



Journal of Thailand Concrete Association วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH STRENGTH CONCRETE CONTAINING RECYCLED CONCRETE AGGREGATE WITH GROUND BAGASSE ASH

สมบัติทางกลของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมร่วมกับ
เถ้าขานอ้อยบดละเอียด

ปกป้อง รัตนชู^{1*} วีรชาติ ตั้งจิรภัทร² ชัย จาตุรพิทักษ์กุล³

¹นักศึกษานิเทศศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ARTICLE INFO:

Received: November 7, 2016

Received Revised Form:

December 26, 2016

Accepted: December 27, 2016

ABSTRACT:

This research aims to utilize bagasse ash, a by-product acquired from burning bagasse for an electricity generation power plant in a sugar factory, as a binder to partially replace Portland cement. In addition, recycled concrete aggregate, which was obtained from crushing demolished concrete columns, were used as a substitute for crushed limestone in high strength concrete (HSC). The mechanical properties of concrete including compressive strength, modulus of elasticity, and splitting tensile strength were investigated. The results demonstrated that use of ground bagasse ash (GBA) as 20% by weight of binder to replace OPC could promote the compressive strength of the recycled aggregate concrete (RAC) to be higher than control concrete (CT) at later ages (60 days or more). In addition, all concretes exhibited compressive strengths higher than 55 MPa suggesting that they are high strength concrete. However, the use of recycled concrete aggregate as a full replacement for crushed limestone had negative impacts on the modulus of elasticity and splitting tensile strength of concrete, whereas GBA had a slightly positive effects on modulus of elasticity and splitting tensile strength of RAC.

KEYWORDS: bagasse ash, recycled concrete aggregates, high strength concrete, mechanical property

**Corresponding Author,*

Email address: pokpong.pnu@hotmail.com

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้มุ่งหวังที่จะนำเถ้าขานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเผาขานอ้อยเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงานผลิตน้ำตาลมาทำการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้มีความละเอียดสูงเพื่อใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน นอกจากนี้ได้นำเศษคอนกรีตที่ได้จากการรื้อถอนโครงสร้างเสามาทำการย่อยเพื่อใช้เป็นมวลรวมหยาบแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูง ทำการทดสอบสมบัติทางกลของคอนกรีต ได้แก่ กำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น และกำลังดึงผ่าซีก พบว่าการใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถช่วยพัฒนากำลังอัดที่อายุปลายของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตให้สูงกว่าคอนกรีตควบคุมได้ตั้งแต่อายุ 60 วันขึ้นไป นอกจากนี้คอนกรีตทุกส่วนผสมมีกำลังอัดมากกว่า 55 เมกะปาสคาล ถือได้ว่าเป็นคอนกรีตกำลังสูง อย่างไรก็ตามการใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีผลกระทบด้านลบต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่ากำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตกำลังสูง ในขณะที่เถ้าขานอ้อยมีผลกระทบด้านบวกเล็กน้อยต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่ากำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตกำลังสูง

คำสำคัญ: เถ้าขานอ้อย, มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต, คอนกรีตกำลังสูง, สมบัติทางกล

1. บทนำ

คอนกรีตกำลังสูงตามมาตรฐาน ACI 363 [1] ได้ระบุไว้ว่าต้องเป็นคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดไม่ต่ำกว่า 55 เมกะปาสคาล ซึ่งในปัจจุบันคอนกรีตกำลังสูงนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างอาคารสูง เนื่องจากเหตุผลด้านราคาที่ดินที่สูงขึ้นและขนาดพื้นที่ในการก่อสร้างที่มีอยู่อย่างจำกัด ตลอดจนการแข่งขันทางด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้างในเมืองใหญ่ๆ ของโลก รวมถึงในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล เช่น อาคารมหานคร อาคาร จี ทาวเวอร์ และอาคารสูงอื่นๆ เป็นต้น การใช้คอนกรีตกำลังสูงสามารถช่วยลดขนาดของชิ้นส่วนโครงสร้าง โดยเฉพาะเสา ผนังรับแรงเฉือน เป็นต้น ทำให้น้ำหนักของโครงสร้างลดลง มีพื้นที่ใช้สอยมากขึ้น และส่งผลให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างในภาพรวม

อย่างไรก็ตามการผลิตคอนกรีตเพื่อใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตจำเป็นต้องใช้มวลรวมเป็นส่วนผสม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นมวลรวมที่ได้จากธรรมชาติ เช่น หิน และทราย ซึ่งมวลรวมดังกล่าวมีอยู่ประมาณร้อยละ 60 ถึง 70 ของส่วนผสมในคอนกรีต ดังนั้นจึงส่งผลให้แหล่งมวลรวมตามธรรมชาติที่มีคุณภาพดีมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปี 2558 พบว่าประเทศไทยมีการใช้หินปูนย่อยในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

ประมาณ 95 ล้านตัน [2] ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการศึกษาหาวัสดุต่างๆ เพื่อที่จะนำมาใช้ทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติในส่วนผสมของคอนกรีต

การนำเศษคอนกรีตที่ได้จากการรื้อถอนสิ่งปลูกสร้างมาย่อยเพื่อนำกลับมาใช้เป็นมวลรวมอีกครั้งในส่วนผสมคอนกรีตเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการลดปัญหาที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามการนำมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมาใช้ทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ทำให้คอนกรีตลดความสามารถในการเทลดลงและสูญเสียค่ายุบตัวอย่างรวดเร็ว การทำให้แน่นและตกแต่งผิวหน้าของคอนกรีตทำได้ยากขึ้น ตลอดจนสมบัติทางกลและความทนทานของคอนกรีตลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ จึงได้มีการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น เช่น การปรับปรุงคุณภาพของมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตก่อนนำมาใช้ในการผสมคอนกรีต [3,4] การเลือกใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีคุณภาพสูง [5] เป็นต้น นอกจากนี้ การเลือกใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้ากลบ ซิลิกาฟุ้ง เป็นต้น เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สามารถเพิ่มคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตให้ดีขึ้นได้ [6-8]

เถาขานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากการนำขานอ้อยมาทำการเผาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาล โดยสิ่งที่เหลือจากการเผาคือเถาขานอ้อย ปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานผลิตน้ำตาลเป็นจำนวนมาก โดยในปี พ.ศ.2557/58 มีปริมาณอ้อยที่ใช้ในกระบวนการผลิตประมาณ 105 ล้านตัน [9] เมื่อผ่านกระบวนการเผาพบว่าเหลือเถาขานอ้อยร้อยละ 0.62 ของน้ำหนักอ้อย [10] หรือประมาณ 651,000 ตัน ซึ่งเถาขานอ้อยเหล่านี้ส่วนหนึ่งนำไปใช้เป็นปุ๋ยในด้านการเกษตร (แต่มีสารอาหารสำหรับพืชน้อย) และมีเถาขานอ้อยจำนวนมากที่นำไปทิ้งโดยไม่ได้นำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ จึงก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมบริเวณใกล้เคียง จากงานวิจัยที่ผ่านมา [11, 12] พบว่าเถาขานอ้อยมีออกไซด์ของซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกับวัสดุปอชโซลานชนิดอื่น เช่น เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น เมื่อนำมาบดให้มีขนาดเล็กจะสามารถใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมของคอนกรีต นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติด้านกำลังและความทนทานของคอนกรีตให้ดีขึ้นได้ [12-14]

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการผลิตคอนกรีตเพื่อใช้งานในปัจจุบันนอกจากการผลิตคอนกรีตให้ได้คุณภาพแล้ว สิ่งที่ต้องพิจารณาควบคู่กันคือเรื่องการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและการรักษาสิ่งแวดล้อม ซึ่งการนำเศษคอนกรีตและเถาขานอ้อยมาใช้เป็นอีกทางเลือกที่สามารถช่วยลดภัยพิภพเหล่านี้ได้ ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงได้นำเถาขานอ้อยมาทำการบดให้มีอนุภาคที่เล็กลงเพื่อใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมแทนที่หินปูนย่อยศึกษาสมบัติทางกลของคอนกรีตกำลังสูง ได้แก่ กำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น และกำลังดึงผ่าซีก โดยผลที่ได้จากงานวิจัยนี้นอกจากช่วยส่งเสริมในการนำวัสดุกองทิ้งจากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตแล้ว ยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการนำมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมาใช้ในการพัฒนาและออกแบบคอนกรีตกำลังสูงต่อไป

2. วัสดุและวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสาน

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุประสานประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 [15] และ

เถาขานอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการนำขานอ้อยมาเผาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตน้ำตาล จ.ราชบุรี โดยนำเถาขานอ้อยมาบดจนมีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานที่มีช่องเปิดขนาด 45 ไมโครเมตร (เบอร์ 325) ไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เพื่อเพิ่มความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอชโซลาน

2.2 มวลรวม

มวลรวมที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยมวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต มวลรวมหยาบจากธรรมชาติใช้หินปูนย่อยขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 12.5 มม. (ผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 1/2 นิ้ว และค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4) และมวลรวมละเอียดจากธรรมชาติใช้ทรายแม่น้ำ ซึ่งมีขนาดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ส่วนมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตได้จากการนำเศษโครงสร้างเสาตอม่อคอนกรีตซึ่งมีกำลังอัดประมาณ 55 เมกะปาสกาล (ทดสอบโดยใช้ Schmidt hammer) ที่ผ่านการบดย่อยด้วยเครื่องย่อยคอนกรีตแบบขบ (Jaw crusher) จากนั้นนำเศษคอนกรีตมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 1/2 นิ้ว (ขนาดช่องเปิด 12.5 มม.) และค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 เพื่อใช้เป็นมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต (Recycled Coarse Aggregate, RCA)

2.3 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

งานวิจัยนี้แบ่งตัวอย่างคอนกรีตกำลังสูงออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มแรกคือคอนกรีตกำลังสูงควบคุม (CT) ซึ่งออกแบบส่วนผสมให้มีกำลังอัดประมาณ 60 เมกะปาสกาล ที่อายุ 28 วัน โดยใช้มวลรวมจากธรรมชาติ (หินปูนย่อยและทรายแม่น้ำ) เป็นส่วนผสม และกลุ่มที่สองคือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต โดยใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมดร่วมกับทรายแม่น้ำ นอกจากนี้ใช้เถาขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (สัญลักษณ์ RC20, RC35 และ RC50 ตามลำดับ) โดยนำมวลรวมหยาบที่ใช้ในการผสมคอนกรีตทุกส่วนผสมแช่น้ำไว้ในถังเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้มวลรวมอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) ก่อนผสมคอนกรีต ทำการควบคุมอัตราส่วนน้ำประสิทธิผลต่อวัสดุประสานที่ 0.30 และควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ระหว่าง 15 ถึง 20 ซม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษตามมาตรฐาน ASTM C494 [16] ซึ่งอัตราส่วนผสมคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

ตัวอย่าง	ส่วนผสม (กก/ม ³)							W/B	ค่าการยุบตัว (ซม)
	ปูนซีเมนต์	เถ้าขาน้อย	หินปูนย่อย ^a	มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต ^a	ทราย	น้ำประสิทธิผล	สารลดน้ำ ^b		
CT	560	-	990	-	750	170	1.5	0.30	15.0
RC	560	-	-	925	710	170	1.5	0.30	15.5
RC20	450	110	-	890	710	170	2.3	0.30	17.0
RC35	365	195	-	885	705	170	2.8	0.30	17.0
RC50	280	280	-	880	700	170	3.4	0.30	15.5

a หินปูนย่อยและมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเตรียมไว้ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง

b สารลดน้ำพิเศษมีน้ำเป็นส่วนผสมอยู่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

ขั้นตอนการผสมคอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อยและคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตใช้วิธีการแบ่งสัดส่วนการผสมออกเป็น 2 ส่วน (two-stage mixing approach proportional-2, TSMA_{p2}) ซึ่งประยุกต์จากคำแนะนำของ Tam และคณะ [17] พบว่าการผสมคอนกรีตด้วยวิธี TSMA_{p2} สามารถช่วยสร้างแผ่นเจลซีเมนต์เฟสต่างๆ ที่เกิดจากอัตราส่วนที่ค่อนข้างต่ำของน้ำต่อวัสดุประสาน ซึ่งเจลซีเมนต์เฟสดังกล่าวจะเข้าไปอุดรอยร้าวและช่องว่างของมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต นอกจากนี้เจลซีเมนต์เฟสจะไปเคลือบผิวของมวลรวม ส่งผลให้รอยต่อระหว่างผิวของมวลรวมกับมอร์ตาร์ใหม่ (interface transition zone, ITZ) มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยวิธีการผสมแบบ TSMA_{p2} มีขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกใส่มวลรวมทั้งหมด (มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด) ในโม่ผสมและใส่วัสดุประสานครึ่งหนึ่งของปริมาณทั้งหมด แล้วทำการผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลาประมาณ 60 วินาที ขั้นตอนที่สองทำการเติมวัสดุประสานที่เหลือและใส่น้ำทั้งหมดแล้วผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลาในการผสมประมาณ 120 วินาที

2.4 การทดสอบสมบัติของเถ้าขาน้อย

สมบัติทางกายภาพของเถ้าขาน้อยที่ทดสอบ ได้แก่ ความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM C 188 [18] ความละเอียดโดยวิธีร่อนแบบเปียก (Wet Sieve Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM C 430 [19] และทดสอบสมบัติทางเคมีโดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)

2.5 การทดสอบสมบัติของมวลรวม

ทดสอบหาความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C 127 [20] ทดสอบขนาดคละและโมดูลัส

ความละเอียดของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C 136 [21] นอกจากนี้ทดสอบหาค่าการบดบี้ของมวลรวมตามมาตรฐาน BS 812-110 [22]

2.6 การทดสอบสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว

ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 ซม. สูง 20 ซม. ที่อายุการบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน สำหรับการทดสอบหาค่ากำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 39 [23] และ ASTM C 469 [24] ตามลำดับ ทำการทดสอบกำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 496 [25] โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 ซม. สูง 20 ซม. ที่อายุการบ่ม 90 วัน

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าขาน้อย

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

วัสดุประสาน	ความถ่วงจำเพาะ	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ร้อยละ)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	3.15	20.0
เถ้าขาน้อยจากโรงงาน	1.92	60.1
เถ้าขาน้อยหลังบดละเอียด	2.27	0.7

ตารางที่ 2 แสดงสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานพบว่าเถ้าขาน้อยก่อนบดซึ่งมาจากโรงงานมีขนาดอนุภาคค้าง

ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (45 ไมครอน) ร้อยละ 60.1 โดยน้ำหนัก (มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.92) เมื่อนำเข้าชานอ้อยมาบดด้วยเครื่องบดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง (8,000 รอบ) พบว่ามีขนาดอนุภาคค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ลดลงเหลือร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนัก (มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.27) ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีขนาดอนุภาคค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าถ้าชานอ้อยที่มีความละเอียดสูงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีในส่วนผสมของคอนกรีตได้ [11, 12]

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเข้าชานอ้อย (แสดงดังตารางที่ 3) พบว่ามี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 69.3 และมีผลรวมของปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 76.1 นอกจากนี้มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับร้อยละ 7.2 ซึ่งต่ำกว่างานวิจัยที่ผ่านมา [11, 14, 26] เนื่องจากเทคโนโลยีในการเผาในปัจจุบันมีการพัฒนามากขึ้น ดังนั้นกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของชานอ้อยสามารถช่วยลดค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาได้

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	เข้าชานอ้อย บดละเอียด
Silicon Dioxide (SiO_2)	20.1	69.3
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	4.8	3.9
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	3.4	2.9
Calcium Oxide (CaO)	65.4	5.7
Magnesium Oxide (MgO)	1.3	1.0
Potassium Oxide (K_2O)	2.7	3.8
Sulfur Trioxide (SO_3)	0.1	1.2
Loss On Ignition (LOI)	1.7	7.2
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	-	76.1

3.2 สมบัติทางกายภาพของมวลรวม

มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีความเป็นเหลี่ยมมุมสูง สภาพผิวขรุขระ และมีซีเมนต์เฟสท์หรือมอร์ตาร์จากเศษคอนกรีตเดิมยึดเกาะที่ผิวของมวลรวมแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 มวลรวมหยาบ

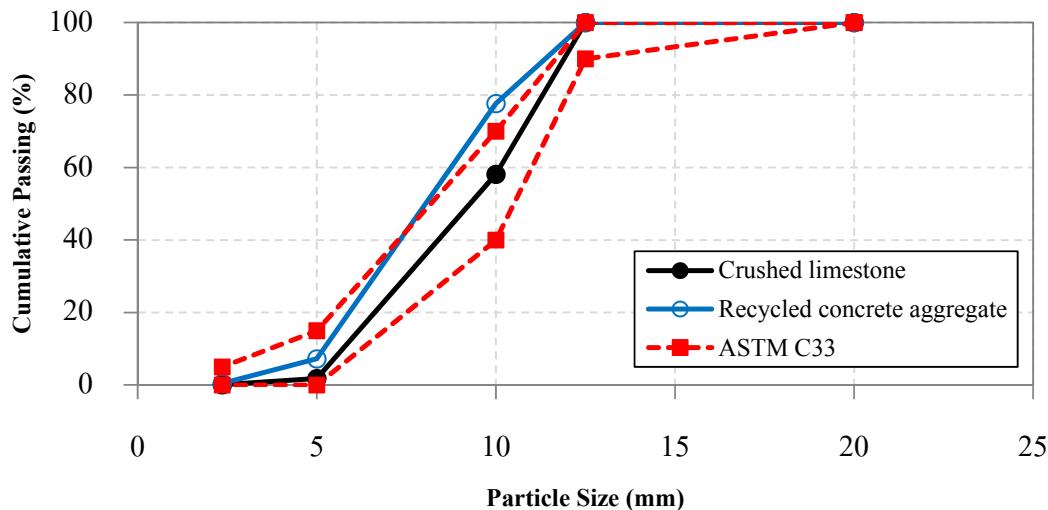
ตารางที่ 4 แสดงสมบัติทางกายภาพของมวลรวม พบว่ามวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าการดูดซึมน้ำและค่าปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 5.44 และ 1.65 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าหินปูนย่อยประมาณ 10 เท่า ทั้งนี้มีผลมาจากปริมาณช่องว่างภายในมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีค่าเท่ากับร้อยละ 12.63 โดยปริมาตร ซึ่งสูงกว่าหินปูนย่อยประมาณ 8 เท่า สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่พบว่าปริมาณช่องว่างของซีเมนต์เฟสท์และมอร์ตาร์ที่ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมเดิมส่งผลให้ปริมาณช่องว่างภายในมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตสูงกว่าหินปูนย่อย ซึ่งช่องว่างดังกล่าวส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำและปริมาณความชื้นของมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตสูงขึ้น [27, 28] นอกจากนี้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2.45 และ 1380 กก/ม³ ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าหินปูนย่อยที่มีค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2.71 และ 1480 กก/ม³ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าการบดบี้ของมวลรวมร้อยละ 25.7 ซึ่งสูงกว่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับหินปูนย่อยที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 22.0 ทั้งนี้มีผลมาจากความแข็งแรงของซีเมนต์เฟสท์และมอร์ตาร์เดิมของมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตรวมถึงแรงยึดเหนี่ยวที่สูงระหว่างมอร์ตาร์และมวลรวมเดิมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังสูง (ประมาณ 50 เมกะปาสคาล)

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอนุภาคของมวลรวมแสดงดังรูปที่ 2 พบว่ามวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่าหินปูนย่อย นอกจากนี้ค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและหินปูนย่อยมีค่าเท่ากับ 6.13 และ 6.40 ตามลำดับ (แสดงดังตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 สมบัติของมวลรวม

คุณสมบัติ	หินปูนย่อย	มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต
โมดูลัสความละเอียด	6.40	6.13
ความถ่วงจำเพาะ	2.71	2.45
การดูดซึมน้ำ (%)	0.57	5.44
ปริมาณความชื้น (%)	0.16	1.65

ปริมาณช่องว่าง (%)	1.55	12.63
การบดบี้ (%)	22.0	25.7
หน่วยน้ำหนัก (กก/ม ³)	1480	1380



รูปที่ 2 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ

3.3 กำลังอัดของคอนกรีต

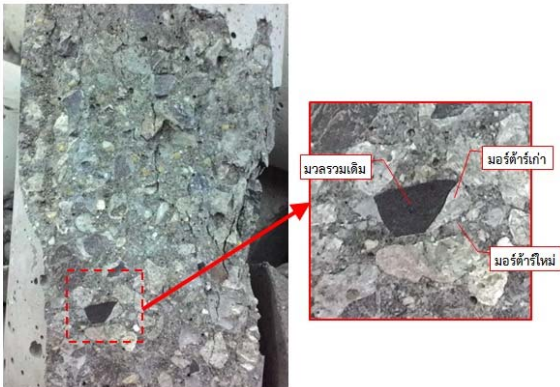
ตารางที่ 5 แสดงค่ากำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อเทียบกับคอนกรีต CT พบว่าคอนกรีต RC มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีต CT ที่อายุเท่ากัน โดยที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน คอนกรีต RC มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 57.7, 62.7, 67.0 และ 69.1 เมกะปาสกาล หรือคิดเป็นร้อยละ 101, 102, 100, และ 99 ของคอนกรีต CT ตามลำดับ เห็นได้ว่าการใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง (กำลังอัดประมาณ 50 เมกะปาสกาล) ไม่มีผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kou และ Poon [5] และ López Gayarre และคณะ [29] เนื่องจากมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังสูงจะมีความแข็งแรงและมีกำลังการยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต้าร์กับผิวของมวลรวมเดิมที่ดี ส่งผลให้การวิบัติของคอนกรีตเมื่อรับกำลังอัดเกิดขึ้นที่บริเวณมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต ซึ่งมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับการวิบัติของคอนกรีต

กำลังสูงที่ใช้หินปูนย่อยคือเป็นแบบผ่าหิน (แสดงดังรูปที่ 3) นอกจากนี้การผสมคอนกรีตโดยวิธี TSMA_{p2} สามารถปรับปรุงความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างมอร์ต้าร์ใหม่กับผิวของมวลรวม ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของ RC คอนกรีตเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5 กำลังอัดและร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตเทียบกับคอนกรีต CT

ตัวอย่างคอนกรีต	กำลังอัด (เมกะปาสกาล) – ร้อยละของกำลังอัดเทียบกับคอนกรีต CT (%)			
	7 วัน	28	60	90 วัน
CT	57.1-	61.6	67.0	69.7-100
RC	57.7-	62.7	67.0	69.1-99
RC20	54.9-96	61.3	67.7	70.8-102
RC35	50.9-89	56.0	62.0	63.6-91

RC50	44.2-77	49.9	53.9	56.9-82
------	---------	------	------	---------



รูปที่ 3 การวิบัติของคอนกรีตกำลังสูงที่ไข่มวลรวมจากการย่อย
เศษคอนกรีตเป็นแบบผ่าหิน

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าขานอ้อย
บดละเอียดในคอนกรีตที่ไข่มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต
ส่งผลให้ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มที่ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้
เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20
โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถพัฒนาค่ากำลังอัดของคอนกรีต
RC20 ให้มีค่าเท่ากับ 54.9, 61.3, 67.7 และ 70.8 เมกะปาสกาล
หรือคิดเป็นร้อยละ 96, 99, 101, และ 102 ของคอนกรีต CT ที่
อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ เห็นได้ว่าเถ้าขานอ้อย
บดละเอียดสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในการปรับปรุงกำลัง
อัดของคอนกรีตกำลังสูงที่ไข่มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตได้
อย่างไรก็ตามการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียดใน
ปริมาณที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)
ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง โดยที่อายุ 7, 28, 60
และ 90 วัน คอนกรีต RA35 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 50.9, 56, 62.0
และ 63.6 เมกะปาสกาล หรือคิดเป็นร้อยละ 89, 91, 92 และ 91
ของคอนกรีต CT ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีต RC50 มีค่ากำลังอัด
เท่ากับ 44.2, 49.9, 53.9 และ 56.9 เมกะปาสกาล หรือคิดเป็น
ร้อยละ 77, 81, 80 และ 82 ของคอนกรีต CT ตามลำดับ
เนื่องจากการแทนที่เถ้าขานอ้อยในปริมาณที่สูงทำให้ปริมาณ
ปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้ Ca(OH)_2 ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งเป็น
สารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานลดลงและไม่เพียงพอ
ในการชดเชยกำลังอัดที่สูญเสียไปเนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่
ลดลง [30]

นอกจากนี้พบว่าคอนกรีตที่ไข่มวลรวมจากการย่อยเศษ
คอนกรีตทั้งแทนที่และไม่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อย
บดละเอียดมีค่ากำลังอัดที่สูงกว่า 55 เมกะปาสกาล จึงจัดเป็น
คอนกรีตกำลังสูงตามที่ ACI 363 [1] กำหนดไว้

3.4 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

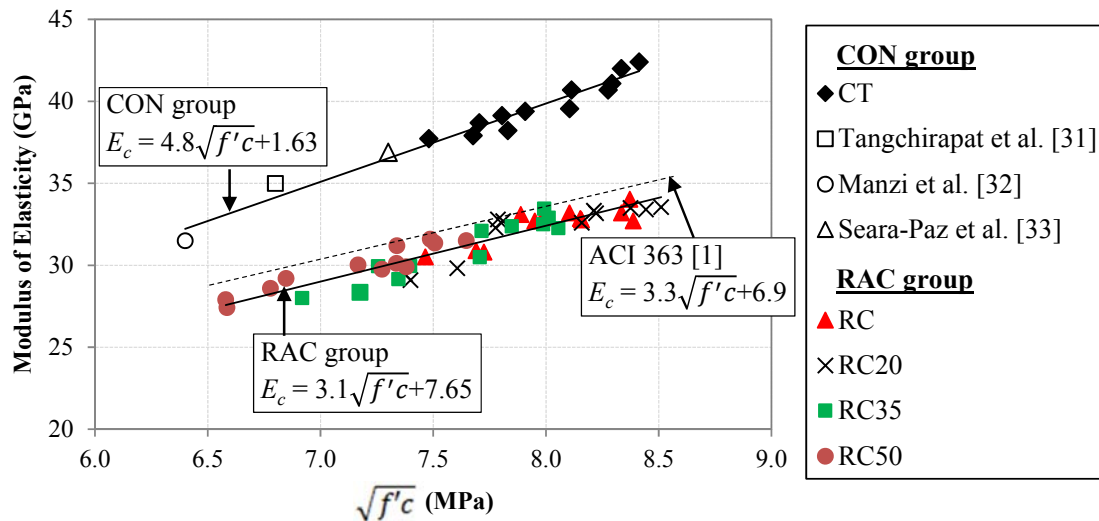
ตารางที่ 6 แสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต พบว่า
คอนกรีตที่ไข่มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีค่า
โมดูลัสยืดหยุ่นลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต
ควบคุมที่อายุเท่ากัน โดยที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน คอนกรีต
CT มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 38.12, 38.92, 40.32 และ 41.83
จิกะปาสกาล ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีต RC มีค่าโมดูลัส
ยืดหยุ่นเท่ากับ 30.74, 32.89, 32.94 และ 33.31 จิกะปาสกาล
ตามลำดับ สอดคล้องจากงานวิจัยที่ผ่านมา [28, 31] ที่พบว่า
ซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ที่ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมเดิมมีความพรุน
ที่สูง (สังเกตได้จากมีปริมาณช่องว่างของมวลรวมที่สูงกว่าหินปูน
ย่อยถึง 8 เท่า แสดงดังตารางที่ 4) ส่งผลให้มวลรวมจากการย่อย
เศษคอนกรีตเกิดการเสียรูปได้ง่ายเมื่อมีน้ำหนักรวมกระทำบน
มวลรวม ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
ต่ำลงเมื่อไข่มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม
นอกจากนี้เมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้น (มีกำลังอัดเพิ่มขึ้น) ส่งผลให้
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตามการใช้
เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 50 โดย
น้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าส่งผลกระทบบต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ
คอนกรีตที่ไข่มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 6 โมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดดึงผ่าซีกของคอนกรีต

ตัวอย่างคอนกรีต	โมดูลัสยืดหยุ่น (จิกะปาสกาล)				กำลังดึงผ่าซีก (เมกะปาสกาล)
	7 วัน	28	60 วัน	90 วัน	90 วัน
CT	38.1	38.9	40.3	41.8	5.5
RC	30.7	32.9	32.9	33.3	4.8
RC20	29.5	32.6	33.0	33.5	4.9
RC35	28.8	29.9	32.3	32.9	4.6
RC50	28.0	29.7	30.4	31.5	4.4

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและรากที่สองของค่ากำลังอัดของคอนกรีต และได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่ทดสอบโดย Tangchirapat และคณะ [31] Manzi และคณะ [32] และ Seara-Paz และคณะ [33] มาร่วมใช้ในการวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาคอนกรีตกำลังสูงที่มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกัน พบว่าการใช้มวลรวม

จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าต่ำกว่าประมาณร้อยละ 17 ถึง 19 เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อย (กำลังอัดมีค่าประมาณ 55 ถึง 72 เมกะปาสกาล) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่พบว่าคอนกรีตกำลังปกติ (ประมาณ 30 ถึง 50 เมกะปาสกาล) ที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าประมาณร้อยละ 11 ถึง 20 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม [28, 31] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสร้างสมการเพื่อใช้



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและรากที่สองของกำลังอัดของคอนกรีต

ในการคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตทั้งแทนที่และไม่แทนที่หินปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียดแสดงดังสมการที่ 1

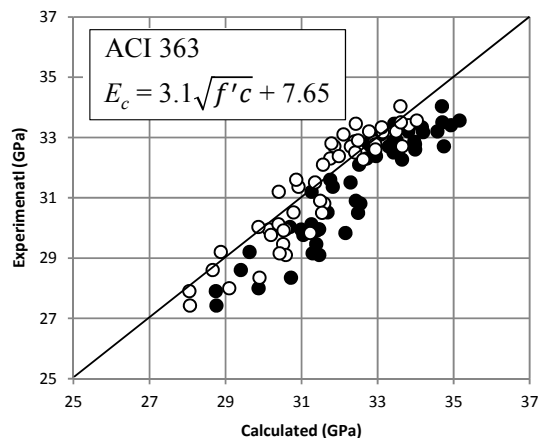
$$E_c = 3.1\sqrt{f'c} + 7.65 \quad (1)$$

เมื่อ E_c และ $f'c$ คือโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (จิกะปาสกาล) และกำลังอัดของคอนกรีต (เมกะปาสกาล) ที่อยู่ในช่วงระหว่าง 45 ถึง 70 เมกะปาสกาล, ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 1 และสมการของ ACI 363 [1] กับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5 พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 1 มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากการทดสอบมากกว่าการคำนวณโดยใช้สมการของ ACI 363 [1] โดยค่าโมดูลัส

ยืดหยุ่นของคอนกรีตที่คำนวณจากสมการที่ 1 มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 5.4 ในขณะที่การคำนวณโดยใช้สมการของ ACI 363 [1] มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 8.1 เนื่องจากสมการของ ACI 363 [1] วิเคราะห์และใช้ผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมเบาบางส่วนซึ่งมีสมบัติความต้านทานต่อการเสีรूपที่ต่ำกว่ามวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต ส่งผลให้ค่า

โมดูลัสยืดหยุ่นที่คำนวณจากสมการ ACI 363 [1] สูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบไม่มาก



รูปที่ 5 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่และไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียดที่ได้จากการคำนวณกับผลจากการทดสอบ

3.5 กำลังดึงผ้าซีกของคอนกรีต

ค่ากำลังดึงผ้าซีกของคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 6 เห็นได้ว่าการใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยในคอนกรีตกำลังสูงส่งผลให้ค่ากำลังดึงผ้าซีกลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับคอนกรีต CT โดยคอนกรีต RC มีค่ากำลังดึงผ้าซีกเท่ากับ 4.8 เมกะปาสคาล หรือลดลงร้อยละ 12.5 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT สอดคล้องกับงานวิจัยของ Matias และคณะ [34] ที่พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติทั้งหมดมีค่ากำลังดึงผ้าซีกลดลงร้อยละ 4-17 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม แสดงว่าความพรุนของซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ที่ติดอยู่บนผิวของมวลรวมเดิมทำให้ความแข็งแรงของมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตลดลง ส่งผลให้ค่ากำลังดึงผ้าซีกของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตลดลง

การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตพบว่า มีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อค่ากำลังดึงผ้าซีกของคอนกรีต โดยคอนกรีต RC20, RC35 และ RC50 มีค่ากำลังดึงผ้าซีกเท่ากับ 4.93, 4.56 และ 4.39 เมกะปาสคาล หรือลดลงร้อยละ 10.5, 18 และ 19.5 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงผ้าซีกและกำลังอัดของคอนกรีต โดยแบ่งคอนกรีตเป็น 2 กลุ่มได้แก่ กลุ่ม CON คือคอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อย และกลุ่ม RAC คือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่และไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียด นอกจากนี้ได้นำผลการทดสอบของ Tangchirapat และคณะ [31] Martias และคณะ [34] และ Buranasing [35] มาร่วมใช้ในการวิเคราะห์ พบว่ากำลังดึงผ้าซีกเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดที่เท่ากันพบว่าคอนกรีตกลุ่ม RAC มีค่ากำลังดึงผ้าซีกต่ำกว่าคอนกรีตกลุ่ม CON เมื่อพิจารณาในช่วงกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง (กำลังอัดมีค่าระหว่าง 55 ถึง 70 เมกะปาสคาล) พบว่าคอนกรีตกลุ่ม RAC มีค่ากำลังดึงผ้าซีกต่ำกว่าคอนกรีตกลุ่ม CON ประมาณร้อยละ 12.0 นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังดึงผ้าซีกที่คำนวณได้จากสมการตามมาตรฐาน ACI 363 [1] พบว่าคอนกรีตกำลังสูง (กำลังอัดระหว่าง 55 ถึง 70 เมกะปาสคาล) ที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยและแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียดร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่ากำลังดึงผ้าซีกต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการตามมาตรฐาน ACI 363 [1] ประมาณร้อยละ 3.3 ขณะที่คอนกรีตกำลังสูงที่ใช้หินปูนย่อยมีค่ากำลังดึงผ้าซีกต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการตามมาตรฐาน ACI 363 [1] ประมาณร้อยละ 10.7 ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้สามารถสร้างสมการสำหรับทำนายค่ากำลังดึงผ้าซีกของคอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อยและคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมร่วมกับเถ้าขานอ้อยได้ดังสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

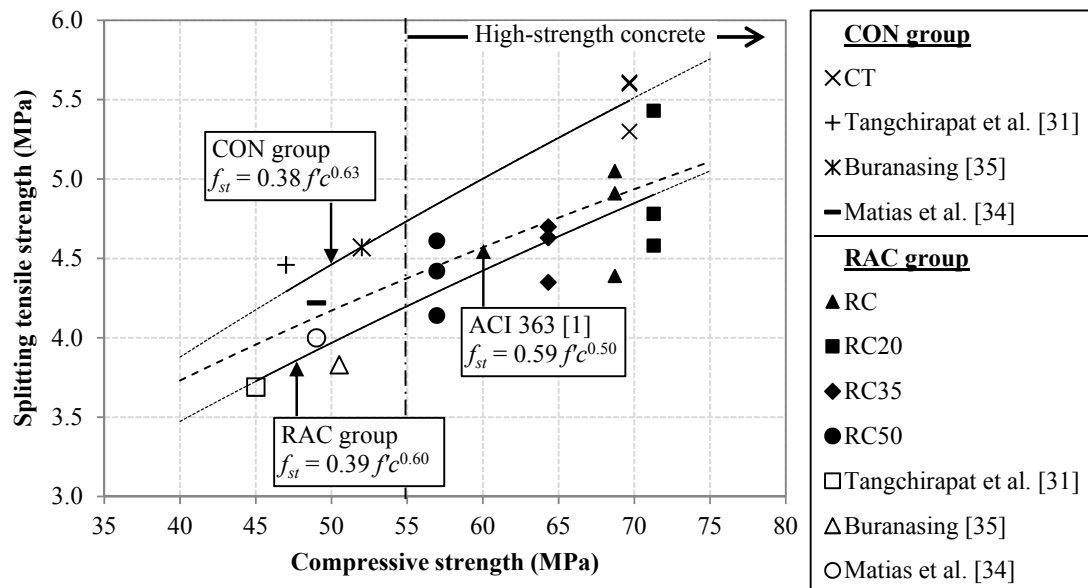
สำหรับคอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อย

$$f_{st} = 0.38 f_c^{0.63} \quad (2)$$

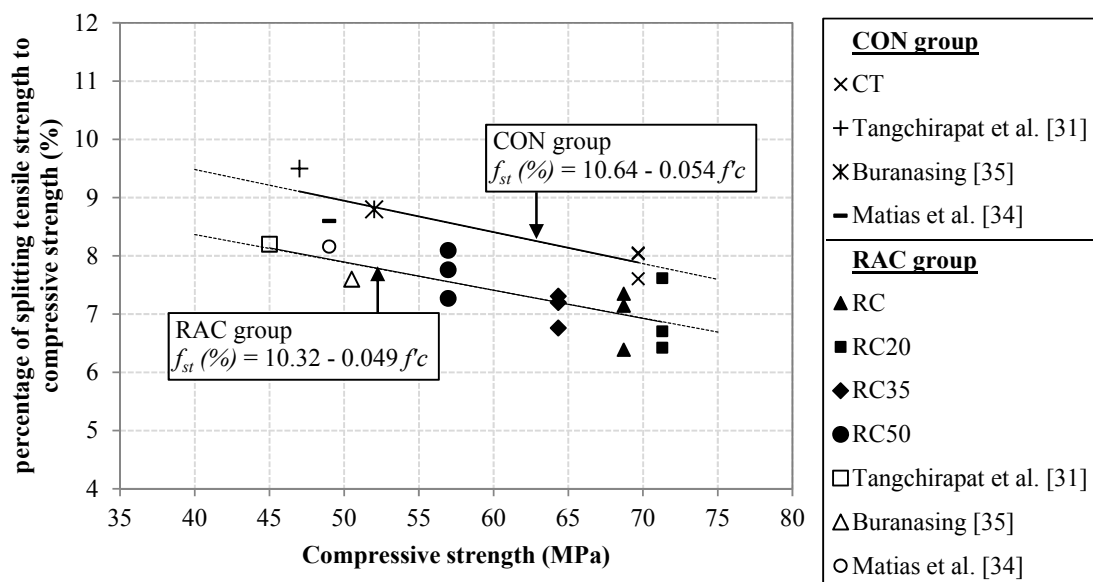
สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต

$$f_{st} = 0.39 f_c^{0.60} \quad (3)$$

เมื่อ f_{st} และ f_c คือกำลังดึงผ้าซีกของคอนกรีต (เมกะปาสคาล) และกำลังอัดของคอนกรีต (เมกะปาสคาล) ที่อยู่ในช่วงระหว่าง 45 ถึง 70 เมกะปาสคาล, ตามลำดับ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงผ่าซีกและกำลังอัดของคอนกรีต



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของกำลังดึงผ่าซีกเทียบกับกำลังอัดและกำลังอัดของคอนกรีต

อย่างไรก็ตามการนำเสนอค่ากำลังดึงผ่าซีกในรูปแบบร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตสามารถช่วยให้สะดวกต่อการนำไปใช้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้หาความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของกำลังดึงผ่าซีกเทียบกับกำลังอัดและกำลังอัดของคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 7 โดยแบ่งคอนกรีตเป็น 2 กลุ่มได้แก่ กลุ่ม CON คือคอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อย และกลุ่ม RAC คือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่และไม่แทนที่หินปูนซีเมนต์ด้วยเถ้า

ขานอ้อยบดละเอียด โดยนำผลการทดสอบของ Tangchirapat และคณะ [31] Martias และคณะ [34] และ Buranasing [35] มาร่วมใช้ในการวิเคราะห์ พบว่าร้อยละของกำลังดึงผ่าซีกเทียบกับกำลังอัดลดลงเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณา คอนกรีตที่มีกำลังอัดระหว่าง 45 ถึง 70 เมกะปาสคาล เห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อยมีกำลังดึงผ่าซีกเทียบกับกำลังอัดเท่ากับร้อยละ 8 ถึง 9 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) ขณะที่

คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมร่วมกับเถ้าขานอ้อยมีกำลังดึงผ้าซีกเทียบกับกำลังอัดเท่ากับร้อยละ 7 ถึง 8 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

สำหรับคอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อย

$$f_{st} (\%) = 10.64 - 0.054 f_c \quad (4)$$

สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต

$$f_{st} (\%) = 10.32 - 0.049 f_c \quad (5)$$

เมื่อ $f_{st} (\%)$ และ f_c คือร้อยละของกำลังดึงผ้าซีกเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีต (%) และกำลังอัดของคอนกรีต (เมกะปาสคาล) ที่อยู่ในช่วงระหว่าง 45 ถึง 70 เมกะปาสคาล, ตามลำดับ

4. สรุปผลการวิจัย

4.1 มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังสูงและเถ้าขานอ้อยบดละเอียด (แทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) สามารถใช้เป็นส่วนผสมในการออกแบบคอนกรีตกำลังสูงได้ โดยคอนกรีตมีค่ากำลังอัดที่สูงกว่า 55 เมกะปาสคาลตามมาตรฐาน ACI 363 [1] กำหนด นอกจากนี้การใช้เถ้าขานอ้อยเป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถพัฒนากำลังอัดให้สูงกว่าคอนกรีตควบคุมเมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้น

4.2 มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีผลกระทบโดยตรงต่อการลดลงของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่ากำลังดึงผ้าซีกของคอนกรีตกำลังสูงเมื่อนำมวลรวมดังกล่าวมาใช้เป็นส่วนผสมแทนที่หินปูนย่อย ในขณะที่การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์มีผลกระทบด้านบวกเล็กน้อยต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่ากำลังดึงผ้าซีกของคอนกรีต

4.3 ค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตทั้งแทนที่และไม่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียดส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังดึงผ้าซีกเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามร้อยละของกำลังดึงผ้าซีกเทียบกับกำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาภายใต้โครงการทุนพัฒนาอาจารย์และบุคลากรสำหรับสถาบันอุดมศึกษาในเขตพัฒนา

เฉพาะกิจจังหวัดชายแดนภาคใต้ประจำปีการศึกษา 2558 และจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาภายใต้โครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี นอกจากนี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ภายใต้โครงการทุนวิจัยและวิชาการตามแผนและกลยุทธ์เพื่อการพัฒนา (สัญญาเลขที่ CE-KMUTT 5907) ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ACI 363 R: *Report on High-Strength Concrete*, The American Concrete Institute, 2010.
- [2] Department of Primary Industries and Mines. *Report on mineral consumption of thailand in 2558* [Online]. Available: <http://www7.dpim.go.th/stat/consumption.php>
- [3] H.K.A. Al-Bayati, P.K. Das, S.L. Tighe, and H. Baaj, "Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate" *Construction and Building Materials*, Vol. 112, pp. 284-298, 2016.
- [4] J. Li, H. Xiao, and Y. Zhou, "Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete" *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No.3, pp. 1287-1291, 2009.
- [5] 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.
- [6] W. Tangchirapat, S. Khamklai, and C. Jaturapitakkul, "Use of ground palm oil fuel ash to improve strength, sulfate resistance, and water permeability of concrete containing high amount of recycled concrete aggregates" *Materials & Design*, Vol. 41, pp. 150-157, 2012.
- [7] 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, pp. 8-16, 2014. (in Thai)

[8] R. Somna and C. Jaturapitakkul, "Use of ground bagasse ash to improve compressive strength, water permeability, and chloride resistance of recycled aggregate concrete" *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 4, pp. 369-381, 2011. (in Thai)

[9] Office of Cane and Sugar Board, Ministry of Industry Thailand. *Report on total cane crushing and sugar production 2014 / 2015* [Online]. Available: <http://product.ocsb.go.th/Default>

[10] G.C. Cordeiro, R.D.T. Filijp, E.M.R. Fairbairt, M.M.T. Luis, and C.H. Oliver, "Influence of mechanical grind on the pozzolanic activity of residual sugarcane bagasse ash", in *The International Conference on Use of Recycled Materials in Building and Structure*, Barcelona, pp. 1-9, 2004.

[11] G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho, L.M. Tavares, and E.M.R. Fairbairn, "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, 2008.

[12] A. Rerkpiboon, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul, "Strength, chloride resistance, and expansion of concretes containing ground bagasse ash." *Construction and Building Materials*, Vol. 101, Part 1, pp. 983-989, 2015.

[13] N. Chusilp, C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, "Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete." *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 11, pp. 3352-3358, 2009.

[14] S. Rukzon, and P. Chindaprasirt, "Utilization of bagasse ash in high-strength concrete." *Materials & Design*, Vol. 34, pp. 45-50, 2012.

[15] *Standard Specification for Portland Cement*, ASTM C150/C150M, 2016.

[16] *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*, ASTM C494/C494M, 2016.

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

[18] *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*, ASTM C188, 2016.

[19] *Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- μ m (No. 325) Sieve*, ASTM C430, 2015.

[20] *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*, ASTM C127, 2015.

[21] *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, ASTM C136/C136M, 2014.

[22] *Testing aggregates. Methods for determination of aggregate crushing value (ACV)*, BS 812-110, 1990.

[23] *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM C39/C39M, 2016.

[24] *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, ASTM C469/C469M, 2014.

[25] *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM C496/C496M, 2004.

[26] K. Montakarnitwong, N. Chusilp, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul, "Strength and heat evolution of concretes containing bagasse ash from thermal power plants in sugar industry." *Materials and Design*, Vol. 49, pp. 414-420, 2013.

[27] 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.

[28] R. Somna, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, and P. Rattanachu, "Effect of the Water to Binder Ratio and Ground Fly Ash on Properties of Recycled Aggregate Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 24, No. 1, 2012.

[29] F. López Gayarre, C. López-Colina Pérez, M.A. Serrano López, and A.Domingo Cabo, "The effect of curing conditions on the compressive strength of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Materials*, Vol. 53, pp. 260-266, 2014.

[30] 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.

[31] W. Tangchirapat, R. Buranasing, C. Jaturapitakkul, and P. Chindapasirt, "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, 2008.

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

[33] S. Seara-Paza, V. Corinaldesib, B. González-Fonteboac, and F. Martínez-Abellac, "Influence of recycled coarse aggregates characteristics on mechanical properties of structural concrete" *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 20, No. S1, pp. s123-s139, 2016.

[34] D. Matias, J. de Brito, A. Rosa, and D. Pedro "Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers." *Construction and Building Materials*, Vol. 44, pp. 101-109, 2013.

[35] R. Buranasing, "A Study of Strength of Recycled Aggregate Concrete Containing Fly Ash and Rice Husk-Bark Ash," Master Thesis, Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand, 2004. (in Thai)