

COMPRESSIVE STRENGTH AND SULFATE RESISTANCE OF HIGH STRENGTH CONCRETE CONTAINING RECYCLED CONCRETE AGGREGATE AND GROUND BAGASSE ASH

กำลังอัดและความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อยบดละเอียด

อรรคเดช อับดุลมาติน¹ ปกป้อง รัตนชู² วีรชาติ ตั้งจิรภัทร³ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล⁴

¹อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

²อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

⁴ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ARTICLE INFO:

Received: December 28, 2018

Received Revised Form:

February 14, 2019

Accepted: April 18, 2019

ABSTRACT:

This research aims to utilize bagasse ash, a by-product acquired from burning bagasse for an electricity generation in a sugar factory, as a cement replacement in high-strength recycled aggregate concrete. Ground bagasse ash (GBA) was used to partially replace ordinary Portland cement at 20, 35 and 50% by weight of binder. In addition, recycled concrete aggregate (RCA), which was obtained from crushing demolished concrete columns, was used as a fully substitute for natural coarse aggregate in the concrete. The compressive strengths of concrete at 7, 28 and 90 days were investigated. In addition, the durability of concretes in terms of expansion and weight loss due to 10% magnesium sulfate solution attack was also evaluated. The results indicated that the replacing of crushed limestone with RCA had a slightly reduction on the compressive strength of concrete as compared to conventional concrete (CT concrete). Moreover, the use of GBA as 20% by weight of binder to replace OPC could promote the compressive strength of the concrete to be higher than CT concrete at the age of 90 days. In addition, all concretes exhibited compressive strengths higher than 550 ksc suggesting that they were high strength concrete as specified by ACI 363. Considering the magnesium sulfate resistance of concrete, RCA had a clear negative influence on durability of concrete. The expansion of recycled aggregate concrete could be improved by utilization of GBA for up to 50% of cement replacement, which was better than the CT concrete. However, the surface damages of the recycled aggregate concrete due to magnesium sulfate solution attack occurred when the volume of GBA was 50% by weight of binder that resulted in increasing the weight loss of concrete.

KEYWORDS: Recycled concrete aggregate, Ground bagasse ash, Compressive strength, Sulfate resistance

*Corresponding Author,
Email address:
pokpong.r@pnu.ac.th

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการนำเถ้าขานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงงานผลิตน้ำตาลมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต โดยนำเถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน นอกจากนี้ศึกษาเศษคอนกรีตที่ได้จากการย่อยเสาดอมมาใช้เป็นมวลรวมหยาบเพื่อแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติในส่วนผสมของคอนกรีต ทดสอบหากล้างอัดของคอนกรีตที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน และความทนทานของคอนกรีต ได้แก่ การขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ผลการวิจัยพบว่าการใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยส่งผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถช่วยพัฒนากำลังอัดที่อายุปลายของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตให้สูงกว่าคอนกรีตควบคุมได้เมื่ออายุ 90 วัน นอกจากนี้คอนกรีตทุกส่วนผสมมีกำลังอัดมากกว่า 550 กก/ซม² ถือได้ว่าเป็นคอนกรีตกำลังสูงตามมาตรฐาน ACI 363 เมื่อพิจารณาความต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีต พบว่ามวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีผลกระทบด้านลบต่อความทนทานของคอนกรีตอย่างเห็นได้ชัด การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถช่วยลดการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตได้ และให้ผลที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้น (ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตที่สัมผัสกับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าผิวของคอนกรีตมีความเสียหายอย่างมาก ส่งผลให้คอนกรีตมีการสูญเสียน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต, เถ้าขานอ้อยบดละเอียด, กำลังอัด, ความต้านทานซัลเฟต

1. บทนำ

การกัดกร่อนของซัลเฟตเป็นหนึ่งในปัญหาหลักที่มีต่อความทนทานของคอนกรีตซึ่งส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตเสียหาย การเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากซัลเฟตสามารถเกิดขึ้นได้โดยซัลเฟตไอออนที่ซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตผ่านทางช่องว่างทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่ CSH, CAH และ Ca(OH)_2 ส่งผลให้คอนกรีตเกิดรอยร้าวจากการขยายตัวรวมถึงการสูญเสียมวลและการรับกำลัง [1] อย่างไรก็ตามความเสียหายดังกล่าวสามารถป้องกันได้โดยการใช้วัสดุปอซโซ-ลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีต จากงานวิจัยของ Ghafoori

และคณะ [2] ชี้ให้เห็นว่าเถ้าถ่านหินมีประสิทธิภาพช่วยปรับปรุงความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตในด้านการขยายตัวและการสูญเสียกำลังได้ ในขณะที่ Tangchirapat และคณะ [3] พบว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถลดการขยายตัวของคอนกรีตที่เกิดจากการกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟตได้

เถ้าขานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากการเผาขานอ้อยเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงานน้ำตาล เถ้าขานอ้อยเมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้มีความละเอียดสูงสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซ-ลานในการผลิตคอนกรีตได้ [4] จาก

งานวิจัยของ Rerkpiboon และคณะ [5, 6] ชี้ให้เห็นว่าถ้าชานอ้อยบดละเอียดสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มความทนทานของคอนกรีต อีกทั้งช่วยลดช่องว่างภายในคอนกรีตส่งผลให้มีความต้านทานคลอไรด์และซัลเฟตเพิ่มขึ้น

ในขณะเดียวกันวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมได้นำมาใช้อีกอย่างกว้างขวางในงานคอนกรีต เช่นเดียวกับปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเศษคอนกรีตจากการรื้อถอนโครงสร้าง ทำให้เกิดปัญหาพื้นที่ในการทิ้งที่ไม่เพียงพอและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบ ดังนั้นเศษคอนกรีตดังกล่าวจึงถูกนำมาย่อยเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปของมวลรวมอีกครั้ง อย่างไรก็ตามข้อด้อยของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตคือ มีความพรุนและการดูดซึมน้ำที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมจากธรรมชาติ [7,8] ส่งผลให้คุณภาพของคอนกรีตลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความทนทานของคอนกรีต Limbachiya และคณะ [9] พบว่าคอนกรีตมีการซึมผ่านของคลอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกัน Somna และคณะ [10] พบว่าการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมดที่สัมผัสสารละลายซัลเฟตมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่าวัสดุปอซโซลานสามารถปรับปรุงความทนทานของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตให้ดีขึ้นได้ [11-14]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการนำถ้าชานอ้อยบดละเอียดมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม เพื่อปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตและช่วยเพิ่มความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต

2. วัตถุประสงค์

เพื่อให้ถ้าชานอ้อยบดละเอียดในการพัฒนากำลังอัดและความต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต

3. วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุประสานที่ใช้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และถ้าชานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการนำชานอ้อยมาเผาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตน้ำตาล จ.ราชบุรี (แสดงดังรูปที่ 1) ถ้าชานอ้อยก่อนบดมีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานที่มีช่องเปิด

ขนาด 45 ไมโครเมตร (เบอร์ 325) ร้อยละ 60.1 โดยน้ำหนัก (มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.92 ก/ซม³) หลังจากนำถ้าชานอ้อยมาบดพบว่ามีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงดังกล่าวลดลงเหลือร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนัก (มีความหนาแน่นเท่ากับ 2.27 ก/ซม³) ขณะที่องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานแสดงดังตารางที่ 1 พบว่าถ้าชานอ้อยมี SiO₂ เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 72.0 และมีผลรวมของปริมาณ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 79.1 นอกจากนี้มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับร้อยละ 7.5

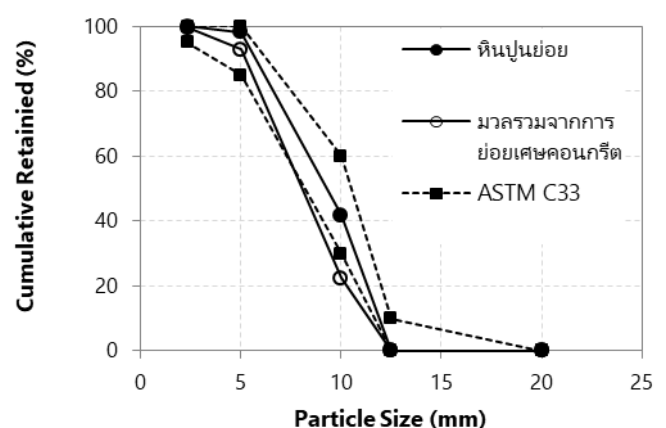
มวลรวมจากธรรมชาติที่ใช้เป็นหินปูนย่อยมีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 12.5 มม. และทรายแม่น้ำ



ก่อนบด

หลังบดละเอียด

รูปที่ 1 ถ้าชานอ้อย



รูปที่ 2 การกระจายขนาดของมวลรวมหยาบ



ก่อนทดสอบ

หลังทดสอบ

รูปที่ 3 มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตก่อนและหลังทดสอบ
การสูญเสียน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C88 [15]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

ร้อยละองค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าขาน้อย
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	20.1	72.0
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	4.1	4.1
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	3.4	3.0
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.4	5.9
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	0.1	1.2
อื่นๆ (Other)	4.3	6.3
สูญเสียน้ำหนักจากการเผา (LOI)	1.7	7.5

ตารางที่ 2 สมบัติจำเพาะของมวลรวม

สมบัติจำเพาะ	ทราย	หินปูนย่อย	มวลรวมจาก การย่อยเศษ คอนกรีต
ความหนาแน่น (ก/ซม ³)	2.61	2.71	2.45
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	0.75	0.57	5.44
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	0.19	0.16	1.65
ปริมาณช่องว่างภายใน (ร้อยละ)	1.93	1.55	12.63
การสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ)	N/A	4.02	43.31

มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตได้จากการนำเศษเสาตอม่อคอนกรีตซึ่งมีกำลังอัดอยู่ระหว่าง 400 ถึง 500 กก/ซม² (ทดสอบโดยใช้ Schmidt hammer) ที่ผ่านการย่อยด้วยเครื่องย่อย จากโรงย่อยเศษคอนกรีตจังหวัดสระบุรี มาทำการแยกความละเอียดด้วยตะแกรงขนาดช่องเปิด 4.75 มม. (เบอร์ 4) เพื่อแยกส่วนที่เป็นมวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 12.5 มม. เมื่อพิจารณาสมบัติจำเพาะของมวลรวม (แสดงดังตารางที่ 2) พบว่ามวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีค่าปริมาณช่องว่างภายในเท่ากับร้อยละ 12.63 โดยปริมาตร ซึ่งสูงกว่าหินปูนย่อยประมาณ

8 เท่า มีค่าการดูดซึมน้ำและค่าปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 5.44 และ 1.65 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าหินปูนย่อยประมาณ 10 เท่า มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.45 ก/ซม³ ซึ่งต่ำกว่าหินปูนย่อยที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.71 ก/ซม³ โดยการกระจายขนาดของมวลรวมหยาบแสดงดังรูปที่ 2

นอกจากนี้การสูญเสียน้ำหนักของมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตที่สัมผัสสารละลายโซเดียมซัลเฟต ตามมาตรฐาน ASTM C88 [15] มีค่าเท่ากับร้อยละ 43.31 โดยน้ำหนัก ซึ่งสูงกว่าหินปูนย่อยประมาณ 10 เท่า เนื่องจากความพรุนที่สูงของมอร์ตาร์เก่าที่ติดรอบๆ ผิวของมวลรวมเดิมทำให้สารละลายโซเดียมซัลเฟตสามารถซึมเข้าสู่ภายในมวลรวมได้ง่าย นอกจากนี้ปฏิกิริยาระหว่าง โซเดียมซัลเฟตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ใน มอร์ตาร์เก่าที่ติดรอบผิวมวลรวมส่งผลให้เกิดการขยายตัวและรอยแตกร้าวในมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต โดยลักษณะทางกายภาพของมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตก่อนและหลังสัมผัสสารละลายโซเดียมซัลเฟตแสดงดังรูปที่ 3

3.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

ตารางที่ 3 แสดงอัตราส่วนผสมคอนกรีต โดยแบ่งตัวอย่างคอนกรีตกำลังสูงออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มแรกคือคอนกรีตกำลังสูงควบคุม (CT) ซึ่งออกแบบส่วนผสมให้มีกำลังอัดประมาณ 600 กก/ซม² ที่อายุ 28 วัน โดยใช้มวลรวมจากธรรมชาติ (หินปูนย่อยและทรายแม่น้ำ) เป็นส่วนผสม และกลุ่มที่สองคือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต โดยใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมดร่วมกับทรายแม่น้ำ นอกจากนี้ใช้เถ้าขาน้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (RA20, RA35 และ RA50) ควบคุมอัตราส่วนน้ำประสิทธิผลต่อวัสดุประสานที่ 0.30 และควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ระหว่าง 15 ถึง 20 ซม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ

ในการผสมคอนกรีต เตรียมมวลรวมหยาบให้อยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้งก่อนผสมคอนกรีต โดยการแช่น้ำไว้ในถังเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และขั้นตอนการผสมคอนกรีตใช้วิธีแบ่งสัดส่วนการผสมออกเป็น 2 ส่วน (two-stage mixing approach proportional-2, TSMA_{p2}) ซึ่งประยุกต์จากข้อเสนอแนะของ Tam และคณะ [16] โดยมีขั้นตอนการผสมดังนี้ ขั้นตอนแรกใส่มวลรวมทั้งหมด (มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด) ในโม่ผสมและใส่

วัสดุประสานครึ่งหนึ่งของปริมาณทั้งหมด แล้วทำการผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลาประมาณ 60 วินาที ขั้นตอนที่สองทำการเติมวัสดุประสานที่เหลือและใส่น้ำทั้งหมดแล้วผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลาในการผสมประมาณ 120 วินาที ซึ่งการผสมคอนกรีตด้วยวิธี TSMA_{p2} สามารถช่วยสร้างแผ่นเจลซีเมนต์เฟสต่างๆที่เกิดจากอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งเจลซีเมนต์เฟสจะไปเคลือบผิวของมวลรวมส่งผลให้รอยต่อระหว่างผิวของมวลรวมกับมอร์ตาร์ใหม่ (interface transition zone, ITZ) มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เจลซีเมนต์เฟสดังกล่าวเข้าไปอุดรอยร้าวและช่องว่างของมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

วัสดุ (กก/ม ³)	CT	RA	RA20	RA35	RA50
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	560	560	450	365	280
เถ้าขานอ้อยบดละเอียด	-	-	110	195	280
หินปูนย่อย ^a	990	-	-	-	-
มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีต ^a	-	325	890	885	880
ทรายแม่น้ำ	750	710	710	705	700
น้ำประสิทธิผล	170	170	170	170	170
สารลดน้ำ ^b	1.5	1.5	2.3	2.8	304
การยุบตัว (ชม.)	15.0	15.5	17.0	17.0	15.5
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30

a หินปูนย่อยและมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเตรียมไว้ในสภาวะอิมมิดีวแห้ง

b สารลดน้ำพิเศษมีน้ำเป็นส่วนผสมอยู่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

3.3 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ทดสอบค่ากำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 [18] โดยใช้คอนกรีตรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 ซม. สูง 20 ซม. ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน โดยแต่ละอายุทดสอบใช้คอนกรีต 3 ตัวอย่างเพื่อเป็นค่าเฉลี่ย

3.4 ทดสอบความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต

การทดสอบความต้านทานซัลเฟตแบ่งคอนกรีตออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

คอนกรีตกลุ่มแรกใช้สำหรับทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต โดยทำการหล่อคอนกรีตขนาด 75×75×285 มม. หลังจากหล่อคอนกรีต 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีความเข้มข้น

ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยวัดค่าการขยายตัวของคอนกรีตหลังจากแช่สารละลายจนกระทั่งอายุ 12 เดือน โดยใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัดคอนกรีต 3 ตัวอย่าง

ส่วนคอนกรีตกลุ่มที่สองใช้สำหรับทดสอบการสูญเสีย น้ำหนักของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต โดยคอนกรีตรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 ซม. สูง 20 ซม. หลังจากหล่อ 24 ชั่วโมง นำคอนกรีตไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตหลังจากแช่สารละลายเป็นเวลา 12 เดือน ดังแสดงในสมการที่ (1)

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

โดยที่ W_L คือร้อยละของน้ำหนักคอนกรีตที่สูญหาย, W_B คือน้ำหนักคอนกรีตก่อนแช่สารละลาย (กรัม) และ W_A คือน้ำหนักคอนกรีตหลังแช่สารละลาย (กรัม)

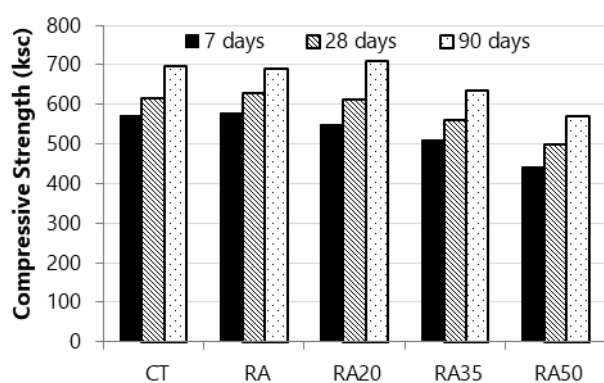
4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 กำลังอัดของคอนกรีต

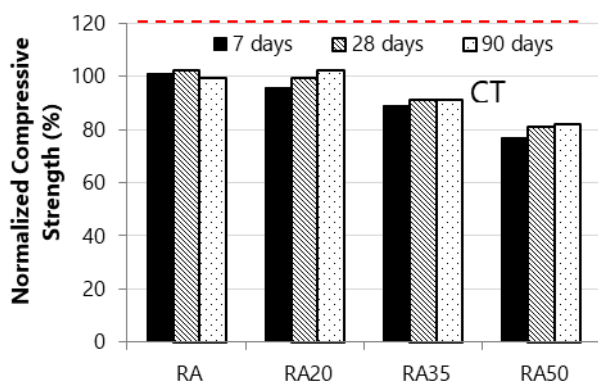
รูปที่ 4 แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆ และรูปที่ 5 แสดงร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อเทียบกับคอนกรีต CT เห็นได้ว่าที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน คอนกรีต CT มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 570, 615 และ 695 กก/ซม² ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีต RA มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีต CT ที่อายุเท่ากัน โดยคอนกรีต RA มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 575, 625 และ 690 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 101, 102 และ 99 ของคอนกรีต CT ตามลำดับ เนื่องจากมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังสูง (กำลังอัดประมาณ 500 กก/ซม²) จะมีความแข็งแรงและมีกำลังการยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ตาร์กับผิวของมวลรวมเดิมที่ดี ดังนั้นการใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตดังกล่าวจึงไม่มีผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีต สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kou และ Poon [19] และ Manzi และคณะ [20] นอกจากนี้การผสมคอนกรีตด้วยวิธี TSMA_{p2} สามารถปรับปรุงความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างมอร์ตาร์ใหม่กับผิวของมวลรวม ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีต RA เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตและแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียด พบว่าการแทนที่เถ้าขานอ้อยบดละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้

คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่อายุ 7 วัน คอนกรีต RA20, RA35 และ RA50 มีกำลังอัดเท่ากับ 550, 510 และ 440 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 96, 89 และ 77 ของคอนกรีต CT ตามลำดับ เนื่องจากการแทนที่เถ้าขาน้อยในปริมาณที่สูงทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานลดลงและไม่เพียงพอในการชดเชยกำลังอัดที่สูญเสียไปเนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลง [21]



รูปที่ 4 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆ



รูปที่ 5 ร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆ เทียบกับคอนกรีต CT

อย่างไรก็ตามเมื่อคอนกรีตอายุเพิ่มขึ้นค่ากำลังอัดมีแนวโน้มที่ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เถ้าขาน้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต RA20 ให้มีค่าเท่ากับ 615 และ 710 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 99 และ 102 ของคอนกรีต CT ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ขณะที่การใช้เถ้าขาน้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้กำลังอัดที่อายุ 28 และ 90 วัน ของคอนกรีต

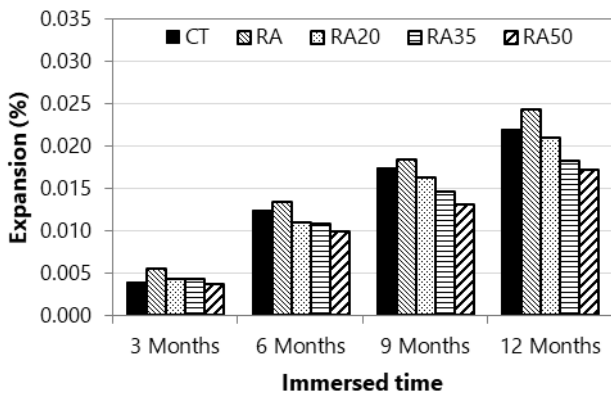
RA35 มีค่าเท่ากับ 560 และ 635 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 91 ของคอนกรีต CT ตามลำดับ และคอนกรีต RA50 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 500 และ 570 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 81 และ 82 ของคอนกรีต CT ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ามวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตและเถ้าขาน้อยบดละเอียดสามารถใช้เป็นวัสดุในการผลิตคอนกรีตกำลังอัดสูงที่มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่า 550 กก/ซม² ตามที่ ACI 363 [22] กำหนดไว้ได้

4.2 การขยายตัวของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียม

การขยายตัวของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 6 เห็นได้ว่าการใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยส่งผลกระทบโดยตรงต่อการลดความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต ซึ่งหลังจากแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นระยะเวลา 6 เดือน ค่าการขยายตัวของคอนกรีต RA สูงกว่าคอนกรีต CT เพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาการแช่ในสารละลายเพิ่มขึ้น (นานกว่า 6 เดือน) การขยายตัวของคอนกรีต RA มีค่าสูงกว่าคอนกรีต CT อย่างเห็นได้ชัด โดยที่ระยะเวลา 12 เดือน คอนกรีต CT และ RA มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.022 และ 0.024 ตามลำดับ เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่ติดอยู่บนพื้นผิวของมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต รวมถึงปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมซัลเฟตกับซีเมนต์เพสต์ใหม่ของคอนกรีตทำให้เกิดยิปซัมและ เอทริงไกต์ ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการขยายตัว [23]

เถ้าขาน้อยบดละเอียดช่วยปรับปรุงความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตได้ และความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าขาน้อยบดละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตและแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าขาน้อยบดละเอียดร้อยละ 20, 35 และ 50 มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมโดยหลังการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 12 เดือน การขยายตัวของคอนกรีต RA20, RA35 และ RA50 มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.021, 0.018 และ 0.017 หรือต่ำกว่าร้อยละ 14, 25 และ 29 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ghafoori และคณะ [2] และ Tangchirapat และคณะ [3] ที่พบว่าวัสดุปอซโซลานช่วยลดการขยายตัวของคอนกรีต

เนื่องจากซัลเฟตได้ การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตทำให้ลดปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งอยู่ในสารประกอบซีเมนต์และจากผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ตามลำดับ ส่งผลให้ปริมาณไฮดรอกไซด์และเอทริงไคต์ที่เกิดขึ้นลดลง [5] นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตลดลง [24]



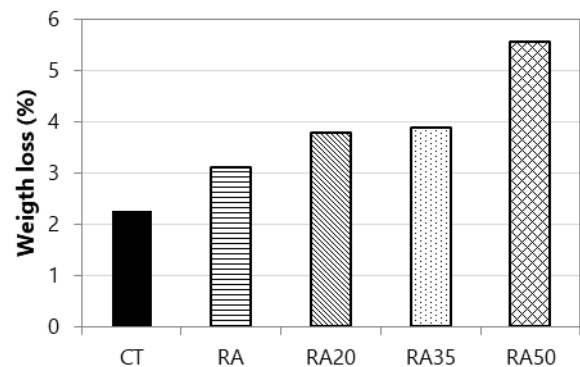
รูปที่ 6 การขยายตัวของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

4.3 การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

รูปที่ 7 แสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตหลังจากแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 12 เดือน พบว่าคอนกรีต CT มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 2.27 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยในส่วนผสมของคอนกรีตส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักสูงขึ้น โดยคอนกรีต RA มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 3.11 โดยน้ำหนัก

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียดในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตส่งผลกระทบต่อค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตอย่างเห็นได้ชัด และการแทนที่เถ้าขานอ้อยบดละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยคอนกรีต RA20, RA35 และ RA50 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 3.79, 3.90 และ 5.58 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Somna และคณะ [10] ที่พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินและเถ้าขานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ส่งผลให้เกิดความเสียหายขึ้นที่บริเวณผิวของ

คอนกรีต และเกิดความเสียหายเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าในส่วนผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ผ่านเข้าสู่ภายในคอนกรีตทางรูพรุนและช่องว่างทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตทำให้เกิดแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึกและไม่รับกำลัง [25] ดังนั้นการเสื่อมสภาพของคอนกรีตที่สัมผัสสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะอยู่ในรูปของการสูญเสียมวลและการขยายตัวที่นำไปสู่การแตกร้าว



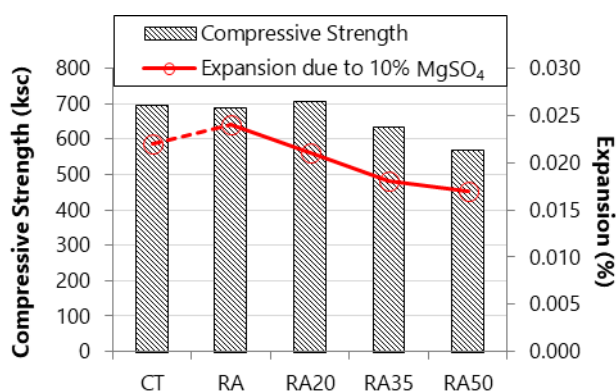
รูปที่ 7 การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักเป็นเวลา 12 เดือน

4.3 อิทธิพลของกำลังอัดและเถ้าขานอ้อยบดละเอียดต่อการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต

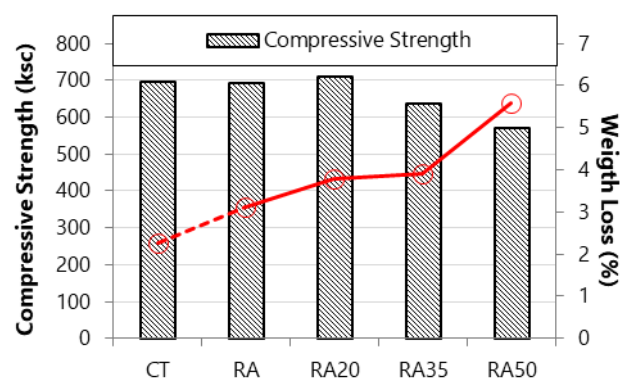
รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 90 วัน และการขยายตัวของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 12 เดือน เห็นได้ว่าการกำลังอัดของคอนกรีตมีผลต่อความต้านทานการขยายตัวเพียงเล็กน้อย ขณะที่มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีอิทธิพลต่อการขยายตัวของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟตอย่างเห็นได้ชัด ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีต CT และ RA มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 695 และ 690 กก/ซม² ขณะที่การขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเท่ากับร้อยละ 0.022 และ 0.024 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามปริมาณการแทนที่เถ้าขานอ้อยบดละเอียดในคอนกรีตมีอิทธิพลต่อการลดการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัด ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีต RA มีกำลังอัดเท่ากับ 690 กก/ซม² และมีการขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเท่ากับร้อยละ 0.024 ขณะที่คอนกรีต RA20, RA35 และ RA50 มีกำลังอัดเท่ากับ 710,

635 และ 570 กก/ชม² และมีการขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเท่ากับร้อยละ 0.021, 0.018 และ 0.017 ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 90 วัน และการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 12 เดือน ดังรูปที่ 9 เห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลกระทบของมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีต่อการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีต CT และ RA มีกำลังอัดเท่ากับ 695 และ 690 กก/ชม² ขณะที่การสูญเสียน้ำหนักมีค่าเท่ากับร้อยละ 2.27 และ 3.11 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตและแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียด พบว่ากำลังอัดและปริมาณการแทนที่เถ้าขานอ้อยบดละเอียดมีอิทธิพลต่อการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตอย่างเห็นได้ชัด ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีต RA มีกำลังอัดเท่ากับ 690 กก/ชม² และการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 3.11 โดยน้ำหนัก ขณะที่คอนกรีต RA20, RA35 และ RA50 มีกำลังอัดเท่ากับ 710, 635 และ 570 กก/ชม² และการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 3.79, 3.90 และ 5.58 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 90 วัน และการขยายตัวของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 12 เดือน



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 90 วัน และการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 12 เดือน

5. สรุปผล

จากผลการวิจัยกำลังอัดและความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อยบดละเอียด สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตให้สูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุปลาย (90 วันขึ้นไป)
2. คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตและเถ้าขานอ้อยบดละเอียดไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 570 ถึง 710 กก/ชม² ซึ่งถือได้ว่าเป็นคอนกรีตกำลังสูง คือค่ากำลังอัดสูงกว่า 550 กก/ชม² ที่กำหนดโดย ACI 363 [22]
3. การใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้ความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตลดลงอย่างเห็นได้ชัด
4. การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น (ไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) สามารถช่วยลดการขยายตัวของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟตได้ อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่สัมผัสกับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (สัญญาเลขที่ CE-KMUTT 6210) และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาภายใต้โครงการทุนพัฒนาอาจารย์และบุคลากรสำหรับสถาบันอุดมศึกษาในเขตพัฒนาเฉพาะกิจจังหวัดชายแดนภาคใต้ประจำปีการศึกษา 2558 อีกทั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ที่สนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการ ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. M. Al-Akhras, "Durability of metakaolin concrete to sulfate attack," *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 9, pp. 1727-1734, 2006.
- [2] N. Ghafoori, M. Najimi, H. Diawara, and M. S. Islam, "Effects of class F fly ash on sulfate resistance of Type V Portland cement concretes under continuous and interrupted sulfate exposures," *Construction and Building Materials*, Vol. 78, No. Supplement C, pp. 85-91, 2015.
- [3] W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, "Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 7, pp. 2641-2646, 2009.
- [4] C. Jaturapitakkul, and W. Tangchirapat, 2010, The use of pozzolanic material in concrete, Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand, 123 p. (in Thai)
- [5] A. Rerkpiboon, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul, "Strength, chloride resistance, and expansion of concretes containing ground bagasse ash," *Construction and Building Materials*, Vol. 101, No. Part 1, pp. 983-989, 2015.
- [6] A. Rerkpiboon, N. Tanawutti Phong, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul, "Compressive strength, water

permeability, and chloride ion penetration of high-volume ground bagasse ash concrete" *Journal of Thailand Concrete Association*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-9, 2018. (in Thai)

- [7] R. Purushothaman, R. R. Amirthavalli, and L. Karan, "Influence of treatment methods on the strength and performance characteristics of recycled aggregate concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 27, No. 5, 2015.
- [8] H. Yang, L. Lv, Z. Deng, and W. Lan, "Residual compressive stress-strain relation of recycled aggregate concrete after exposure to high temperatures," *Structural Concrete*, Vol. 18, No. 3, 479-486, 2017.
- [9] M. Limbachiya, M. S. Meddah, and Y. Ouchagour, "Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 27, No. 1, pp. 439-449, 2012.
- [10] R. Somna, C. Jaturapitakkul, and A. M. Amde, "Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, No. 7, 848-854, 2012.
- [11] P. Rattanachu, W. Tangchirapat, P. Toolkasikorn, and C. Jaturapitakkul, "Compressive strength and steel corrosion of concrete containing recycled coarse aggregate and rice husk ash," *Proceedings in the 20th National Convention on Civil Engineering*, 8-10 July 2015, Chonburi, Thailand, MAT-328. (in Thai)
- [12] I. Karntong, P. Rattanachu, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul, "Use of Ground Bagasse Ash to Improve Chloride Resistance of High Strength Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate," *Proceedings in the 11th Annual Concrete Conference*, 17-19 February 2016, Nakhon Ratchasima, Thailand, pp. MAT-90. (in Thai)
- [13] P. Toolkasikorn, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul, "Strength and chloride resistance of

recycled aggregate concrete containing ground rice husk ash" *Journal of Thailand Concrete Association*, Vol. 2, No. 1, pp. 8-16, 2014. (in Thai)

[14] P. Rattanachu, W. Tangchirapat, and C.Jaturapitakkul, "Mechanical properties of high strength concrete containing recycled concrete aggregate with ground bagasse ash" *Journal of Thailand Concrete Association*, Vol. 4, No. 2, pp. 36-48, 2016. (in Thai)

[15] *Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate*, ASTM C88, 2013.

[16] V.W.Y. Tam, X.F. Gao, and C.M. Tam, "Comparing performance of modified two-stage mixing approach for producing recycled aggregate," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 58, No. 7, pp. 477-484, 2006.

[17] P. Rattanachu, "Use of Bagasse Ash to Improve Mechanical and Durability Properties of High Strength Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate," Doctor Thesis, Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand, 2017. (in Thai)

[18] *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*, ASTM C39/C39M, 2018.

[19] S. C. Kou, and C. S. Poon, "Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 77, pp. 501-508, 2015.

[20] S. Manzi, C. Mazzotti, and M. C. Bignozzi, "Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 37, pp. 312-318, 2013.

[21] L. Lam, Y.L. Wong, and C.S. Poon, "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, 2000.

[22] *ACI 363R: Report on high-strength concrete*, The American Concrete Institute, 2010.

[23] S. T. Lee, H. Y. Moon, R. N. Swamy, S. S. Kim, and J. P. Kim, "Sulfate attack of mortars containing recycled fine aggregates," *Materials Journal*, Vol. 102, No. 4, 2005.

[24] P. Chindapasirt, S. Homwuttiwong, and V. Sirivivatnanon, "Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 7, pp. 1087-1092, 2004.

[25] O. S. B. Al-Amoudi, "Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 24, No. 3, pp. 305-316, 2002.