

STRENGTH AND CHLORIDE RESISTANCE OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE CONTAINING GROUND RICE HUSK ASH

ประจักษ์ พูลกลีกร¹, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร², ชัย จาตุรพิทักษ์กุล^{3*}

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³ ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ARTICLE INFO:

Received: January 5, 2014

Received Revised Form: February 15, 2014

Accepted: April 30, 2014

ABSTRACT :

The aim of this study is to investigate the utilization of rice husk ash, a by-product from thermal power plant, as a cement replacement for 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 $5\pm 1\%$ by weight. Portland cement type I was replaced by ground rice husk ash at the rates of 20, 35, and 50% by weight of binder to cast concrete specimens. 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. Compressive strengths of the concretes were determined at 7, 28, 60, and 90 days. Rapid permeability of chloride of concrete was determined at 28 and 90 days and chloride penetration depth of concrete was also investigated at 90 and 180 days. The results revealed that the recycled aggregate concretes with and without ground rice husk ash had compressive strength lower than that of conventional concrete. However, the use of ground rice husk ash at 20% by weight of binder in recycled aggregate concrete gave higher compressive strength than the one without ground rice husk ash at 60 days. In addition, the use of 20 to 50% of ground rice husk ash in recycled aggregate concrete could increase chloride resistance of the recycled aggregate concrete.

*Corresponding Author,
Email address: chai.jat@kmutt.ac.th

KEYWORDS: Chloride Resistance, Recycled Concrete Aggregate, Rice Husk Ash

1. บทนำ

การรื้อถอนหรือทำลายสิ่งปลูกสร้างเดิมเพื่อสร้างสิ่งปลูกสร้างใหม่ และการตัดหัวเสาเข็มทิ้ง ทำให้เหลือเศษคอนกรีตเป็นจำนวนมาก หากไม่มีการกำจัดที่ดีย่อมมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แม้ว่าเศษคอนกรีตเหล่านี้จะมีบางส่วนที่นำไปใช้ถมที่หรือชั้นรองพื้นทางในถนน แต่เป็นปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับปริมาณที่มีทั้งหมด จึงทำให้ส่วนที่เหลือต้องนำไปทิ้งโดยไม่มีประโยชน์ต้องจัดหาพื้นที่ในการทิ้ง และเสียค่าขนส่งไปยังสถานที่จัดทิ้ง ถ้าสามารถนำเศษ

คอนกรีตเหล่านี้มาใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีตได้ จะเป็นการใช้ประโยชน์ที่คุ้มค่าจากเศษคอนกรีต และยังสามารถลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติได้

ปัจจุบันมีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาการนำเศษคอนกรีตมาย่อยเพื่อนำกลับมาใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีต และพบว่าเศษคอนกรีตเหล่านี้สามารถนำกลับมาใช้เป็นมวลรวมได้ [1-4] อย่างไรก็ตามการนำมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมาใช้งานมวลรวมธรรมชาติยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ทำให้

ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตลดลง การดูดซึมน้ำที่สูงของมวลรวมทำให้คอนกรีตสูญเสียค่ายุบตัวอย่างรวดเร็ว กำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตปกติ ตลอดจนมีความทนทานของคอนกรีตต่ำลง [5-7]

ถ้ากลายเป็นวัสดุที่มีการวิจัยมาอย่างยาวนาน และพบว่าถ้าเราสามารถช่วยปรับปรุงกำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตให้ดีขึ้นได้ [8-9] ซึ่งถ้ากลายเป็นผลพลอยได้จากการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงในการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ใน พ.ศ. 2556 ประเทศไทยผลิตข้าวเปลือกประมาณ 20.5 ล้านตัน [10] หลังจากการสีข้าวเปลือกเหลือเป็นแกลบร้อยละ 20 ของน้ำหนักข้าวเปลือกหรือแกลบประมาณ 4.1 ล้านตัน/ปี และเมื่อนำแกลบไปเผาจะเหลือแกลบร้อยละ 4 ของน้ำหนักข้าวเปลือก [11] หรือประมาณ 820,000 ตัน/ปี และถ้าแกลบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในอนาคต ซึ่งการใช้ประโยชน์จากแกลบเหล่านี้ยังถือว่าน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณที่มีทั้งหมด ทำให้ต้องนำแกลบไปกำจัดทิ้ง ก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมตามมา

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการนำแกลบมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านการรับกำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์ ซึ่งผลที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตต่อไป

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษากำลังอัดและความสามารถในการต้านทานคลอไรด์จากการใช้แกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

3. วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, แกลบจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า จังหวัดสุพรรณบุรีโดยนำแกลบมาบดจนมีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 5 ± 1 โดยน้ำหนัก, หินปูนย่อยขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 19 มม., ทรายธรรมชาติ, มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตโดยได้มาจากการนำเศษคอนกรีตไปย่อยด้วยเครื่องย่อย จากนั้นทำการแยก

ขนาดเป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดด้วยตะแกรงเบอร์ 4 และสารลดน้ำพิเศษ Type F polycarboxylate ether base

3.2 ส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1 งานวิจัยนี้ได้กำหนดปริมาณวัสดุประสานของส่วนผสมคอนกรีตควบคุม (CT) เท่ากับ 400 กก/ม³ สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติ (RC) แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35, และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (คือคอนกรีต RCR20, RCR35 และ RCR50 ตามลำดับ) และคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต (RCF) แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (คือคอนกรีต RCFR20, RCFR35 และ RCFR50 ตามลำดับ) ใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 10-15 ซม

งานวิจัยนี้ผสมคอนกรีตโดยวิธี Two-stage mixing approach [12] วิธีดังกล่าวสามารถปรับปรุงผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมกับมอร์ตาร์ที่ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต โดยซีเมนต์เพสต์ที่เหลวข้นจะเข้าไปแทรกรอยร้าวและช่องว่างเพื่ออุดรอยร้าว และช่องว่างของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตให้มีความแน่นมากขึ้น โดยการผสม แบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนหนึ่งคือนำมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมาผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลา 60 วินาที จากนั้นทำการเติมน้ำครึ่งหนึ่งของปริมาณน้ำทั้งหมดที่ต้องการและผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 60 วินาที หลังจากนั้นใส่วัสดุประสานผสมให้เข้ากันต่ออีกเป็นเวลา 30 วินาที และขั้นตอนที่สองนำน้ำที่เหลืออีกครั้งเติมเข้าไปและผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 120 วินาที จะได้คอนกรีตสดเพื่อนำไปหล่อตัวอย่างคอนกรีตและนำตัวอย่างไปทำการทดสอบต่างๆ

3.3 การทดสอบกำลังอัด

ทำการทดสอบกำลังอัดโดยใช้คอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ภายหลังการหล่อ 24 ชั่วโมงจึงถอดแบบออก นำตัวอย่างคอนกรีตบ่มในน้ำประปา จากนั้นทดสอบกำลังอัดคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39 [13] ที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

Sample	Mix Proportion (kg/m ³)									W/B	Slump (cm)
	Cem.	RHA	Crushed Limestone	Sand	RFA	RCA	Mixing Water	Effective Water	SP		
CT	400	-	1010	825	-	-	192	180	0.44	0.45	10.0
RC	400	-	-	770	-	940	236	180	0.44	0.45	12.0
RCR20	320	80	-	760	-	925	236	180	1.04	0.45	11.0
RCR35	260	140	-	750	-	915	234	180	1.52	0.45	12.0
RCR50	200	200	-	740	-	905	234	180	1.68	0.45	14.0
RCF	400	-	-	-	710	865	282	180	0.44	0.45	13.0
RCFR20	320	80	-	-	700	855	280	180	1.04	0.45	14.5
RCFR35	260	140	-	-	690	845	279	180	1.52	0.45	13.0
RCFR50	200	200	-	-	685	835	279	180	1.68	0.45	14.5

หมายเหตุ RHA หมายถึง เถ้าแกลบบดละเอียด

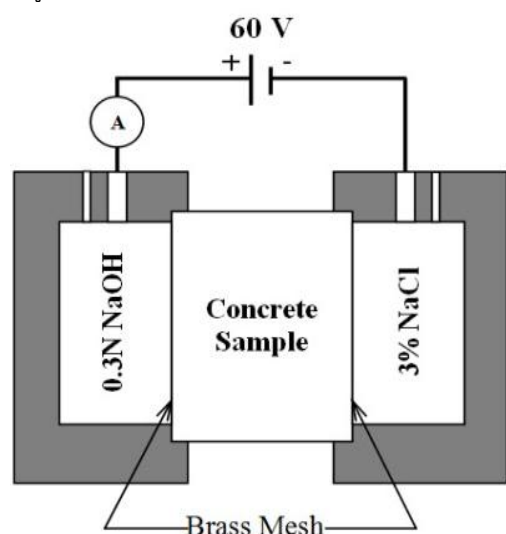
RFA หมายถึง มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

RCA หมายถึง มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

SP หมายถึง สารลดน้ำพิเศษ

3.4 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

นำตัวอย่างคอนกรีตเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. มาตัดตามขวางที่ตำแหน่งตรงกลางของตัวอย่างโดยให้มีขนาดความสูง 50 ± 3 มม. จากนั้นทำการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตด้วยวิธีเร่งด้วยไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C 1202 [14] เมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 และ 90 วัน โดยวัดค่าการซึมผ่านของไอออนคลอไรด์ในรูปของประจุไฟฟ้าทั้งหมด (Total charge passed) ที่ผ่านตัวอย่างทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การติดตั้งชุดทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

จากค่ากระแสไฟฟ้าสามารถคำนวณหาประจุไฟฟ้าสะสมที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตได้จากสมการ 1

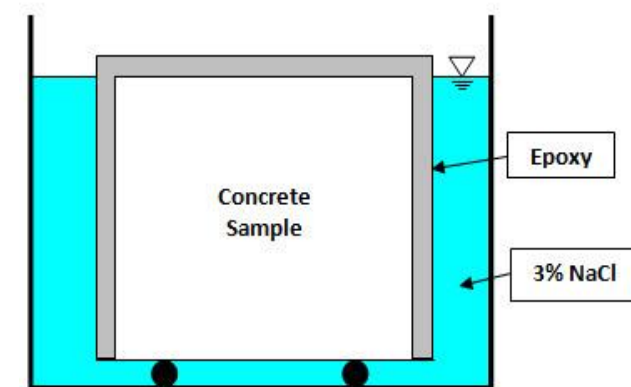
$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

โดยที่

Q คือ ประจุไฟฟ้าสะสมที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต (คูลอมบ์)

I_0 คือ กระแสไฟฟ้าที่เวลาเริ่มต้น (แอมแปร์)

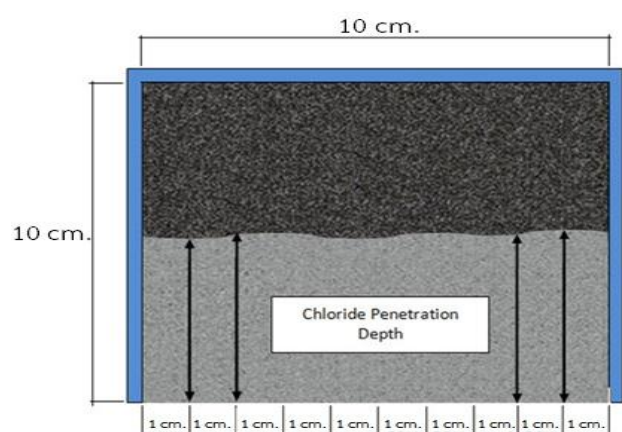
I_t คือ กระแสไฟฟ้าที่เวลา t นาที นับเริ่มจากการทดสอบ (แอมแปร์)



รูปที่ 2 ชุดทดสอบระยะการแทรกซึมของคลอไรด์

3.5 การทดสอบระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

ตัดแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ที่บ่มในน้ำประปา 26 วัน ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความสูง ได้เป็นตัวอย่างรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 10 ซม. จำนวน 2 ชิ้น จากนั้นหล่อผิวด้านข้างและด้านบนด้วยอีพอกซี โดยเหลือพื้นที่ผิวเปิดไว้ 1 ด้านเพื่อเป็นด้านที่สัมผัสกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 [15] จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปทดสอบดังรูปที่ 2 โดยแช่ไว้เป็นระยะเวลา 90 และ 180 วัน จึงนำคอนกรีตขึ้นมาทำการผ่าซีก จากนั้นพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.1M ลงบนผิวหน้าคอนกรีตที่แตกออกหลังจากการผ่าซีกให้คอนกรีตสัมผัสกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ จากนั้นวางทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อให้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตทำปฏิกิริยากับโซเดียมคลอไรด์ที่อยู่ในเนื้อคอนกรีต ซึ่งผิวของคอนกรีตที่มีคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปจะเปลี่ยนเป็นสีเทาขาว จึงวัดระยะการแทรกซึมที่เกิดขึ้นที่ระยะห่างกัน 1 ซม. ตามรูปที่ 3 แล้วหาค่าเฉลี่ยระยะการแทรกซึมของคลอไรด์



รูปที่ 3 การวัดระยะการแทรกซึมของคลอไรด์

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติทางเคมีวัสดุประสาน

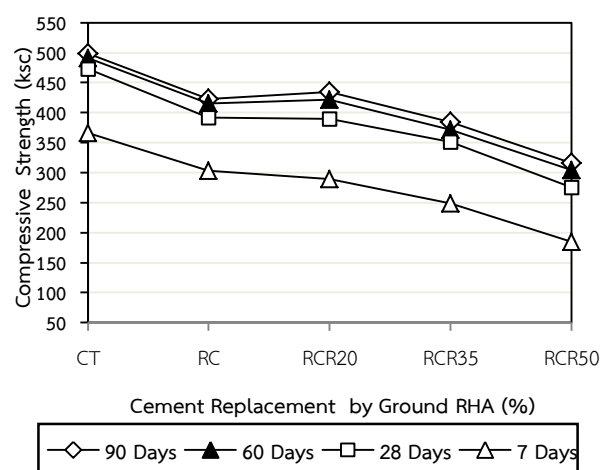
ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน พบว่าปูนซีเมนต์มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 65.4 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ร้อยละ 1 และมี SO₃ ร้อยละ 2.7 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบดังกล่าวแล้วปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าอยู่ในเกณฑ์ตามที่มาตรฐาน ASTM C150 [16] กำหนดไว้ ส่วนเถ้ากลบ (RHA) มีองค์ประกอบของ SiO₂ เป็นหลักร้อยละ 93.5 และมี SO₃ อยู่ร้อยละ 0.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ร้อยละ 8.7

4.2 กำลังอัดของคอนกรีต

รูปที่ 4 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุม (CT) ที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 366, 473, 491 และ 499 กก/ซม² ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติและใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน (RC) ที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 303, 392, 415 และ 423 กก/ซม² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 83, 83, 85 และ 85 ของคอนกรีตควบคุม

ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	K ₂ O	LOI
RHA	93.5	0.2	0.4	0.9	0.1	3.3	8.7
Cement	20.9	4.8	3.4	65.4	2.7	0.4	1.0



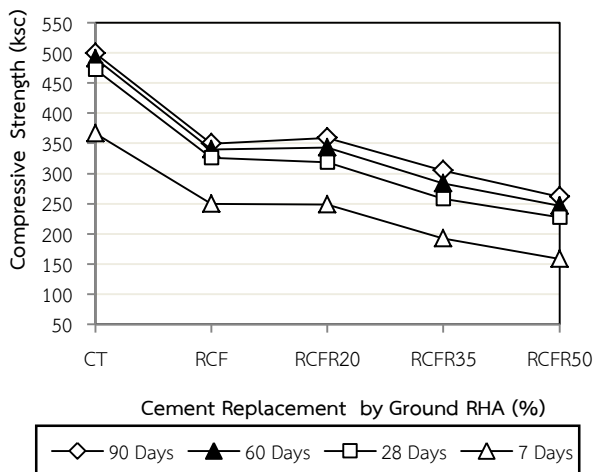
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบบดละเอียด

การใช้เถ้ากลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (RCR20) มีกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วันเท่ากับ 289, 390, 422 และ 434 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 79, 83, 86 และ 87 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ ซึ่งมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้ากลบบดละเอียดได้ที่อายุ 60 วันขึ้นไป สำหรับการใส่เถ้ากลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 35 และ 50 ของน้ำหนักวัสดุประสาน (RCR35 และ RCR50) ทำให้มีกำลังอัดต่ำลง โดยกำลังอัดที่อายุ 90 วันเท่ากับ 384 และ 316 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 77 และ 63 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้ากลบ

บดละเอียด (RCF) แสดงในรูปที่ 5 พบว่ามีกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วันเท่ากับ 250, 326, 340 และ 349 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 68, 69, 69 และ 70 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมค่อนข้างมาก และการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (RCFR20) มีกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นที่อายุ 60 วันขึ้นไปได้เช่นกัน โดยมีกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วันเท่ากับ 249, 319, 343 และ 359 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 68, 67, 70 และ 72 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ และการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (RCFR35 และ RCFR50) มีกำลังอัดที่อายุ 90 วันเท่ากับ 305 และ 261 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 61 และ 52 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ

การใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลง เนื่องจากมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีความพรุนสูง และมีความแข็งแรงที่ต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ [17] และการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถทำให้กำลังอัดสูงขึ้นได้ แต่ถ้ายใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในปริมาณที่มากเกินไปทำให้กำลังอัดต่ำลง เนื่องจากการใช้วัสดุปอซโซลานในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานลดลงตามไปด้วย [18]

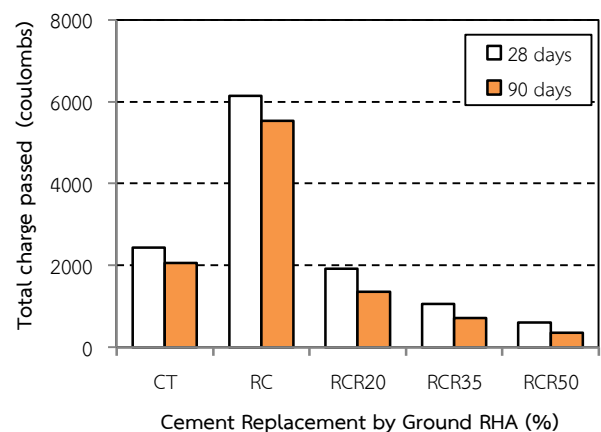


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด

4.3 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ซึ่งแสดงผลเป็นค่าของประจุไฟฟ้ารวมทั้งหมดหรือคูลอมบ์ (Coulombs) ซึ่งมาตรฐาน ASTM C 1202 [14] ได้กำหนดให้ค่าการแทรกซึมคลอไรด์ระดับต่ำมากเท่ากับ 100 – 1000 คูลอมบ์, ระดับต่ำ 1000 – 2000 คูลอมบ์, ระดับปานกลาง 2000 – 4000 คูลอมบ์ และระดับสูงคือตั้งแต่ 4000 คูลอมบ์ขึ้นไป

รูปที่ 6 พบว่าคอนกรีตควบคุมมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 2440 คูลอมบ์ โดยมีกำลังอัดเท่ากับ 473 กก/ซม² และเมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นเป็น 90 วัน พบว่าค่าการแทรกซึมคลอไรด์ลดลงเหลือเท่ากับ 2060 คูลอมบ์ การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติที่ไม่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียด พบว่ามีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 6144 คูลอมบ์หรือคิดเป็น 2.52 เท่าของคอนกรีตควบคุม และที่อายุ 90 วันมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์เท่ากับ 5526 คูลอมบ์หรือคิดเป็น 2.68 เท่าของคอนกรีตควบคุม

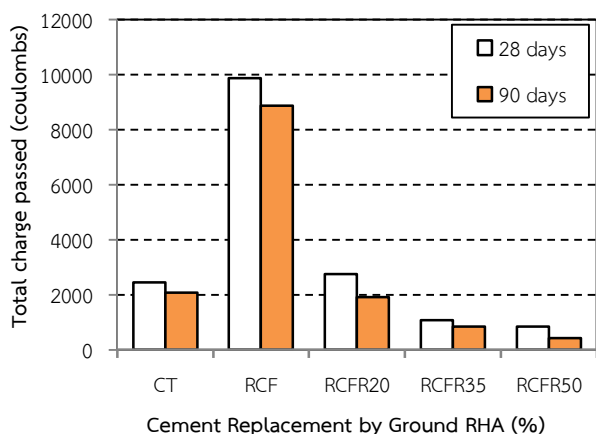


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด

สำหรับการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติสามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์ได้อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์อัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 1914, 1053 และ 610 คูลอมบ์หรือคิดเป็น 0.78, 0.43 และ 0.25 เท่าของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ และที่อายุ 90 วันมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ลดลงเหลือ 1355, 708 และ 347 คูลอมบ์หรือคิดเป็น 0.66, 0.34 และ 0.17 เท่าของคอนกรีตควบคุม เนื่องจากเถ้า

แกลบบดละเอียดมีความละเอียดที่สูงสามารถเข้าไปอุดช่องว่างในคอนกรีตทำให้เนื้อของคอนกรีตมีความแน่นกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้แกลบบดละเอียด การแทรกซึมคลอไรด์จึงยากขึ้น

รูปที่ 7 พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 9864 คูลอมป์หรือคิดเป็น 4.04 เท่าของคอนกรีตควบคุม และที่อายุ 90 วันมีค่าเท่ากับ 8863 คูลอมป์หรือคิดเป็น 4.30 เท่าของคอนกรีตควบคุม ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สูงมาก การใช้แกลบบดละเอียดในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตสามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์ได้อย่างชัดเจน การใช้แกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานพบว่าที่อายุ 28 วัน คอนกรีตมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์เท่ากับ 2743 คูลอมป์ ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่เมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นเป็น 90 วัน ค่าการแทรกซึมคลอไรด์มีค่าเท่ากับ 1919 คูลอมป์หรือคิดเป็น 0.93 เท่าของคอนกรีตควบคุม สำหรับคอนกรีตที่ใช้แกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมได้ทุกอายุการทดสอบ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยแกลบบดละเอียด

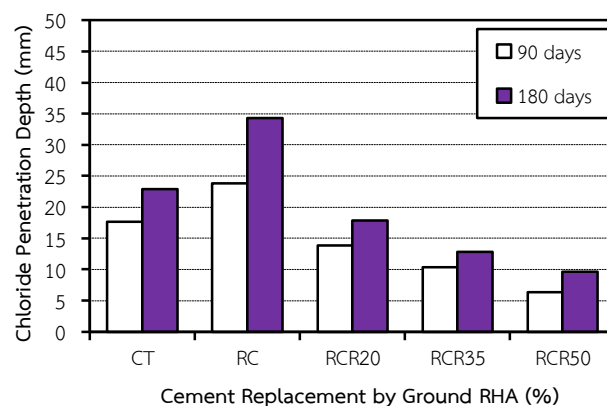
เมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นจาก 28 วัน เป็น 90 วัน มีการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด และการใช้แกลบบดละเอียดทำให้มีค่าแทรกซึมคลอไรด์ต่ำลงอย่างมาก เพราะการแทรกซึมคลอไรด์ลดลงตามปริมาณการใช้แกลบบดละเอียดที่เพิ่มขึ้นมากกว่าผลการลดลงของกำลังอัด ทั้งนี้เนื่องจากผลของความละเอียดของแกลบบดละเอียดที่เข้าไปอุดช่องว่างในคอนกรีตและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้

คอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นและมีช่องว่างในคอนกรีตลดลงทำให้มีการซึมผ่านของคลอไรด์ได้น้อยลงตามไปด้วย [9]

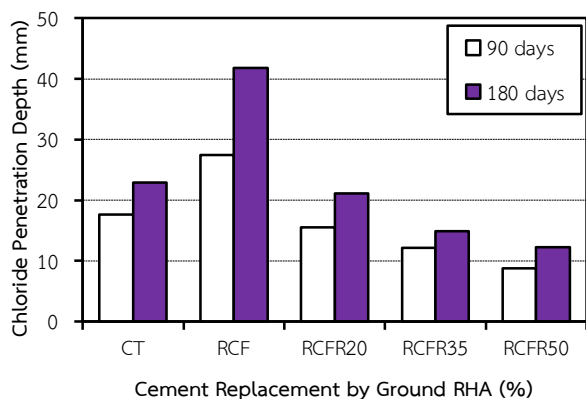
4.4 ระยะเวลาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

รูปที่ 8 พบว่าระยะเวลาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตควบคุมที่แอสระละลายโซเดียมคลอไรด์ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 17.6 มม. และที่แสะ 180 วันมีระยะเวลาการแทรกซึมเพิ่มขึ้นเป็น 22.9 มม. ระยะเวลาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติที่แสะในแสระละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ที่ระยะเวลา 90 วัน มีค่าเท่ากับ 23.8 มม. และที่แสะเป็นเวลา 180 วันมีค่าเท่ากับ 34.3 มม. เห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับทรายธรรมชาติและใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวมีระยะเวลาการแทรกซึมคลอไรด์ที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบ

สำหรับระยะเวลาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับทรายธรรมชาติและใช้แกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่แสะ 90 วัน พบว่ามีค่าเท่ากับ 13.9, 10.4 และ 6.4 มม. ตามลำดับ และที่แสะ 180 วัน มีค่าเท่ากับ 17.8, 12.8, 9.6 มม. ตามลำดับ



รูปที่ 8 ระยะเวลาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับทรายธรรมชาติกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยแกลบบดละเอียด

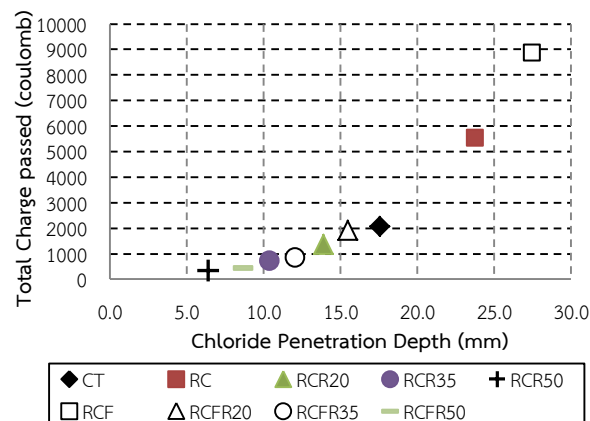


รูปที่ 9 ระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด

คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแสดงดังรูปที่ 9 มีระยะการแทรกซึมคลอไรด์ที่แช่ 90 วัน เท่ากับ 27.5 มม. และเมื่อการแช่เพิ่มขึ้นเป็น 180 วันมีค่าเท่ากับ 41.8 มม. ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตควบคุมค่อนข้างมากทุกอายุการทดสอบ ซึ่งการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถทำให้คอนกรีตดังกล่าวมีระยะการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมได้ทุกอายุการทดสอบ โดยระยะการแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียดที่เพิ่มขึ้นและเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นจะมีระยะการแทรกซึมคลอไรด์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ด้วยอัตราที่ช้าลง ทั้งนี้เนื่องจากการพัฒนากำลังของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น [15]

ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์กับระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่เวลา 90 วัน แสดงดังรูปที่ 10 พบว่าเมื่อเวลาการแทรกซึมคลอไรด์นานขึ้น ทำให้ระยะการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย การใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ทำให้ความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตต่ำลง เนื่องจากมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีซีเมนต์เฟสหรือเม็ดทรายติดอยู่ที่ผิวของมวลรวม ซึ่งมีโพรงอากาศหรือช่องว่างสูงกว่าหินปูนย่อย และมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีคุณสมบัติที่ด้อยกว่าทรายธรรมชาติ [19, 20] ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลง ทำให้มีการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ง่ายอย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในส่วนผสมคอนกรีตสามารถลดระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตและมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมได้ แม้ว่าจะมีกำลังอัดที่ต่ำกว่าก็ตาม และการเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบ

บดละเอียดมากขึ้นสามารถลดระยะการแทรกซึมคลอไรด์ได้มากขึ้นตามไปด้วยถึงแม้ว่าคอนกรีตดังกล่าวมีกำลังอัดที่ต่ำลงก็ตาม



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์กับระยะการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ที่อายุ 90 วัน

5. สรุปผลการศึกษา

1. การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถช่วยเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตให้สูงขึ้นได้ตั้งแต่อายุ 60 วันขึ้นไป แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม
2. การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายธรรมชาติ ช่วยให้คอนกรีตมีการแทรกซึมคลอไรด์ที่ต่ำลงอย่างมากและต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบ ถึงแม้ว่าจะมีกำลังอัดที่ต่ำกว่าก็ตาม
3. คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมค่อนข้างมาก แต่การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถช่วยให้คอนกรีตมีการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีขึ้นอย่างมากและดีกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบแม้ว่าจะมีกำลังอัดที่ต่ำกว่า

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการ “เมธีวิจัยอาวุโส สกว.” ประจำปี 2553 สัญญาเลขที่ RTA 5380002 และโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ มจร.

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุรศักดิ์ ภูสันติพงษ์, 2545. การศึกษาคอนกรีตที่ถูกทำลายมาใช้ทดแทนมวลรวมในคอนกรีต, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 122
- [2] Tangchirapat W., Buranasing R., Jaturapitakkul C. and Chindaprasirt P., 2008. Influence of Rice Husk-bark ash on Mechanical Properties of Concrete Containing High Amount of Recycled Aggregates, *Construction and Building Materials*, Vol.22, Issue 8, pp.1812-1819.
- [3] ปกป้อง รัตนชู, 2551. กำลังอัดและอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมร่วมกับ เถ้าถ่านหิน และเถ้าขานอ้อย, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 142
- [4] สุพัทธ์ ขาคัลัย, 2552. การศึกษาค่าการซึมผ่านน้ำและการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมร่วมกับเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 129
- [5] Hansen, T.C. and Narud, H., 1983. Strength of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse 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.
- [6] 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.
- [7] 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 Vol.1. pp.513-532.
- [8] อุทฤษฎ์ โชศรี, 2548. กำลังรับแรงและความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น, หน้า 172.
- [9] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, ผลผลิตข้าวโลก [Online], Available:http://www.oae.go.th/ewtadmin/ewt/oae_web/download/journal/trends2556, [Accessed on 2014, February 6].
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 7, สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ, หน้า 317-330
- [10] 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.
- [11] American Society for Testing and Materials, 2001. ASTM C 39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, In *Annual Book of ASTM Standard*, Philadelphia, Vol. 04.02, pp. 18-22.
- [12] 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.
- [13] อรรถเดช ฤกษ์พิบูลย์, 2551. ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อยบดละเอียด, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 142
- [14] American Society for Testing and Materials, 2001. ASTM C 150: Standard Specification for Portland Cement, In *Annual Book of ASTM Standard*, Philadelphia, Vol.04.02, pp.149-155.
- [15] 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.
- [16] ปกป้อง รัตนชู, 2551. กำลังอัดและอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมร่วมกับ เถ้าถ่านหิน และเถ้าขานอ้อย, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 142
- [17] รัฐพล สมนา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554. การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และ

ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเก่า, วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 34, ฉบับที่ 4, หน้า 369-381

[18] กษิติศ มานะพัฒนานุกุล, 2554. การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมผงวัสดุปอซโซลาน

เป็นวัสดุประสานร่วมกับมวลรวม ที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 28