
		Dia. (cm.)	Thick (cm.)	Area (cm. ²)	Volume (cm. ³)	I ₀	I ₃₀	I ₆₀	I ₉₀	I ₁₂₀	I ₁₅₀	I ₁₈₀	I ₂₁₀	I ₂₄₀	I ₂₇₀	I ₃₀₀	I ₃₃₀	I ₃₆₀			
28	1	10.01	5.02	78.70	395.06	108	114	119	128	131	137	140	145	151	156	160	167	171	3037	2736	2743
	2	10.00	5.10	78.54	400.55	104	115	121	130	134	139	142	146	151	156	158	165	169	3048	2751	
90	1	9.92	5.02	77.29	387.99	74	81	87	91	94	98	101	104	109	112	114	117	120	2169	1989	1919
	2	10.02	4.91	78.85	387.17	73	78	84	88	92	95	96	99	102	104	106	107	110	2056	1849	

ตารางที่ ง.8 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต RCFR35

Age (Day)	Sample	Properties				Current at t minutes (mA)													Charge passed (Q _x)	Charge passed (coulombs)	Avg. Charge passed (coulombs)
		Dia. (cm.)	Thick (cm.)	Area (cm. ²)	Volume (cm. ³)	I ₀	I ₃₀	I ₆₀	I ₉₀	I ₁₂₀	I ₁₅₀	I ₁₈₀	I ₂₁₀	I ₂₄₀	I ₂₇₀	I ₃₀₀	I ₃₃₀	I ₃₆₀			
28	1	10.01	5.03	78.70	395.85	40	43	47	49	51	53	54	55	57	58	60	60	61	1148	1034	1070
	2	10.02	5.01	78.85	395.06	42	46	50	51	54	56	58	59	62	63	64	66	67	1230	1106	
90	1	10.04	5.05	79.17	399.81	34	36	38	40	41	42	43	44	44	45	46	46	47	910	815	831
	2	9.95	4.96	77.76	385.67	36	39	41	42	42	43	43	43	44	45	46	47	48	931	848	

ตารางที่ ง.9 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต RCFR50

Age (Day)	Sample	Properties				Current at t minutes (mA)													Charge passed (Q _x)	Charge passed (coulombs)	Avg. Charge passed (coulombs)
		Dia. (cm.)	Thick (cm.)	Area (cm. ²)	Volume (cm. ³)	I ₀	I ₃₀	I ₆₀	I ₉₀	I ₁₂₀	I ₁₅₀	I ₁₈₀	I ₂₁₀	I ₂₄₀	I ₂₇₀	I ₃₀₀	I ₃₃₀	I ₃₆₀			
28	1	10.01	5.10	78.70	401.35	31	32	34	35	36	38	39	40	41	42	43	44	45	832	749	831
	2	10.01	5.03	78.70	395.85	35	37	40	41	43	45	47	49	50	52	54	58	59	1013	913	
90	1	9.98	5.06	78.23	395.82	19	20	20	21	21	21	21	21	22	22	22	22	22	456	413	426
	2	9.97	4.95	78.07	386.44	21	21	22	22	22	22	22	23	23	23	23	23	23	482	438	

ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

ตารางที่ จ.1 ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต CT

Age (Days)	Sample	Average value of the penetration depths (mm)										
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	Average (X)	Average
90	1	18	18	17	17	17	18	17	17	17	17.3	17.6
	2	19	19	18	18	18	17	17	17	18	17.9	
180	1	22	22	24	22	23	22	24	23	23	22.8	22.9
	2	23	23	24	22	23	23	23	24	23	23.1	

ตารางที่ จ.2 ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต RC

Age (Days)	Sample	Average value of the penetration depths (mm)										
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	Average (X)	Average
90	1	24	24	24	25	23	24	25	23	24	24.0	23.8
	2	22	24	25	22	22	24	24	25	24	23.6	
180	1	35	34	35	34	34	34	33	34	34	34.1	34.3
	2	34	33	35	34	35	35	34	35	35	34.4	

ตารางที่ จ.3 ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต RCR20

Age (Days)	Sample	Average value of the penetration depths (mm)										
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	Average (X)	Average
90	1	15	14	14	15	15	14	14	14	14	14.3	13.9
	2	13	14	13	13	14	14	13	13	14	13.4	
180	1	16	17	17	18	19	17	16	17	17	17.1	17.8
	2	18	19	20	18	19	18	18	19	18	18.6	

ตารางที่ จ.4 ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต RCR35

Age (Days)	Sample	Average value of the penetration depths (mm)										
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	Average (X)	Average
90	1	11	12	10	11	11	10	11	11	10	10.8	10.4
	2	10	10	9	10	9	11	11	10	10	10.0	
180	1	12	12	13	14	12	13	13	13	12	12.7	12.8
	2	13	12	13	13	12	13	13	13	14	12.9	

ตารางที่ จ.5 ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต RCR50

Age (Days)	Sample	Average value of the penetration depths (mm)										
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	Average (X)	Average
90	1	7	7	7	6	6	7	7	7	6	6.7	6.4
	2	6	5	6	6	7	7	5	6	7	6.1	
180	1	9	9	9	10	9	9	8	9	9	9.0	9.6
	2	10	11	10	10	10	10	11	10	10	10.2	

ตารางที่ จ.6 ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต RCF

Age (Days)	Sample	Average value of the penetration depths (mm)										
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	Average (X)	Average
90	1	26	25	26	27	28	28	27	29	29	27.2	27.5
	2	27	28	27	27	27	28	29	29	28	27.8	
180	1	40	39	40	40	42	43	43	41	42	41.1	41.8
	2	41	43	44	42	41	43	43	43	42	42.4	

ตารางที่ จ.7 ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต RCFR20

Age (Days)	Sample	Average value of the penetration depths (mm)										
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	Average (X)	Average
90	1	15	15	16	16	16	14	14	15	15	15.1	15.5
	2	16	15	16	15	16	17	16	16	16	15.9	
180	1	19	19	20	20	20	21	21	20	20	20.0	21.1
	2	23	22	23	21	22	23	22	22	22	22.2	

ตารางที่ จ.8 ผลการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต RCFR35

Age (Days)	Sample	Average value of the penetration depths (mm)										
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	Average (X)	Average
90	1	12	12	14	13	14	13	12	12	12	12.7	12.1
	2	12	12	12	11	12	11	12	11	11	11.6	
180	1	16	15	16	16	15	16	15	15	15	15.4	14.9
	2	13	14	14	15	15	15	14	14	15	14.3	

ตารางที่ จ.9 ผลการทดสอบระยะการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต RCFR50

Age (Days)	Sample	Average value of the penetration depths (mm)										
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	Average (X)	Average
90	1	10	9	9	10	9	9	8	8	8	8.9	8.7
	2	9	9	9	9	8	8	9	8	8	8.6	
180	1	12	11	12	13	12	13	12	12	12	12.1	12.2
	2	13	13	12	12	12	11	12	13	13	12.3	

ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต

ตารางที่ น.1 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต CT

Current at minutes (mA)	28 Day			90 Day		
	Sample 1	Sample 2	Average	Sample 1	Sample 2	Average
I0	61	69	65	58	59	58.5
I6	53	60	56.5	55	56	55.5
I12	50	57	53.5	52	49	50.5
I18	50	55	52.5	49	45	47
I24	44	49	46.5	48	44	46
I30	42	47	44.5	48	43	45.5
I36	44	48	46	46	41	43.5
I42	44	49	46.5	45	40	42.5
I48	43	47	45	45	39	42
I54	44	47	45.5	44	39	41.5
I60	44	47	45.5	44	39	41.5
I66	43	45	44	40	35	37.5
I72	41	42	41.5	39	35	37
I78	40	41	40.5	39	35	37
I84	43	44	43.5	40	38	39
I90	41	42	41.5	40	38	39
I96	39	42	40.5	39	35	37
I102	39	41	40	38	35	36.5
I108	39	42	40.5	38	36	37
I114	42	44	43	37	36	36.5
I120	39	41	40	37	34	35.5
I126	39	41	40	37	34	35.5
I132	40	42	41	35	35	35
I138	39	40	39.5	35	34	34.5
I144	37	38	37.5	34	33	33.5
I150	37	37	37	33	33	33
I156	38	39	38.5	33	33	33
I162	37	38	37.5	33	33	33
I168	37	38	37.5	33	33	33

ตารางที่ น.2 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต RC

Current at minutes (mA)	28 Day			90 Day		
	Sample 1	Sample 2	Average	Sample 1	Sample 2	Average
I0	102	105	103.5	97	92	94.5
I6	96	93	94.5	90	85	87.5
I12	85	86	85.5	84	81	82.5
I18	82	84	83	79	73	76
I24	83	84	83.5	79	72	75.5
I30	82	82	82	80	71	75.5
I36	78	78	78	79	68	73.5
I42	78	79	78.5	72	71	71.5
I48	76	78	77	74	67	70.5
I54	75	77	76	72	67	69.5
I60	76	77	76.5	71	66	68.5
I66	74	76	75	69	66	67.5
I72	71	72	71.5	72	66	69
I78	71	71	71	71	65	68
I84	71	72	71.5	71	65	68
I90	70	72	71	72	64	68
I96	69	70	69.5	71	63	67
I102	71	73	72	72	64	68
I108	72	73	72.5	73	64	68.5
I114	73	73	73	73	65	69
I120	73	75	74	73	64	68.5
I126	75	76	75.5	75	70	72.5
I132	79	81	80	77	74	75.5
I138	80	83	81.5	77	75	76
I144	83	87	85	78	76	77
I150	86	88	87	83	79	81
I156	89	90	89.5	86	82	84
I162	92	93	92.5	92	85	88.5
I168	95	97	96	96	88	92

ตารางที่ น.3 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต RCR20

Current at minutes (mA)	28 Day			90 Day		
	Sample 1	Sample 2	Average	Sample 1	Sample 2	Average
I0	44	41	42.5	24	25	24.5
I6	41	40	40.5	21	23	22
I12	38	37	37.5	20	23	21.5
I18	37	37	37	20	23	21.5
I24	37	37	37	20	23	21.5
I30	37	37	37	20	23	21.5
I36	35	35	35	20	22	21
I42	36	36	36	19	22	20.5
I48	36	36	36	19	21	20
I54	35	36	35.5	19	21	20
I60	35	35	35	19	21	20
I66	35	35	35	19	20	19.5
I72	34	35	34.5	19	21	20
I78	34	34	34	18	20	19
I84	34	34	34	18	21	19.5
I90	34	35	34.5	19	21	20
I96	34	34	34	18	21	19.5
I102	33	33	33	19	21	20
I108	32	33	32.5	19	21	20
I114	32	33	32.5	19	21	20
I120	31	31	31	19	21	20
I126	34	32	33	19	21	20
I132	34	32	33	19	21	20
I138	34	32	33	19	21	20
I144	33	30	31.5	19	21	20
I150	31	30	30.5	19	21	20
I156	33	30	31.5	19	21	20
I162	30	29	29.5	19	21	20
I168	33	31	32	19	21	20

ตารางที่ น.4 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต RCR35

Current at minutes (mA)	28 Day			90 Day		
	Sample 1	Sample 2	Average	Sample 1	Sample 2	Average
I0	23	24	23.5	15	16	15.5
I6	21	23	22	14	16	15
I12	20	22	21	14	15	14.5
I18	19	21	20	14	15	14.5
I24	20	21	20.5	14	15	14.5
I30	20	20	20	14	14	14
I36	19	19	19	14	14	14
I42	19	19	19	13	13	13
I48	19	19	19	13	13	13
I54	19	19	19	13	13	13
I60	18	19	18.5	13	13	13
I66	18	19	18.5	13	13	13
I72	18	19	18.5	13	13	13
I78	18	18	18	13	13	13
I84	18	18	18	13	13	13
I90	18	18	18	13	13	13
I96	18	18	18	13	14	13.5
I102	18	18	18	13	14	13.5
I108	17	17	17	13	14	13.5
I114	17	17	17	13	14	13.5
I120	17	17	17	13	14	13.5
I126	17	17	17	13	14	13.5
I132	17	17	17	13	13	13
I138	16	17	16.5	13	13	13
I144	16	16	16	13	13	13
I150	16	16	16	13	13	13
I156	16	16	16	13	13	13
I162	16	16	16	13	13	13
I168	16	16	16	13	13	13

ตารางที่ น.5 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต RCR50

Current at minutes (mA)	28 Day			90 Day		
	Sample 1	Sample 2	Average	Sample 1	Sample 2	Average
I0	15	13	14	6	7	6.5
I6	13	12	12.5	6	7	6.5
I12	13	12	12.5	6	7	6.5
I18	12	11	11.5	6	7	6.5
I24	12	11	11.5	6	6	6
I30	13	11	12	6	7	6.5
I36	13	11	12	5	7	6
I42	12	11	11.5	5	7	6
I48	12	10	11	5	7	6
I54	12	11	11.5	5	6	5.5
I60	12	11	11.5	5	6	5.5
I66	12	11	11.5	5	6	5.5
I72	12	10	11	5	6	5.5
I78	12	10	11	5	6	5.5
I84	12	10	11	5	6	5.5
I90	11	10	10.5	5	6	5.5
I96	11	10	10.5	5	6	5.5
I102	11	10	10.5	5	6	5.5
I108	11	10	10.5	5	6	5.5
I114	11	10	10.5	5	6	5.5
I120	10	9	9.5	5	6	5.5
I126	10	9	9.5	5	6	5.5
I132	10	9	9.5	5	6	5.5
I138	10	9	9.5	5	6	5.5
I144	10	9	9.5	5	6	5.5
I150	10	9	9.5	5	6	5.5
I156	10	9	9.5	5	6	5.5
I162	10	9	9.5	5	6	5.5
I168	10	9	9.5	5	6	5.5

ตารางที่ น.6 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต RCF

Current at minutes (mA)	28 Day			90 Day		
	Sample 1	Sample 2	Average	Sample 1	Sample 2	Average
I0	118	119	118.5	104	116	110
I6	107	115	111	86	112	99
I12	104	114	109	82	105	93.5
I18	98	109	103.5	83	103	93
I24	93	105	99	83	102	92.5
I30	93	105	99	82	100	91
I36	95	106	100.5	80	99	89.5
I42	95	105	100	81	98	89.5
I48	90	100	95	82	98	90
I54	91	99	95	81	95	88
I60	91	96	93.5	79	93	86
I66	86	95	90.5	79	92	85.5
I72	84	92	88	78	93	85.5
I78	92	95	93.5	77	95	86
I84	94	97	95.5	78	96	87
I90	94	94	94	77	102	89.5
I96	93	94	93.5	78	114	96
I102	111	105	108	82	119	100.5
I108	111	106	108.5	81	132	106.5
I114	111	106	108.5	81	136	108.5
I120	111	108	109.5	82	142	112
I126	121	117	119	80	145	112.5
I132	124	122	123	84	148	116
I138	126	122	124	89	149	119
I144	127	121	124	93	150	121.5
I150	144	121	132.5	98	145	121.5
I156	140	123	131.5	103	148	125.5
I162	149	122	135.5	104	148	126
I168	151	124	137.5	106	149	127.5

ตารางที่ น.7 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต RCFR20

Current at minutes (mA)	28 Day			90 Day		
	Sample 1	Sample 2	Average	Sample 1	Sample 2	Average
I0	49	53	51	32	28	30
I6	47	50	48.5	30	26	28
I12	45	48	46.5	29	26	27.5
I18	44	46	45	29	26	27.5
I24	41	45	43	29	26	27.5
I30	42	44	43	29	26	27.5
I36	42	47	44.5	28	26	27
I42	43	47	45	28	26	27
I48	40	47	43.5	28	26	27
I54	40	45	42.5	27	26	26.5
I60	42	46	44	25	25	25
I66	42	47	44.5	27	25	26
I72	41	45	43	27	25	26
I78	39	43	41	26	25	25.5
I84	40	44	42	26	24	25
I90	40	44	42	26	23	24.5
I96	42	44	43	26	24	25
I102	41	45	43	26	24	25
I108	42	44	43	26	24	25
I114	42	45	43.5	26	24	25
I120	41	45	43	26	24	25
I126	42	45	43.5	26	24	25
I132	46	51	48.5	26	24	25
I138	48	52	50	25	23	24
I144	49	54	51.5	25	23	24
I150	51	54	52.5	25	23	24
I156	60	59	59.5	25	22	23.5
I162	60	59	59.5	25	23	24
I168	65	61	63	25	23	24

ตารางที่ น.8 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต RCFR35

Current at minutes (mA)	28 Day			90 Day		
	Sample 1	Sample 2	Average	Sample 1	Sample 2	Average
I0	25	26	25.5	18	19	18.5
I6	22	24	23	16	17	16.5
I12	22	25	23.5	15	16	15.5
I18	21	24	22.5	14	15	14.5
I24	21	24	22.5	14	15	14.5
I30	21	25	23	14	15	14.5
I36	21	23	22	14	16	15
I42	19	22	20.5	14	15	14.5
I48	19	22	20.5	14	16	15
I54	21	23	22	14	16	15
I60	20	22	21	14	17	15.5
I66	18	21	19.5	14	16	15
I72	18	21	19.5	13	16	14.5
I78	19	22	20.5	13	16	14.5
I84	20	23	21.5	15	17	16
I90	19	22	20.5	15	17	16
I96	20	23	21.5	14	16	15
I102	19	22	20.5	14	16	15
I108	19	22	20.5	14	16	15
I114	18	21	19.5	14	16	15
I120	18	20	19	14	16	15
I126	19	22	20.5	14	17	15.5
I132	19	21	20	13	17	15
I138	19	17	18	14	16	15
I144	17	19	18	14	16	15
I150	18	21	19.5	14	15	14.5
I156	19	21	20	14	16	15
I162	17	19	18	14	16	15
I168	17	19	18	14	16	15

ตารางที่ น.9 ผลการทดสอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต RCFR50

Current at minutes (mA)	28 Day			90 Day		
	Sample 1	Sample 2	Average	Sample 1	Sample 2	Average
I0	18	17	17.5	9	8	8.5
I6	15	14	14.5	8	7	7.5
I12	14	13	13.5	8	6	7
I18	15	13	14	7	6	6.5
I24	15	13	14	7	6	6.5
I30	15	13	14	7	6	6.5
I36	15	14	14.5	7	6	6.5
I42	15	14	14.5	7	5	6
I48	14	13	13.5	7	5	6
I54	14	13	13.5	7	5	6
I60	15	14	14.5	7	6	6.5
I66	15	14	14.5	7	5	6
I72	14	13	13.5	7	5	6
I78	13	12	12.5	7	5	6
I84	14	13	13.5	7	6	6.5
I90	14	13	13.5	7	6	6.5
I96	14	13	13.5	7	6	6.5
I102	14	13	13.5	7	6	6.5
I108	14	13	13.5	7	6	6.5
I114	14	13	13.5	7	5	6
I120	13	12	12.5	7	5	6
I126	13	11	12	7	5	6
I132	13	12	12.5	7	5	6
I138	13	12	12.5	7	5	6
I144	12	11	11.5	7	5	6
I150	12	11	11.5	7	5	6
I156	13	11	12	7	5	6
I162	13	11	12	7	5	6
I168	11	10	10.5	7	5	6

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบพื้นที่การเกิดสนิมของเหล็ก

ตารางที่ ข.1 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต CT

Age (days)	Sample	Length (mm)	Area (mm ²)	Rusted Area		Average	
				(mm ²)	(%)	(mm ²)	(%)
28	1	151	5693	3516	61.765	3693.5	65
	2	150	5655	3871	68.454		
90	1	150	5655	3108	54.962	3086.0	55
	2	150	5655	3064	54.183		

ตารางที่ ข.2 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต RC

Age (days)	Sample	Length (mm)	Area (mm ²)	Rusted Area		Average	
				(mm ²)	(%)	(mm ²)	(%)
28	1	148	5579	5412	96.998	5457.0	97
	2	149	5617	5502	97.950		
90	1	148	5579	5024	90.044	5085.0	91
	2	148	5579	5146	92.231		

ตารางที่ ข.3 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต RCR20

Age (days)	Sample	Length (mm)	Area (mm ²)	Rusted Area		Average	
				(mm ²)	(%)	(mm ²)	(%)
28	1	152	5730	3412	59.543	3568.0	62
	2	151	5693	3724	65.419		
90	1	151	5693	2314	40.650	2432.5	43
	2	150	5655	2551	45.112		

ตารางที่ ข.4 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต RCR35

Age (days)	Sample	Length (mm)	Area (mm ²)	Rusted Area		Average	
				(mm ²)	(%)	(mm ²)	(%)
28	1	149	5617	2358	41.978	2286.0	41
	2	150	5655	2214	39.152		
90	1	149	5617	2103	37.439	2028.5	36
	2	149	5617	1954	34.786		

ตารางที่ ข.5 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต RCR50

Age (days)	Sample	Length (mm)	Area (mm ²)	Rusted Area		Average	
				(mm ²)	(%)	(mm ²)	(%)
28	1	150	5655	1901	33.617	1867.5	33
	2	148	5579	1834	32.871		
90	1	149	5617	1662	29.588	1727.0	31
	2	150	5655	1792	31.690		

ตารางที่ ข.6 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต RCF

Age (days)	Sample	Length (mm)	Area (mm ²)	Rusted Area		Average	
				(mm ²)	(%)	(mm ²)	(%)
28	1	149	5617	5597	99.641	5587.5	99
	2	150	5655	5578	98.641		
90	1	148	5579	5401	96.801	5480.5	98
	2	149	5617	5560	98.982		

ตารางที่ ข.7 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต RCFR20

Age (days)	Sample	Length (mm)	Area (mm ²)	Rusted Area		Average	
				(mm ²)	(%)	(mm ²)	(%)
28	1	150	5655	4558	80.603	4709.5	84
	2	148	5579	4861	87.123		
90	1	149	5617	2667	47.479	2724.0	48
	2	149	5617	2781	49.509		

ตารางที่ ข.8 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต RCFR35

Age (days)	Sample	Length (mm)	Area (mm ²)	Rusted Area		Average	
				(mm ²)	(%)	(mm ²)	(%)
28	1	150	5655	3564	63.025	3487.5	62
	2	150	5655	3411	60.320		
90	1	152	5730	2521	43.994	2395.5	42
	2	150	5655	2270	40.142		

ตารางที่ ข.9 พื้นที่การเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต RCFR50

Age (days)	Sample	Length (mm)	Area (mm ²)	Rusted Area		Average	
				(mm ²)	(%)	(mm ²)	(%)
28	1	149	5617	2589	46.091	2711.5	48
	2	151	5693	2834	49.784		
90	1	149	5617	1876	33.398	1946.0	35
	2	149	5617	2016	35.890		

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบการสูญเสีย^๗น้ำหนักของเหล็ก

ตารางที่ ข.1 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในคอนกรีต CT

Age (days)	Sample	Length (mm)	Weight Before tests (g)	Weight After tests (g)	Weight Loss		Average	
					(g)	(%)	(g)	(%)
28	1	151	134.060	131.50	2.562	1.911	2.517	1.884
	2	150	133.172	130.70	2.473	1.857		
90	1	150	133.172	131.29	1.884	1.415	2.081	1.563
	2	150	133.172	130.89	2.279	1.711		

ตารางที่ ข.2 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในคอนกรีต RC

Age (days)	Sample	Length (mm)	Weight Before tests (g)	Weight After tests (g)	Weight Loss		Average	
					(g)	(%)	(g)	(%)
28	1	148	131.396	123.70	7.701	5.861	8.492	6.440
	2	149	132.284	123.00	9.284	7.018		
90	1	148	131.396	124.00	7.400	5.632	7.850	5.974
	2	148	131.396	123.10	8.299	6.316		

ตารางที่ ข.3 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในคอนกรีต RCR20

Age (days)	Sample	Length (mm)	Weight Before tests (g)	Weight After tests (g)	Weight Loss		Average	
					(g)	(%)	(g)	(%)
28	1	152	134.948	132.68	2.266	1.679	2.358	1.753
	2	151	134.060	131.61	2.449	1.827		
90	1	151	134.060	132.30	1.758	1.311	1.621	1.213
	2	150	133.172	131.69	1.484	1.114		

ตารางที่ ข.4 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในคอนกรีต RCR35

Age (days)	Sample	Length (mm)	Weight Before tests (g)	Weight After tests (g)	Weight Loss		Average	
					(g)	(%)	(g)	(%)
28	1	149	132.284	130.90	1.386	1.048	1.675	1.262
	2	150	133.172	131.21	1.964	1.475		
90	1	149	132.284	131.09	1.196	0.904	1.386	1.048
	2	149	132.284	130.71	1.576	1.191		

ตารางที่ ข.5 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในคอนกรีต RCR50

Age (days)	Sample	Length (mm)	Weight Before tests (g)	Weight After tests (g)	Weight Loss		Average	
					(g)	(%)	(g)	(%)
28	1	150	133.172	131.21	1.573	1.181	1.415	1.069
	2	148	131.396	130.14	1.257	0.957		
90	1	149	132.284	131.40	0.889	0.672	1.028	0.774
	2	150	133.172	132.01	1.167	0.876		

ตารางที่ ข.6 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในคอนกรีต RCF

Age (days)	Sample	Length (mm)	Weight Before tests (g)	Weight After tests (g)	Weight Loss		Average	
					(g)	(%)	(g)	(%)
28	1	149	132.284	123.10	9.183	6.942	10.680	8.043
	2	150	133.172	120.99	12.177	9.144		
90	1	148	131.396	121.42	9.994	7.606	10.137	7.689
	2	149	132.284	122.01	10.280	7.771		

ตารางที่ ข.7 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในคอนกรีต RCFR20

Age (days)	Sample	Length (mm)	Weight Before tests (g)	Weight After tests (g)	Weight Loss		Average	
					(g)	(%)	(g)	(%)
28	1	150	133.172	126.60	6.572	4.935	5.832	4.405
	2	148	131.396	126.31	5.092	3.875		
90	1	149	132.284	130.81	1.486	1.123	1.833	1.386
	2	149	132.284	130.11	2.181	1.648		

ตารางที่ ข.8 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในคอนกรีต RCFR35

Age (days)	Sample	Length (mm)	Weight Before tests (g)	Weight After tests (g)	Weight Loss		Average	
					(g)	(%)	(g)	(%)
28	1	150	133.172	131.51	1.673	1.256	1.974	1.482
	2	150	133.172	130.90	2.275	1.708		
90	1	152	134.948	133.51	1.445	1.071	1.560	1.164
	2	150	133.172	131.50	1.674	1.257		

ตารางที่ ข.9 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในคอนกรีต RCFR50

Age (days)	Sample	Length (mm)	Weight Before tests (g)	Weight After tests (g)	Weight Loss		Average	
					(g)	(%)	(g)	(%)
28	1	149	132.284	130.72	1.582	1.196	1.522	1.144
	2	151	134.060	132.61	1.463	1.091		
90	1	149	132.284	131.09	1.193	0.902	1.335	1.009
	2	149	132.284	130.81	1.476	1.116		

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – นามสกุล	นายประจักษ์ ทุลกสิกร
วัน เดือน ปีเกิด	10 กรกฎาคม 2532
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	ประโยคมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนองครักษ์ พ.ศ. 2550
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2554
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2557
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	ประจักษ์ ทุลกสิกร , วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล , 2557, “การใช้ถ้ำเกลบบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัดและความ ต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวม ละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ”, การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19, 14-16 พฤษภาคม 2557, โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออคิด จ.ขอนแก่น, หน้า 624-629