การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า

รัฐพล สมนา[1] และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล[2*]
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งหวังที่จะนำเถ้าชานอ้อยซึ่งเป็นของที่เหลือทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำตาลมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า โดยออกแบบกำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตควบคุมเท่ากับ 350 กก./ซม.^{2} ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าแทนหินปูนย่อยเพื่อผลิตคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า และใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าในอัตราร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำการทดสอบหาค่ากำลังอัด ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ และค่าความลึกคลอไรด์แทรกซึมของคอนกรีต

ผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุดของการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าเพื่อให้ได้ทั้งกำลังอัดในช่วงอายุปลาย ความทึบน้ำ และความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่สูง คือร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตควบคุมประมาณ 2 ถึง 3 เท่า และต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าที่ไม่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดประมาณ 3 ถึง 5 เท่า นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าให้สูงขึ้นได้อย่างชัดเจน โดยความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์จะสูงขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : เถ้าชานอ้อย / มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า / การซึมผ่านน้ำ / ความต้านทานคลอไรด์

---

* *Corresponding author : chai.jat@kmutt.ac.th*

1 *นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

2 *ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

Use of Ground Bagasse Ash to Improve Compressive Strength, Water Permeability, and Chloride Resistance of Recycled Aggregate Concrete

Rattapon Somna[1] and Chai Jaturapitakkul[2*]

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

This research aims to utilize waste from sugar industry (bagasse ash) as a pozzolanic material to partially replace cement to improve compressive strength, water permeability, and chloride resistance of recycled aggregate concrete. The 28-day designed compressive strength of conventional concrete was 350 ksc. Recycled aggregate was used to fully replace crushed limestone in the mix proportion of the conventional concrete for producing recycled aggregate concretes. Ground bagasse ash was used to partially replace cement at 20, 35, and 50% by weight of binder in recycled aggregate concrete. Compressive strength, water permeability, and chloride penetration depth of concretes were investigated.

The results revealed that the suitable replacement of ground bagasse ash to obtain the good long-term compressive strength, low water permeability, and high chloride resistance of recycled aggregate concrete was 20% by weight of binder. The use of ground bagasse ash to partially replace cement could improve water permeability of recycled aggregate concrete to be lower than that of conventional concrete about 2-3 times and lower than that of recycled aggregate concrete without ground bagasse ash about 3-5 times. Moreover, it could also help to increase the chloride penetration resistance of recycled aggregate concrete. The chloride penetration resistance was increased with the increasing of the replacement of ground bagasse ash.

Keywords : Bagasse Ash / Recycled Aggregate / Water Permeability / Chloride Resistance

* *Corresponding author : chai.jat@kmutt.ac.th*

1 *Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

2 *Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ยังคงนิยมใช้ในงานก่อสร้างมาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ซึ่งคอนกรีตประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียดหรือทราย มวลรวมหยาบหรือหินปูนย่อย น้ำ และสารผสมเพิ่มต่างๆ ด้วยเหตุที่คอนกรีตใช้ในงานก่อสร้างมาอย่างยาวนาน ทำให้โครงสร้างเก่าที่สร้างด้วยคอนกรีตบางส่วนเกิดการเสื่อมสภาพและถูกรื้อถอนเพื่อสร้างใหม่ ก่อให้เกิดขยะจากการรื้อถอนโครงสร้างคอนกรีตดังกล่าวเป็นจำนวนมาก ซึ่งขยะดังกล่าวต้องการพื้นที่ในการจัดทิ้งเป็นจำนวนมากเช่นกัน หากสามารถนำคอนกรีตเก่าดังกล่าวกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการนำมาย่อยแล้วนำมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่านี้กลับมาใช้ในงานคอนกรีตอีกครั้ง นอกจากจะสามารถลดพื้นที่ในการจัดทิ้งขยะคอนกรีตแล้ว ยังเป็นการอนุรักษ์แหล่งมวลรวมหยาบตามธรรมชาติให้มีใช้ไปได้อีกนานด้วย อย่างไรก็ตามก่อนการนำมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามาใช้ในงานคอนกรีตอีกครั้ง ต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติของมวลรวมดังกล่าวให้ผ่านมาตรฐานมวลรวมที่เหมาะสำหรับใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตสียก่อน

ในหลายปีที่ผ่านมามีงานวิจัยหลายฉบับได้รายงานถึงคุณสมบัติของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าว่ามวลรวมดังกล่าวมีความถ่วงจำเพาะและความต้านทานการสึกกร่อนจากการขัดสีต่ำกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ และยังพบว่ามีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าของมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ [1-3] เมื่อนำมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตยังส่งผลให้คอนกรีตดังกล่าวมีกำลังอัดและโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติที่ใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติในส่วนผสม [4-7] และเมื่อใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามาแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติในปริมาณที่สูงขึ้น ค่าการซึมผ่านของอากาศและการแทรกซึมของคลอไรด์จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ [6, 8] นอกจากนี้นักวิจัยหลายท่าน [6, 8-11] พบว่าการใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด เถ้าถ่านหินบดละเอียด ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ดินขาวเผา ซิลิกาฟูม สามารถช่วยเพิ่มกำลังอัดและเพิ่มความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าได้

เถ้าชานอ้อยเป็นของเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำตาลที่ได้จากการเผาชานอ้อยเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ภายในโรงงาน โดยประเทศไทยผลิตอ้อยในปี 2552 ได้เป็นจำนวนทั้งหมด 68.5 ล้านตัน [12] เมื่อคำนวณโดยวิธีของ Cordeiro และคณะ [13] จะได้เถ้าชานอ้อยหลังจากการเผาเพื่อผลิตกระไฟฟ้าประมาณ 427,700 ตันต่อปี โดยเถ้าชานอ้อยดังกล่าวนำมาใช้เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณที่ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้พื้นที่ในการจัดทิ้งเป็นบริเวณกว้าง และรอบๆ บริเวณพื้นที่จัดทิ้งยังได้รับผลกระทบจากฝุ่นละอองของเถ้าชานอ้อยอีกด้วย ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านศึกษาคุณสมบัติของเถ้าชานอ้อยเพื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต โดยพบว่าเถ้าชานอ้อยที่ละเอียดมีความเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี [14-18] และการทำปฏิกิริยาของเถ้าชานอ้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิกอนออกไซด์ที่ไม่เป็นผลึก สิ่งเจอปน ขนาดอนุภาค และความละเอียด [14, 17] นอกจากนี้ Chusilp และคณะ [19, 20] ยังพบว่าอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดเพื่อให้ได้กำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดคือร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และยังพบอีกว่าการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดสามารถช่วยลดค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและลดการขยายตัวของมอร์ต้าร์เนื่องจากซัลเฟตได้อีกด้วย

อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบว่ามีงานวิจัยที่ใช้เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเถ้าชานอ้อยมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า นอกจากนี้ยังเป็นการนำของเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาลและงานคอนกรีตมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกด้วย

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อนำเถ้าชานอ้อยซึ่งเป็นของที่เหลือทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำตาลมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้

จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า

3. วัสดุและวิธีการศึกษา

3.1 ปูนซีเมนต์และเถ้าชานอ้อย

งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลในจังหวัดลพบุรี โดยทำการปรับปรุงความละเอียดของเถ้าชานอ้อยโดยการบดก่อนนำมาใช้ในการผสมคอนกรีต ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าชานอ้อยที่ได้มาจากโรงงานโดยตรงมีขนาดอนุภาคใหญ่ โดยมีค่าร้อยละที่ค้างบนตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาด 45 ไมโครเมตร (เบอร์ 325) เท่ากับร้อยละ 66.85 โดยน้ำหนัก และมีค่าดัชนีกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 62 และ 74 ตามลำดับ จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าชานอ้อยที่ได้จากโรงงานโดยตรง พบว่าเถ้าชานอ้อยดังกล่าวมีคุณสมบัติไม่ผ่านการเป็นวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 ซึ่งกำหนดว่าวัสดุปอซโซลานต้องมีร้อยละที่ค้างบนตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาด 45 ไมโครเมตร ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก และมีดัชนีกำลังที่อายุ 7 หรือ 28 วัน ไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเถ้าชานอ้อยที่ได้จากโรงงานโดยตรงมาบดละเอียดเพื่อปรับปรุงให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดสูงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี [17, 21-23] หลังจากบดเถ้าชานอ้อยจนได้อนุภาคเถ้าชานอ้อยที่ละเอียดแล้ว พบว่าเถ้าชานอ้อยมีอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาด 45 ไมโครเมตรเท่ากับร้อยละ 0.42 โดยน้ำหนัก และมีดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 84.7 และ 112.7 ตามลำดับ ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพและดัชนีกำลัง และองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ทั้งนี้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition) เท่ากับร้อยละ 19.6 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดให้สำหรับวัสดุปอซโซลาน คือต้องไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม Chusilp และคณะ [19] ได้รายงานไว้ว่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักส่งผลต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์เพียงเล็กน้อยเมื่ออายุของมอร์ต้าร์มากกว่า 28 วัน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและดัชนีกำลังของวัสดุประสาน

วัสดุประสาน	ความถ่วงจำเพาะ	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ร้อยละ)	ขนาดกลางของอนุภาค, d_{50} (ไมโครเมตร)	ดัชนีกำลัง (ร้อยละ)	
				7 วัน	28 วัน
OPC	3.14	-	14.7	-	-
OBA	1.89	66.85	-	62.0	74.0
GBA	2.27	0.42	5.6	87.4	112.7

หมายเหตุ OPC คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
OBA คือเถ้าชานอ้อยที่ได้จากโรงงานโดยตรง
GBA คือเถ้าชานอ้อยบดละเอียด

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าชานอ้อยบดละเอียด
Silicon Dioxide (SiO_2)	20.9	55.0
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	4.8	5.1
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	3.4	4.1
Calcium Oxide (CaO)	65.4	11.0
Magnesium Oxide (MgO)	1.3	0.9
Sodium Oxide (Na_2O)	0.3	0.2
Potassium Oxide (K_2O)	0.4	1.2
Sulfur Trioxide (SO_3)	2.7	2.2
Loss On Ignition (LOI)	1.0	19.6

3.2 มวลรวมที่ได้จากธรรมชาติ

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือทรายแม่น้ำ ซึ่งมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.07 ความถ่วงจำเพาะในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งมีค่าเท่ากับ 2.62 การดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.91 และค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,725 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (กก./ม.^{3}) ส่วนมวลรวมหยาบที่ได้จากธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ หินปูนย่อยซึ่งมีขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 19 มม. โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.89, ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.73, ค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,650 กก./ม.^{3}, การดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.45, ปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมเท่ากับร้อยละ 39.3 โดยปริมาตร และค่าการสึกกร่อนจากการขัดสีโดยการทดสอบด้วยวิธี Los Angeles เท่ากับร้อยละ 23 โดยน้ำหนัก

3.3 มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า

มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้มาจากการย่อยก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 15 ซม. สูงเท่ากับ 30 ซม. ซึ่งบริษัทเอกชนส่งเข้ามาทดสอบกำลังอัดกับภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และมีกำลังอัดอยู่ในช่วง 250 ถึง 400 กก./ซม.^{2} โดยใช้เครื่องย่อยแบบค้อนเหวี่ยง

มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามีขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 19 มม. มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.47 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.49 ค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,480 กก./ม.^{3} ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 4.81 โดยน้ำหนัก ปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมเท่ากับร้อยละ 40.4 โดยปริมาตร และค่าการสึกกร่อนจากการขัดสีโดยการทดสอบด้วยวิธี Los Angeles เท่ากับร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก

3.4 ส่วนผสมคอนกรีตและวิธีการผสม

ส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 3 งานวิจัยนี้ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตควบคุม (CON) ให้มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ประมาณ 350 กก./ซม.^{2} สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า (RC) ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามาแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมด นอกจากนี้ยังใช้เถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (RCBA20, RCBA35 และ RCBA50 ตามลำดับ) โดยยังคงมีน้ำหนักของวัสดุประสานเท่ากับของคอนกรีต CON นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และใช้สารลดน้ำพิเศษช่วยในการปรับค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 5-10 ซม.

งานวิจัยนี้ผสมคอนกรีตทั้งหมดโดยวิธี Two-

stage mixing approach ซึ่ง Tam และคณะ [24] แนะนำว่าวิธีดังกล่าวสามารถช่วยปรับปรุงบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมเดิมและมอร์ต้าร์ที่ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า โดยซีเมนต์เพสต์ที่เหลวข้นจะแทรกเข้าไปในรอยร้าวและช่องว่างเพื่ออุดรอยร้าวและช่องว่างในมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าให้มีความแน่นขึ้น สำหรับวิธีการผสมแบบ Two-stage mixing approach แบ่งออกเป็นสองขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนที่นำมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามาผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลา 60 วินาที ถัดจากนั้นทำการเติมน้ำครึ่งหนึ่งของปริมาณน้ำที่ต้องการและทำการผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 60 วินาที หลังจากนั้นใส่ปูนซีเมนต์แล้วผสมต่ออีก 30 วินาที สำหรับขั้นตอนที่สองเป็นการนำน้ำที่เหลืออีกครึ่งเติมเข้าไปแล้วผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลาในการผสมเท่ากับ 120 วินาที ก็จะได้คอนกรีตสดเพื่อทดสอบค่าการยุบตัวและหล่อตัวอย่างคอนกรีต

สำหรับตัวอย่างคอนกรีตทดสอบจะหล่อลงแบบหล่อและถอดแบบเมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง โดยนำตัวอย่างคอนกรีตทดสอบทุกก้อนไปบ่มในน้ำจนถึงอายุการทดสอบ

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของคอนกรีต

Mix	Mix Proportion (kg/m^3)						W/B	Slump (mm)
	Cement	GBA[a]	Crush Limestone	RCA[b]	Sand	SP[c]		
CON	350	-	1015	-	800	-	0.55	75
RC	350	-	-	958	755	-	0.55	70
RCBA20	280	70	-	951	749	0.70	0.55	90
RCBA35	227.5	122.5	-	941	742	1.04	0.55	75
RCBA50	175	175	-	930	733	4.35	0.55	55

[a] เถ้าชานอ้อยบดละเอียด

[b] มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง

[c] สารลดน้ำพิเศษ โดยสมมุติว่าในสารลดน้ำพิเศษมีน้ำอยู่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

3.5 การทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสความยืดหยุ่น

ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทดสอบรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 ซม. สูง 20 ซม. ในการทดสอบหาค่ากำลังอัด โดยทดสอบที่อายุ 7, 28, 90 และ 180 วัน

3.6 การซึมผ่านน้ำ

นำตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเดียวกับการทดสอบกำลังอัดมาตัดบริเวณกึ่งกลางของความสูงให้ได้ขนาดความหนาเท่ากับ 4 ซม. จากนั้นหล่ออีพ็อกซี่หนาประมาณ 2.5 ซม. รอบๆ ผิวด้านข้างของตัวอย่างดังกล่าว แล้วทิ้งไว้ให้แข็งตัวประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเข้าเครื่องทดสอบ งานวิจัยนี้ใช้ความดันของน้ำเท่ากับ 5 เมกะปาสคาล ซึ่งเป็นความดันที่ Concrete Society [25] ได้แนะนำไว้ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตคำนวณโดยใช้สมการที่ 1 ซึ่งเป็นสมการที่มีนักวิจัยหลายท่านใช้กัน [26-28]

$$K = \frac{\rho L g Q}{P A} \quad (1)$$

โดยที่ K คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (ม./วินาที), ρ คือความหนาแน่นของน้ำ (กก./ซม.^{3}), g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที^{2}), Q คืออัตราการไหลของน้ำ (ม.^{3}/วินาที), L คือความหนาของ

ตัวอย่างคอนกรีตทดสอบ (ม.), P คือความดันน้ำสัมบูรณ์ (กก.•ม./ม.^{2}/วินาที^{2}) และ A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีตทดสอบ (ม.^{2})

3.7 ระยะการแทรกซึมของคลอไรด์

นำตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 ซม. สูง 20 ซม. ที่บ่มในน้ำจนครบอายุ 28 วัน มาตัดครึ่งเพื่อให้ได้ขนาดตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 ซม. สูง 10 ซม. หลังจากนั้นทำการหล่ออีพ็อกซี่รอบตัวอย่างคอนกรีต จะเหลือไว้เพียงด้านเดียวเพื่อให้คลอไรด์ซึมผ่านได้ นำตัวอย่างคอนกรีตที่หล่ออีพ็อกซี่แล้วไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นระยะเวลา 3, 6, 9, 12 และ 18 เดือน นำตัวอย่างคอนกรีตทดสอบมาผ่าซีก จากนั้นทำการพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 1N ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ Otsuki และคณะ [29] กล่าวว่าเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบหาระยะการแทรกซึมของคลอไรด์ หลังจากพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 1N ลงบนผิวหน้าของคอนกรีตที่ผ่าซีกจะปรากฏสีขาวของสารประกอบซิลเวอร์คลอไรด์บนเนื้อคอนกรีตที่มีคลอไรด์อิสระแทรกซึมเข้าไปถึง ทำการวัดระยะการแทรกซึมของคลอไรด์จำนวน 5 จุด มาหาค่าเฉลี่ย

4. ผลและวิจารณ์ผลการทดสอบ

4.1 กำลังอัด

ตารางที่ 4 แสดงค่ากำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต พบว่ากำลังอัดของคอนกรีต CON ที่อายุ 7, 28, 90 และ 180 วัน มีค่าเท่ากับ 287, 367, 449 และ 450 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าทั้งที่ใช้และไม่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีต CON ทุกอายุการทดสอบ โดยกำลังอัดที่อายุ 7 วัน ของคอนกรีต RC, RCBA20, RCBA35 และ RCBA50 มีค่าเท่ากับ 248, 223, 197 และ 182 กก./ซม.^{2} หรือคิดเป็นร้อยละ 86.6, 77.6, 68.8 และ 63.4 ของคอนกรีต CON ตามลำดับ เมื่ออายุคอนกรีตเพิ่มขึ้นเป็น 28 วัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 333, 322, 290 และ 268 กก./ซม.^{2} หรือคิดเป็นร้อยละ 90.8, 87.8, 79.0 และ 72.9 ของคอนกรีต CON ตามลำดับ เห็นได้ว่าการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าในปริมาณสูงขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตดังกล่าวมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าสามารถช่วยให้คอนกรีตดังกล่าวพัฒนากำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นจนมีค่าสูงกว่าของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าที่ไม่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในส่วนผสม เมื่อคอนกรีตดังกล่าวมีอายุตั้งแต่ 90 วันขึ้นไป โดยกำลังอัดของคอนกรีต RCBA20 ที่อายุ 90 และ 180 วัน มีค่าเท่ากับ 427 และ 432 กก./ซม.^{2} หรือคิดเป็นร้อยละ 95.1 และ 96.0 ของคอนกรีต CON ตามลำดับ ในขณะที่กำลังอัดของคอนกรีต RC ที่อายุเดียวกันมีค่าเท่ากับ 416 และ 425 กก./ซม.^{2} หรือคิดเป็นร้อยละ 92.8 และ 94.4 ของคอนกรีต CON ตามลำดับ จากผลกำลังอัดข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าคอนกรีต RCBA20 มีการพัฒนากำลังอัดจนมีค่ากำลังอัดเทียบเท่ากับค่ากำลังอัดของคอนกรีต CON

ตารางที่ 4 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต

ตัวอย่างคอนกรีต	กำลังอัด, กก./ซม.^{2} (%)			
	7 วัน	28 วัน	90 วัน	180 วัน
CON	287 (100)	367 (100)	449 (100)	450 (100)
RC	248 (86.6)	333 (90.8)	416 (92.8)	425 (94.4)
RCBA20	223 (77.6)	322 (87.8)	427 (95.1)	432 (96.0)
RCBA35	197 (68.8)	290 (79.0)	381 (84.9)	386 (85.9)
RCBA50	182 (63.4)	268 (72.9)	349 (77.7)	354 (78.8)

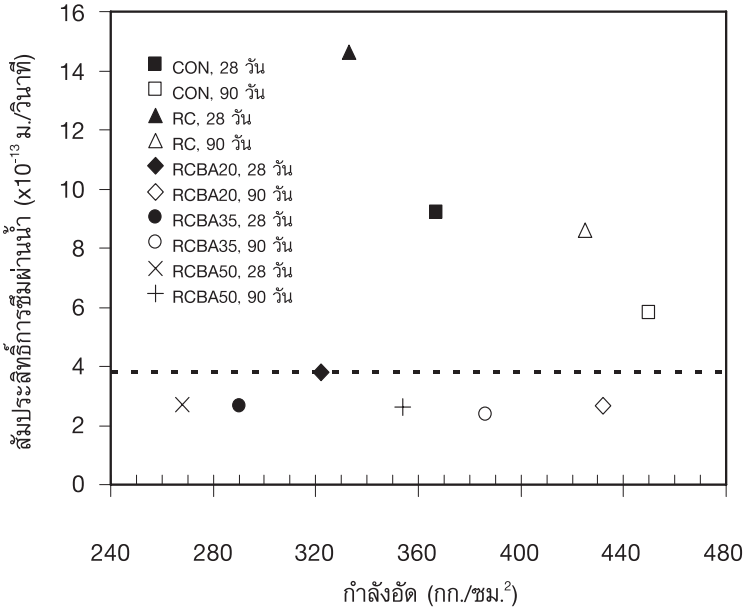
จากผลกำลังอัดข้างต้นพบว่าการใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามาแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมดส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง เนื่องจากซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมดังกล่าวมีความพรุนสูงกว่าหินปูนย่อย และมวลรวมดังกล่าวมีความแข็งแกร่งน้อยกว่าหินปูนย่อย ดูได้จากค่าการสึกกร่อนจากการทดสอบการขัดสีด้วยวิธี Los Angeles ของมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ค่าดังกล่าวของหินปูนย่อยมีค่าเท่ากับร้อยละ 23 โดยน้ำหนัก ถึงแม้ว่าการผสมคอนกรีตด้วยวิธี Two-stage mixing approach สามารถช่วยปรับปรุงข้อด้อยของมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าไปบ้างแล้ว แต่ยังไม่สามารถช่วยให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามีค่าเท่ากับคอนกรีต CON ได้

สำหรับอัตราส่วนที่เหมาะสมของการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า คืออัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chusilp และคณะ [20] ที่พบในมอร์ต้าร์ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคที่ละเอียดของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดสามารถแทรกตัวเข้าไปอุดรูพรุนของซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่เกาะอยู่ที่ผิวของมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า โดยเฉพาะรอยแตกร้าวและบริเวณส่วนที่เป็นผิวสัมผัสระหว่างซีเมนต์มอร์ต้าร์และมวลรวมเดิม นอกจากนี้การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดยังสามารถช่วยให้เนื้อคอนกรีตมีความแน่นขึ้น เนื่องจากอนุภาคที่เล็กกว่าอนุภาคปูนซีเมนต์ของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดสามารถแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ และในระยะยาวกล่าวคือหลังอายุ 28 วัน ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าชานอ้อยช่วยให้กำลังอัดของคอนกรีต RCBA20 พัฒนาเพิ่มมากขึ้นจนมีค่ากำลังอัดที่อายุ 180 วัน เกือบเท่ากับกำลังอัดของคอนกรีต CON ได้

สำหรับการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า ไม่สามารถช่วยให้คอนกรีตดังกล่าวพัฒนากำลังอัดได้เท่ากับคอนกรีตที่ไม่ได้ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ แม้ว่าอนุภาคที่เล็กของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดสามารถแทรกอุดช่องว่างของเพสต์ส่งผลให้เนื้อแน่นขึ้นได้ แต่การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานถือว่าค่อนข้างมาก (นอกจากนี้ความถ่วงจำเพาะของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดมีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ค่อนข้างมาก) ส่งผลให้กำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์หายไปกว่าครึ่ง ทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาต่ำลง [30] ส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นลดลงตามไปด้วย จึงทำให้กำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานไม่เพียงพอที่จะชดเชยกำลังอัดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ที่หายไป ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในส่วนผสมในปริมาณสูง (ร้อยละ 35 ถึงร้อยละ 50) มีค่าต่ำนั่นเอง

4.2 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ

จากรูปที่ 1 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำและกำลังอัดของคอนกรีต พบว่าคอนกรีต CON มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุ 28 และ 90 วัน เท่ากับ 9.1×10^{-13} และ 5.82×10^{-13} ม./วินาที ตามลำดับ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต RC ที่อายุเดียวกันมีค่าเท่ากับ 14.63×10^{-13} และ 8.60×10^{-13} ม./วินาที หรือคิดเป็นประมาณ 1.6 และ 1.5 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต RC ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามีซีเมนต์มอร์ต้าร์ซึ่งมีช่องว่างมากกว่าหินปูนย่อยเกาะอยู่ที่ผิวมวลรวมเดิม ทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมดังกล่าวมีช่องว่างตามไปด้วย ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต RC สูงขึ้น



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำและกำลังอัดของคอนกรีต

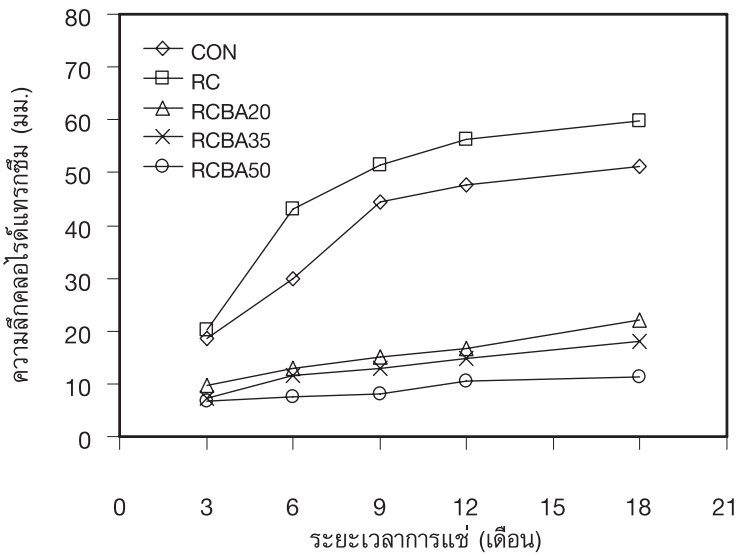
นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าร่วมกับการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถช่วยทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตดังกล่าวลดลงอย่างเห็นได้ชัด งานวิจัยนี้จึงสร้างเส้นประเพื่อแบ่งแยกให้เห็นช่วงของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าร่วมกับการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียด พบว่าแม้ว่ากำลังอัดของคอนกรีต RCBA20, RCBA35 และ RCBA50 มีค่าต่ำกว่าของคอนกรีต CON ก็ตาม แต่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตดังกล่าวกลับมีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต CON นั่นแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน (ร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) สามารถช่วยทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามีความทึบน้ำสูงขึ้นได้ เนื่องจากอนุภาคที่ละเอียดของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดและแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยในการอุดช่องว่างในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความแน่นขึ้น น้ำจึงซึมผ่านได้ยากขึ้น สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าร่วมกับการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 2×10^{-13} ถึง 4×10^{-13} ม./วินาที ยกตัวอย่างเช่น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุ 28 วันของคอนกรีต RCBA35 มีค่าเท่ากับ 2.68×10^{-13} ม./วินาที หรือต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต CON และ RC

ที่อายุเดียวกันประมาณ 3 และ 5 เท่า ตามลำดับ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุ 90 วัน ของคอนกรีต RCBA20 พบว่ามีค่าเท่ากับ 2.66×10^{-13} ม./วินาที หรือต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต CON และ RC ที่อายุเดียวกันประมาณ 2 และ 3 เท่า ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม ถ้าต้องการให้ได้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าที่มีทั้งคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัดและคุณสมบัติด้านความทึบน้ำที่ดี อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน คืออัตราส่วนที่ดีที่สุด

4.3 ความลึกคลอไรด์แทรกซึม

รูปที่ 2 พบว่าความลึกคลอไรด์แทรกซึมของคอนกรีต CON ที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นระยะเวลา 3, 6, 9, 12 และ 18 เดือน มีค่าเท่ากับ 18.6, 30.0, 44.5, 47.8 และ 51.2 มม. ตามลำดับ ส่วนความลึกคลอไรด์แทรกซึมของคอนกรีต RC ที่อายุการแช่เดียวกันมีค่าเท่ากับ 20.3, 43.0, 51.5, 56.2 และ 59.8 มม. ตามลำดับ เห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าอย่างคอนกรีต RC มีค่าความลึกคลอไรด์แทรกซึมสูงกว่าคอนกรีต CON ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าส่งผลให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้ง่ายกว่าคอนกรีต CON ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามีซีเมนต์มอร์ต้าร์ซึ่งมีโพรงอากาศสูงกว่าหินปูนย่อยเกาะติดอยู่ที่ผิวมวลรวมเดิม จึงทำให้คลอไรด์มีช่องทางแทรกซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้ง่ายขึ้น แม้ว่าการใช้วิธี Two-stage mixing approach สามารถช่วยลดรูพรุนและช่องว่างของรอยร้าวบนมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าได้ [24] แต่ไม่เพียงพอที่จะทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามีความแน่นพอที่จะต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีเท่ากับคอนกรีต CON



รูปที่ 2 ความลึกคลอไรด์แทรกซึม

เมื่อใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า พบว่าคอนกรีต RCBA20, RCBA35 และ RCBA50 มีค่าความลึกคลอไรด์แทรกซึมลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยค่าความลึกคลอไรด์แทรกซึมของคอนกรีต RCBA20 ที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักเป็นระยะเวลา 3, 9 และ 18 เดือน มีค่าเท่ากับ 9.7, 15.0 และ 22.0 มม. หรือคิดเป็นร้อยละ 52, 34 และ 43 ของคอนกรีต CON ตามลำดับ ส่วนของคอนกรีต RCBA35 มีค่าเท่ากับ 7.2, 12.8 และ 18.0 มม.

หรือคิดเป็นร้อยละ 39, 29 และ 35 ของคอนกรีต CON ตามลำดับ และสำหรับของคอนกรีต RCBA50 มีค่าเท่ากับ 6.6, 8.2 และ 11.2 มม. หรือคิดเป็นร้อยละ 35, 18 และ 22 ของคอนกรีต CON ตามลำดับ โดยค่าความลึกคลอไรด์แทรกซึมที่ลดลงอย่างมากของคอนกรีต RCBA20, RCBA35 และ RCBA50 เนื่องมาจากการที่เถ้าชานอ้อยที่มีความละเอียดสูงสามารถแทรกตัวเข้าไปอุดช่องว่างของซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมเดิม และอุดรอยแตกร้าวระหว่างผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมเดิมกับซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ติดอยู่ที่ผิวได้ดีกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีเถ้าชานอ้อยบดละเอียด นอกจากนี้อนุภาคที่ละเอียดของเถ้าชานอ้อยยังสามารถทำให้เนื้อคอนกรีตมีความแน่นขึ้นกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในส่วนผสม ส่งผลให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมผ่านเข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้ยากนั่นเอง แม้ว่าการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่สูงจะส่งผลต่อการลดลงของกำลังอัด แต่การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการวิจัยการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าที่อายุปลายให้มีค่ากำลังอัดสูงกว่าของคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียด และมีค่ามากกว่ากำลังอัดที่ออกแบบไว้ที่อายุ 28 วัน แม้ว่ามีกำลังอัดต่ำกว่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุมประมาณร้อยละ 10 ก็ตาม

2. การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน (ร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) สามารถทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนมีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตควบคุมประมาณ 2 ถึง 3 เท่า และต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าที่ไม่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดประมาณ 3 ถึง 5 เท่า

3. ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าสูงขึ้นอย่างมากเมื่อใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสม นอกจากนี้ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์จะสูงขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น

4. อัตราส่วนที่ดีที่สุดของการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าเพื่อให้ได้ทั้งกำลังอัด ความทึบน้ำ และความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ดี คือร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ภายใต้ทุนโครงการเครือข่ายเชิงกลยุทธ์เพื่อผลิตและพัฒนาอาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษา หลักสูตรปริญญาเอกร่วมใน-ต่างประเทศ ประจำปี 2551 และขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้ “ทุนเมธีวิจัยอาวุโส” สัญญาเลขที่ RTA5380002 ที่สนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

1. 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.

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

3. Buck, A.D., 1997, “Recycled concrete as a source of aggregate”, *ACI Journal*, Vol. 74, No. 5, pp. 212-219.

4. Rahal, K., 2007, "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate", *Building and Environment*, Vol. 42, pp. 407-415.

5. Xiao, J., Li, J., and Zhang, C.H., 2005, "Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 6, pp. 1187-1194.

6. Kou, S.C., Poon, K.C., and Chan, D., 2007, "Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, No. 9, pp. 709-717.

7. 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, No. 8, pp. 1812-1819.

8. Olorunsogo, F.T. and Padayachee, N., 2002, "Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes", *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 2, pp. 179-185.

9. 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, No. 6, pp. 993-999.

10. Tangchirapat, W., Buranasing, R., and Jaturapitakkul, C., 2010, "Use of high fineness of fly ash to improve properties of recycled aggregate concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 22, pp. 565-571.

11. Katz, A., 2004, "Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 597-603.

12. Office of Cane and Sugar Board, 2010, *Report on total cane crushing and sugar production 2009/2010*, Thailand: Ministry of Industry.

13. Cordeiro, G.C., Filijp, R.D.T., Fairbairt, E.M.R., Luis, M.M.T., and Oliver, C.H., 2004, "Influence of mechanical grind on the pozzolanic activity of residual sugarcane bagasse ash", *Proceedings of the international conference on use of recycled materials in building and structure*, Barcelona; pp. 342.

14. Martirena Hernandez, J.F., Middendrof, B., Gehrke, M., and Budelmann, H., 1998, "Use of waste of sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: Study of the reaction", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 11, pp. 1525-1536.

15. Singh, N.B., Singh, V.D., and Rai, S., 2000, "Hydration of bagasse ash-blended Portland cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 9, pp. 1485-1488.

16. Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M.V., Diaz-Pinzon, L., and Ordonez, L.M., 2002, "Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Vol. 77, No. 3, pp. 321-325.

17. Cordeiro, G.C., Toledo Filho, R.D., Tavares, L.M., and Fairbairn, E.M.R., 2008, "Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, No. 5, pp. 410-418.

18. Villar-Cocina, E., Frias, M., and Valencia-Morales, E., 2008, "Sugar cane wastes as pozzolanic materials: Application of mathematical model", *ACI Materials Journal*, Vol. 105, No. 3, pp. 258-264.

19. Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., 2009, "Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 12, pp. 3523-3531.

20. Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol,

K., 2009, "Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 11, pp. 3352-3358.

21. Haque, M.N. and Kayali, O., 1998, "Properties of high-strength concrete using a fine fly ash", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 10, pp. 1445-1452.

22. Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T., 2007, "Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 7, pp. 1534-1541.

23. Sata, V. and Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., 2007, "Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 7, pp. 1589-1598.

24. 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.

25. Concrete Society, 1987, *Permeability testing of site concrete: a review of method and experience*, The Concrete Society, Report No. 31.

26. Hearn, N., Detwiler, R.J., and Sframeli, C., 1993, "Water permeability and microstructure of three old concretes", *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, No. 4, pp. 633-640.

27. Khatri, R.P. and Sirivivatnanon, V., 1997, "Methods for the determination of water permeability of concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 3, pp. 257-261.

28. Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., and Jaturapitakkul, C., 2007, "Strength and permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice hush-bark ash", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 7, pp. 1492-1499.

29. Otsuki, N., Nagataki, S., and Nakashita, K., 1993, "Evaluation of $AgNO_3$ solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials", *Construction and Building Materials*, Vol. 7, No. 4, pp. 195-201.

30. Lam, L., Wong, Y.L., and Poon, C.S., 2000, "Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 5, pp. 747-756.