

## การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในคอนกรีตที่ผสมรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า

### Use of Rice Husk-Bark Ash in Concrete Containing Recycled Concrete Aggregates

วีระชาติ ตั้งจิรภัทร<sup>1</sup> รัชนี บูรณสิงห์<sup>2</sup> ชัย จาตุรพิทักษ์กุล<sup>2</sup> ปริญญญา จินดาประเสริฐ<sup>1</sup>

Weerachart Tangchirapat<sup>1</sup> Rak Buranasing<sup>2</sup> Chai Jaturapitakkul<sup>2</sup> Prinya Chidaprasit<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10140

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติ (หินปูนย่อยและทรายแม่น้ำ) โดยนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มาปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 10.8 ไมครอน จากนั้นนำไปแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ร่วมกับการใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต (RCA) เป็นมวลรวมหยาบทั้งหมด และใช้มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต (RFA) แทนที่ทรายแม่น้ำในอัตราร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ผลการวิจัยพบว่าคอนกรีตที่ผสมรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมซึ่งใช้หินปูนย่อยและทรายแม่น้ำ เป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดตามลำดับ ขณะที่การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม (คอนกรีตที่ใช้หินปูนย่อยและทรายแม่น้ำ และใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานอย่างเดียว) อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในอัตราที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตสดสูญเสียค่าการยุบตัวเร็วกว่าคอนกรีตควบคุม ด้านกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่ผสมรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 8.15 ของกำลังอัด และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และต่ำกว่าค่าที่ได้จากสมการของ ACI 318 ประมาณร้อยละ 4

#### Abstract

In this study, ground rice husk-bark ash (RHBA) was used as a pozzolanic material in concrete containing recycled concrete aggregates. The concrete was prepared by using 100% of coarse recycled concrete aggregate (RCA), then river sand was replaced by fine recycled concrete aggregate (RFA) at 0, 50, and 100% by weight of the fine aggregate (river sand plus fine recycled concrete aggregate). The result revealed that recycled aggregate concrete had lower compressive strength than that of the conventional concrete (concrete made from normal aggregates). In addition, the use of ground RHBA in recycled

aggregate concrete gave higher compressive strength than the recycled aggregate concrete without ground RHBA even though it increased the slump loss of concrete. The splitting tensile strength of the tested recycled aggregate concrete was about 8.15% of the compressive strength. Finally, the modulus of elasticity of the tested recycled aggregate concrete was lower than that of the conventional concrete and was about 4% lower than the value predicted by ACI 318.

#### 1. บทนำ

เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวล ซึ่งใช้แกลบที่เหลือจากกระบวนการสีข้าว และเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่เหลือจากกระบวนการผลิตเอีกระดาษ แกลบและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรมที่ปัจจุบันนำมาเป็นเชื้อเพลิงในการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในแต่ละปีมีปริมาณมากกว่า 100,000 ตัน และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่การนำไปใช้ประโยชน์ยังมีน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้น ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดและเสียพื้นที่จัดเก็บโดยเปล่าประโยชน์ นอกจากนี้อนุภาคที่ค่อนข้างเบาของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายได้ง่าย ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมทั้งในพื้นที่กองเก็บและบริเวณใกล้เคียง อย่างไรก็ตามจากการศึกษาการนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มาใช้ในงานคอนกรีตที่ผ่านมาพบว่าการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานอย่างเดียว [1] นอกจากนี้พบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดสูงมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี และสามารถเป็นส่วนผสมในคอนกรีตกำลังสูงได้ โดยที่อายุ 28 วัน คอนกรีตสามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงกว่า 800 กก/ซม<sup>2</sup> [2]

นอกจากนี้ยังมีเศษวัสดุเหลือทิ้งอีกชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ คือเศษคอนกรีตเก่าที่ผ่านการทดสอบเพื่อหาลังอัด ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีตได้ คอนกรีตที่ผสมรวมที่ได้จากเศษคอนกรีตเก่า (Recycled Concrete Aggregate) คือคอนกรีตที่ผสมรวมที่ได้จากการย่อยคอนกรีตที่ทดสอบกำลังอัดแล้วมาใช้เป็นมวลรวมเพื่อทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติหรือคอนกรีตที่ผสมรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าผสมกับมวลรวมอื่นๆ [3] โดยมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ประกอบด้วยมวลรวมหยาบและ

มวลรวมละเอียดจากธรรมชาติร้อยละ 65 ถึง 70 และประมาณร้อยละ 30 ถึง 35 เป็นเศษซีเมนต์เพสต์เก่า (Cement Paste) ที่ยึดเกาะที่ผิวของมวลรวม [4] จากหลายงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการนำมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมาใช้ในงานคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดลดลง [5-6] โดย Chen และคณะ [7] พบว่าการใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากเศษคอนกรีตเก่าเป็นมวลรวมหยาบทั้งหมดในส่วนผสมคอนกรีต ให้ค่ากำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 60 ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ขณะที่ Poon และคณะ [8] พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าเป็นมวลรวมหยาบไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ ให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมปกติเล็กน้อย

งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการนำมวลรวมหยาบหรือมวลรวมละเอียดที่ได้จากเศษคอนกรีตเก่าอย่างใดอย่างหนึ่งมาใช้แทนที่มวลรวมจากธรรมชาติ และใช้ในปริมาณการแทนที่ไม่มากนัก เนื่องจากกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่สูงขึ้น ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นมวลรวมหยาบทั้งหมด และใช้มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่ทรายแม่น้ำในอัตราร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนักมวลรวมละเอียด นอกจากนี้ใช้เส้นใยแก้ว-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดสูงเป็นวัสดุพอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

การใช้เส้นใยแก้ว-เปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมในปริมาณที่เหมาะสมไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มกำลังอัดให้คอนกรีต แต่ยังช่วยลดปริมาณของเส้นใยแก้ว-เปลือกไม้ที่มีอยู่ โดยงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม ได้แก่ การสูญเสียค่าการยุบตัว, กำลังอัด, กำลังดึง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ (คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ) การนำวัสดุเหลือทิ้ง คือเส้นใยแก้ว-เปลือกไม้และ มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมาใช้ประโยชน์ ช่วยลดทั้งปริมาณและช่วยรักษาสภาพแวดล้อมจากการกองเก็บแล้ว การใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตกลับมาใช้ใหม่ยังเป็นการนำทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดมาใช้อย่างคุ้มค่า

## 2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้เส้นใยแก้ว-เปลือกไม้เป็นวัสดุพอชโซลานในส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต ได้แก่ กำลังอัด กำลังดึง แบบผ่าซีก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ

## 3. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

### 3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

**ปูนซีเมนต์ :** ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

**มวลรวมจากธรรมชาติ :** ใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 (4.75 มม.) มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.04 และใช้หินปูนย่อยที่มีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 20 มม. สำหรับค่าความถ่วงจำเพาะของทรายแม่น้ำ

และหินปูนย่อยมีค่าเท่ากับ 2.60 และ 2.67 ตามลำดับ ส่วนค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.94 และ 0.46 ตามลำดับ

**มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต :** นำตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดแล้ว (มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 250 ถึง 400 กก/ซม<sup>2</sup>) มาย่อยด้วยเครื่องย่อยคอนกรีต Swing Hammer Mills โดยส่วนที่ได้จากการย่อยคอนกรีตที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มม. (ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4) ใช้เป็นมวลรวมละเอียดเพื่อใช้แทนที่ทรายแม่น้ำ สำหรับส่วนที่ได้จากการย่อยคอนกรีตที่มีขนาดระหว่าง 4.75 ถึง 19 มม. (ร่อนล้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 3/4 นิ้ว) ใช้เป็นมวลรวมหยาบเพื่อใช้แทนที่หินปูนย่อย

**เส้นใยแก้ว-เปลือกไม้ :** นำมาจากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้แกลบและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิง มีอัตราส่วนแกลบต่อเปลือกไม้ก่อนเผาเท่ากับ 65:35 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการเผาผลาญที่ประมาณ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส นำเส้นใยแก้ว-เปลือกไม้ที่ได้จากโรงไฟฟ้าโดยตรงมาบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น คือมีอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ประมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

### 3.2 วิธีการทดสอบ

งานวิจัยนี้ควบคุมอัตราส่วนระหว่างน้ำประสิทธิผลต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.48 และค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนผสมของคอนกรีต โดยแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นคอนกรีตควบคุม (CON) ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และใช้หินปูนย่อยและทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดตามลำดับ ส่วนคอนกรีตกลุ่มที่ 2, 3 และ 4 ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตทดแทนหินปูนย่อยทั้งหมด และใช้มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่ทรายแม่น้ำในอัตราร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนักมวลรวมละเอียดตามลำดับ (สัญลักษณ์ CS, CFS และ CF ตามลำดับ) ร่วมกับการใช้เส้นใยแก้ว-เปลือกไม้บดละเอียด แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

สำหรับมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ทั้งมวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตได้เตรียมให้อยู่ในสถานะผิวแห้งในอากาศ (Air-Dried State) ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปริมาณน้ำเนื่องจากปริมาณความชื้นและการดูดซึมน้ำของมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตที่ใช้เส้นใยแก้ว-เปลือกไม้เป็นส่วนผสมใช้สารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer) ประเภท F เพื่อควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ในช่วงที่กำหนดระหว่าง 5-10 ซม.

ทำการหล่อคอนกรีตโดยใช้แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. พร้อมทั้งทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดทุกๆ 15 นาที จนคอนกรีตไม่มีค่าการยุบตัว หลังจากหล่อคอนกรีตครบ 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบและนำไปบ่มน้ำ จากนั้นนำคอนกรีตมาทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน และทำการทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีกและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

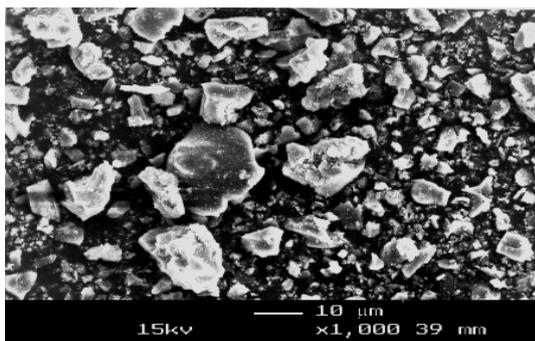
ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีต

| Mix     | Mix Proportion (kg/m <sup>3</sup> ) |      |           |      |     |      |              |                 |     | W/B  | Slump (cm) |
|---------|-------------------------------------|------|-----------|------|-----|------|--------------|-----------------|-----|------|------------|
|         | Cement                              | RHBA | Limestone | Sand | RFA | RCA  | Mixing Water | Effective Water | SP  |      |            |
| CON     | 380                                 | -    | 1006      | 800  | -   | -    | 191.0        | 182.4           | -   | 0.48 | 6.0        |
| CS      | 380                                 | -    | -         | 800  | -   | 1005 | 214.5        | 182.4           | -   | 0.48 | 7.0        |
| CSRG20  | 304                                 | 76   | -         | 785  | -   | 1005 | 214.0        | 182.4           | 1.7 | 0.48 | 10.0       |
| CSRG35  | 247                                 | 133  | -         | 780  | -   | 1005 | 213.5        | 182.4           | 1.7 | 0.48 | 9.0        |
| CSRG50  | 190                                 | 190  | -         | 770  | -   | 1005 | 213.0        | 182.4           | 3.3 | 0.48 | 8.0        |
| CFS     | 380                                 | -    | -         | 400  | 400 | 1005 | 235.5        | 182.4           | -   | 0.48 | 6.0        |
| CFSRG20 | 304                                 | 76   | -         | 395  | 395 | 1005 | 235.0        | 182.4           | 1.7 | 0.48 | 8.0        |
| CFSRG35 | 247                                 | 133  | -         | 390  | 390 | 1005 | 234.5        | 182.4           | 1.7 | 0.48 | 6.0        |
| CFSRG50 | 190                                 | 190  | -         | 385  | 385 | 1005 | 233.5        | 182.4           | 3.3 | 0.48 | 9.0        |
| CF      | 380                                 | -    | -         | -    | 800 | 1005 | 257.0        | 182.4           | -   | 0.48 | 5.0        |
| CFRG20  | 304                                 | 76   | -         | -    | 785 | 1005 | 256.0        | 182.4           | 1.7 | 0.48 | 6.0        |
| CFRG35  | 247                                 | 133  | -         | -    | 780 | 1005 | 255.0        | 182.4           | 1.7 | 0.48 | 5.0        |
| CFRG50  | 190                                 | 190  | -         | -    | 770 | 1005 | 254.0        | 182.4           | 3.3 | 0.48 | 8.0        |

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

รูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียด พบว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเท่ากับ 10.8 ไมครอน และค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าเท่ากับ 2.15 โดยคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด แสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 1 เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

| Physical Properties                        | Cement | RHBA |
|--------------------------------------------|--------|------|
| Specific Gravity                           | 3.15   | 2.15 |
| Retained on a Sieve No. 325 (%)            | N/A    | 1.9  |
| Median Particle Size, d <sub>50</sub> (μm) | 14.6   | 10.8 |

N/A = Not Applied.

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ พบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มี SiO<sub>2</sub> เป็นองค์ประกอบหลักโดยมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 74.8 (มีค่าน้อยกว่าเถ้าแกลบที่มีปริมาณของ SiO<sub>2</sub> มากกว่าร้อยละ 90 [9-11]) และมีผลรวมของ SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เท่ากับร้อยละ 75.8 ขณะที่ปริมาณของ SO<sub>3</sub> มีเพียงร้อยละ 0.4 ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) มีค่าเท่ากับร้อยละ 11.2 ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน ASTM C618 [12] ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 10 อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่ผ่านมา [1-2] พบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านการบดละเอียดมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมคอนกรีต แม้ว่าค่า LOI มีค่าสูงกว่าร้อยละ 10

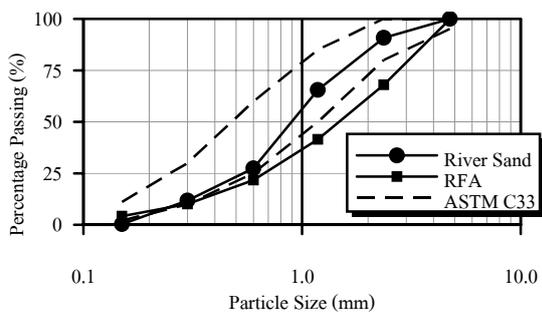
ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ

| Chemical Compositions (%)                         | Cement | RHBA |
|---------------------------------------------------|--------|------|
| Silicon Dioxide (SiO <sub>2</sub> )               | 20.9   | 74.8 |
| Aluminium Oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 4.7    | 0.2  |
| Iron Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )      | 3.4    | 0.8  |
| Calcium Oxide (CaO)                               | 65.4   | 5.9  |
| Magnesium Oxide (MgO)                             | 1.2    | 0.5  |
| Sodium Oxide (Na <sub>2</sub> O)                  | 0.2    | 0.1  |
| Potassium Oxide (K <sub>2</sub> O)                | 0.3    | 2.0  |
| Sulfur Trioxide (SO <sub>3</sub> )                | 2.7    | 0.4  |
| Loss On Ignition (LOI)                            | 0.9    | 11.2 |

**4.1 คุณสมบัติของมวลรวม**

สำหรับการกระจายขนาดของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ พบว่ามวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต (RFA) มีการกระจายขนาดไม่สม่ำเสมอ ขนาดโดยเฉลี่ยค่อนข้างหยาบเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C33 [13] โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.55 ขณะที่มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต (RCA) มีการกระจายขนาดสอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM C33 [13] และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.40

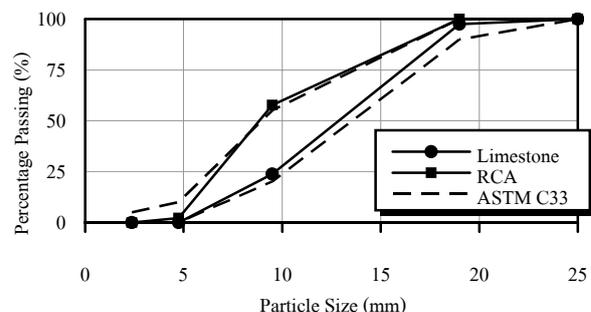
ตารางที่ 4 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม RFA และ RCA พบว่ามวลรวม RFA และ RCA มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.31 และ 2.45 ตามลำดับ ส่วนค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเท่ากับร้อยละ 11.91 และ 5.61 สำหรับมวลรวม RFA และ RCA ตามลำดับ สังเกตได้ว่ามวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ (2.60 และ 2.67 สำหรับทรายแม่น้ำและหินปูนย่อย ตามลำดับ) ขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติประมาณ 12 ถึง 13 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากความพรุนของซีเมนต์เพสต์ที่ยึดเกาะที่ผิวของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต [4-5] สำหรับการทดสอบความต้านทานการขัดสีของมวลรวมพบว่ามวลรวม RCA มีค่าการสูญเสียหนักเนื่องจากการทดสอบการขัดสีด้วยวิธี Los Angeles Abrasion เท่ากับร้อยละ 33.08 ซึ่งสูงกว่าหินปูนย่อยที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 21.70 ทั้งนี้เนื่องจากซีเมนต์เพสต์ที่ยึดเกาะที่ผิวของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีความแข็งแรงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับบริเวณผิวของมวลรวมจากธรรมชาติ [14]



รูปที่ 2 การกระจายขนาดของมวลรวมละเอียด

**4.2 คุณสมบัติของคอนกรีตสด**

ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต (ตารางที่ 1) แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติเป็นมวลรวม และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต โดยคอนกรีต CS, CFS และ CF ใช้น้ำในส่วนผสมเท่ากับ 214.5, 235.5 และ 257.0 กก/ม<sup>3</sup> ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตควบคุม (CON) ใช้น้ำในส่วนผสมเท่ากับ 191.0 กก/ม<sup>3</sup> ทั้งนี้เนื่องจากการชดเชยปริมาณความชื้นและการดูดซึมน้ำของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติประมาณ 12 ถึง 13 เท่า ขณะที่ส่วนผสมที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร่วมกับการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติ ต้องใช้สารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้นเพื่อควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 5 ถึง 10 ซม โดยส่วนผสมที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 20 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ใช้สารลดน้ำพิเศษเท่ากับ 1.7 กก/ม<sup>3</sup> และเพิ่มขึ้นเป็น 3.3 กก/ม<sup>3</sup> สำหรับการแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีความพรุนสูง และมีค่าการสูญเสียหนักเนื่องจากการเผา (LOI) สูงถึงร้อยละ 11.2 ส่งผลให้คอนกรีตมีความต้องการน้ำสูงขึ้น จึงต้องใช้สารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น [2]



รูปที่ 3 การกระจายขนาดของมวลรวมหยาบ

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของมวลรวม

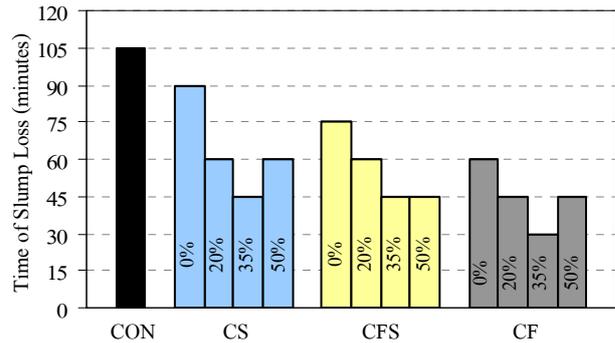
| Properties                    | Normal Aggregates |           | Recycled Concrete Aggregates |        |
|-------------------------------|-------------------|-----------|------------------------------|--------|
|                               | River Sand        | Limestone | Fine                         | Coarse |
| Fineness Modulus              | 3.04              | 6.79      | 3.55                         | 6.40   |
| Specific Gravity (SSD)        | 2.60              | 2.67      | 2.31                         | 2.45   |
| Absorption (%)                | 0.94              | 0.46      | 11.91                        | 5.61   |
| Los Angeles Abrasion Loss (%) | -                 | 21.70     | -                            | 33.08  |

**4.3 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีต**

รูปที่ 4 แสดงการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตพบว่า คอนกรีตควบคุม (CON) มีค่ายุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 6 ชม. และลดลงจนไม่มีค่ายุบตัวใช้เวลาเท่ากับ 105 นาที ขณะที่คอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีการสูญเสียค่าการยุบตัวเร็วกว่าคอนกรีต CON โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่ทรายแม่น้ำในปริมาณที่สูงขึ้น โดยคอนกรีต CS, CFS และ CF ใช้เวลาจากการยุบตัวเริ่มต้นจนคอนกรีตไม่มีค่าการยุบตัวเท่ากับ 90, 75 และ 60 นาที ตามลำดับ เนื่องจากมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีการดูดซึมน้ำอย่างรวดเร็ว ส่งผลต่อการลดลงของปริมาณน้ำในส่วนผสม

สำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วน พบว่าคอนกรีตสดมีการสูญเสียค่าการยุบตัวเร็วกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวประมาณ 30 ถึง 60 นาที และมีแนวโน้มเร็วขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ซึ่งเห็นได้ชัดในส่วนผสมที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนร่วมกับการใช้ทั้งมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติทั้งหมด สำหรับสาเหตุสำคัญที่ทำให้คอนกรีตสดที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นส่วนผสมมีการสูญเสียค่าการยุบตัวอย่างรวดเร็วคือ อนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความพรุนสูงเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเหา (LOD) ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีค่าสูง ทำให้ในในส่วนผสมคอนกรีตมีปริมาณลดลงเนื่องจากการดูดซึมน้ำของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ รวมถึงการใช้สารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตสดมีค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวอย่างรวดเร็ว [15] อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบผลเนื่องจากการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเพื่อทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติกับการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ที่มีผลต่อการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตสดพบว่า การใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้มวลรวม RFA เพื่อแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติมีส่วนช่วยเร่งอัตราการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตสดมากกว่าการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน โดยคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติทั้งหมด (CF) มีการสูญเสียค่ายุบตัวเร็วกว่าคอนกรีตควบคุม (CON) เท่ากับ 45 นาที ขณะที่คอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ ร่วมกับการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติทั้งหมด (CFRG20, CFRG35 และ CFRG50) มีการสูญเสียค่ายุบตัวเร็วกว่าคอนกรีต CF อยู่ในช่วง 15 ถึง 30 นาที

โดยทั่วไปคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีการสูญเสียค่าการยุบตัวเร็วกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติเป็นมวลรวมทั้งหมด เนื่องจากมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ ขณะที่ในงานวิจัย [3, 8] พยายามลดการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตสดที่มีผลมาจากการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม โดยการ



รูปที่ 4 เวลาที่ทำให้สูญเสียค่ายุบตัวจนหมด (% แสดงร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้)

เตรียมมวลรวมที่ใช้ให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dried) ก่อนทำการผสม ขณะที่ Shaya and Xu [14] สรุปลักษณะคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีการสูญเสียค่ายุบตัวจากค่ายุบตัวเริ่มต้นจนคอนกรีตไม่มีค่ายุบตัวใช้เวลาประมาณ 45 ถึง 60 นาที ซึ่งการใช้สารเคมีผสมเพิ่มสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสดได้ โดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารเคมีผสมเพิ่ม

**4.4 กำลังอัดของคอนกรีต**

รูปที่ 5 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมด และใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด (CS) มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 441 กก/ซม<sup>2</sup> หรือคิดเป็นร้อยละ 94 ของคอนกรีตควบคุม (470 กก/ซม<sup>2</sup>) แสดงให้เห็นว่าการใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมด ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดลดลงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hansen และ Narud [16] ขณะที่การใช้มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต โดยกำลังอัดของคอนกรีต CFS และ CF ที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 413 กก/ซม<sup>2</sup> และ 359 กก/ซม<sup>2</sup> หรือเท่ากับร้อยละ 88 และ 76 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากคุณภาพของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อการแทนที่มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเพิ่มขึ้น ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง นอกจากนี้คอนกรีต CFS และ CF ใช้น้ำในส่วนผสมสูงกว่าคอนกรีตควบคุมมาก ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง

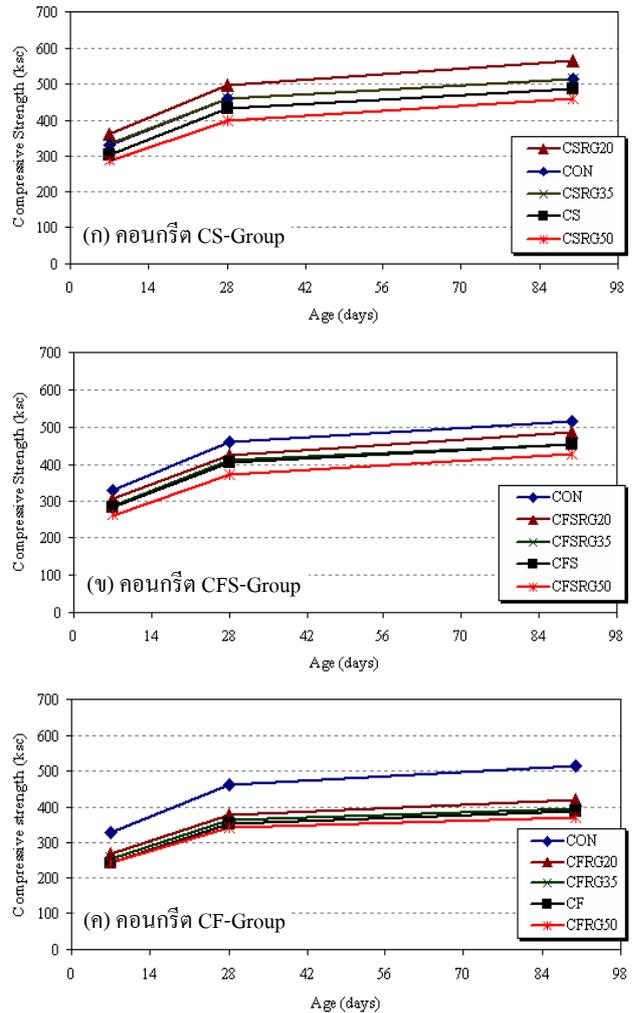
สำหรับกำลังอัดของคอนกรีตในกลุ่มที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมด และใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด ร่วมกับการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ดังแสดงในรูปที่ 5ก พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้

แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (CSRG20) มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 505 กก/ชม<sup>2</sup> หรือเท่ากับ ร้อยละ 108 ของคอนกรีตควบคุม ขณะที่คอนกรีต CSRG35 มีกำลังอัด ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 469 กก/ชม<sup>2</sup> ซึ่งสูงกว่าคอนกรีต CS และมีค่า โกลีเคียงกับคอนกรีตควบคุม เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจาก เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ช่วยเพิ่มกำลังอัดให้คอนกรีต ขณะที่การใช้ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก วัสดุประสาน (CSRG50) ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 408 กก/ชม<sup>2</sup> และเพิ่มขึ้นเป็น 469 กก/ชม<sup>2</sup> เมื่อคอนกรีตมีอายุ 90 วัน หรือคิดเป็น ร้อยละ 87 และ 89 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ

กลุ่มคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต แทนที่หินปูนย่อยทั้งหมด และใช้มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษ คอนกรีตแทนที่ทรายแม่น้ำในอัตราร้อยละ 50 โดยน้ำหนักมวลรวม ละเอียด พบว่ากำลังอัดของคอนกรีต CFSRG20 และ CFSRG35 ที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 431 กก/ชม<sup>2</sup> และ 421 กก/ชม<sup>2</sup> หรือเท่ากับร้อยละ 92 และ 90 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ (ดูรูปที่ 5ข) ซึ่งมีค่าสูงกว่า คอนกรีต CFS (413 กก/ชม<sup>2</sup>) แม้ว่าคอนกรีต CFSRG20 และ CFSRG35 ใช้น้ำในส่วนผสมมากกว่าคอนกรีต CFS เนื่องจากผลของปฏิกิริยา ปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด ขณะที่เมื่อใช้เถ้าแกลบ- เปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก วัสดุประสาน (CFSRG50) มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน เท่ากับ 379 กก/ชม<sup>2</sup> และ 437 กก/ชม<sup>2</sup> หรือเท่ากับร้อยละ 81 และ 83 ของ คอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าคอนกรีต CFS เล็กน้อย

รูปที่ 5ค แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตและ อายุทดสอบของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้ จากการใช้คอนกรีตทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติทั้งหมด ร่วมกับการ ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 20, 35, และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีต CFRG20, CFRG35, และ CFRG50 ที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 385, 372, และ 339 กก/ชม<sup>2</sup> หรือเท่ากับร้อยละ 82, 79, และ 72 ของคอนกรีตควบคุม และเพิ่มขึ้นเป็น 427, 404, และ 379 กก/ชม<sup>2</sup> หรือเท่ากับร้อยละ 81, 77, และ 72 ของคอนกรีตควบคุม เมื่อคอนกรีตมีอายุ 90 วัน ตามลำดับ สังเกตได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตมี ค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ บดละเอียด อย่างไรก็ตาม การแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด ในอัตราร้อยละ 20 และ 35 ให้ค่ากำลังอัดหลังจาก 7 วันแรก สูงกว่า คอนกรีต CF

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการ ย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมแสดงให้เห็นว่า เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ ผ่านการบดละเอียดมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี และมีส่วนช่วย พัฒนากำลังอัดของคอนกรีต โดยอัตราการแทนที่ที่เหมาะสมคือไม่เกิน ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบ

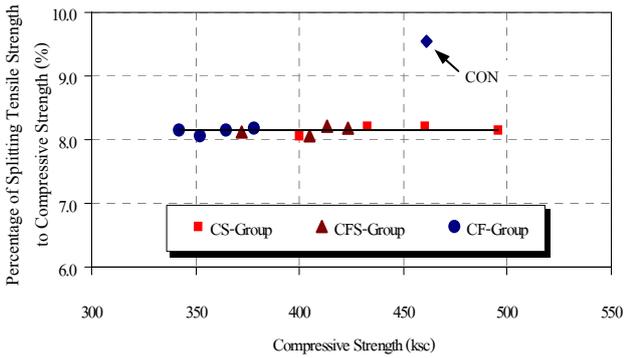


รูปที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีต

ที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมดและใช้ทราย แม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด ขณะที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 20 เหมาะสมกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษ คอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมดและใช้มวลรวมละเอียดที่ได้จากการ ย่อยเศษคอนกรีตแทนที่ทรายแม่น้ำในอัตราร้อยละ 50 โดยน้ำหนักมวล รวมละเอียด (คอนกรีตกลุ่ม CFS) โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน มีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 ของคอนกรีตควบคุม

#### 4.5 กำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีต

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังดึงผ่าซีก ต่อกำลังอัดของคอนกรีตกับกำลังอัดของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้ มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมทั้งที่ใช้และไม่ใช้ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์มีค่ากำลังดึงต่อกำลังอัด ของคอนกรีตอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 8.05 ถึง 8.22 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 8.15 ขณะที่กำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตปกติมีค่าระหว่างร้อยละ 8 ถึง 14 ของกำลังอัด [17] สำหรับงานวิจัยนี้กำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีต ควบคุมมีค่าเท่ากับร้อยละ 9.53 ของกำลังอัดของคอนกรีต และพบว่า



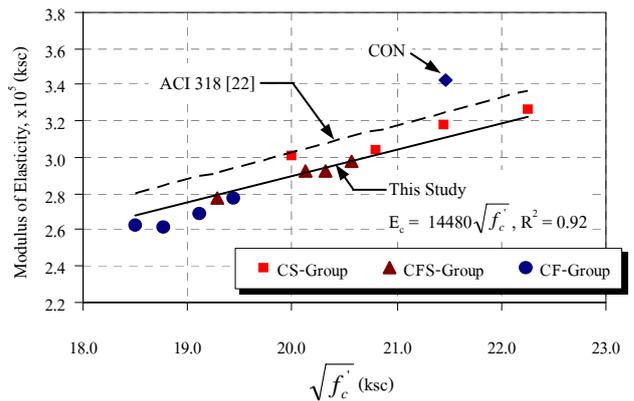
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังดึงผ่าซีกต่อกำลังอัดกับกำลังอัดของคอนกรีต

กำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีค่าไม่ต่างกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติมากนัก ขณะที่การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่มีผลต่อคุณสมบัติกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม โดย Sagoe-Crentsil และคณะ [18] พบว่าอัตราส่วนระหว่างกำลังดึงต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีค่าระหว่างร้อยละ 8.9 ถึง 12.1 ขณะที่ Ravindrarah และ Tam [19] พบว่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีค่าไม่ต่างจากคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติเป็นมวลรวม

4.6 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับรากที่สองของกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน อยู่ระหว่าง  $2.67 \times 10^4$  ถึง  $3.33 \times 10^4$  กก/ชม<sup>2</sup> ขณะที่คอนกรีตควบคุมมีค่าเท่ากับ  $3.49 \times 10^4$  กก/ชม<sup>2</sup> การใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าลดลง โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต CS, CFS และ CF ที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ  $3.10 \times 10^4$ ,  $2.98 \times 10^4$  และ  $2.67 \times 10^4$  กก/ชม<sup>2</sup> ตามลำดับ สังเกตได้ว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด (CS) มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมร้อยละ 11 ขณะที่เมื่อใช้ทั้งมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ได้จากเศษคอนกรีตทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติทั้งหมดมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมร้อยละ 24 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gerardu และ Handriks [20] ที่พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับการใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียดมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติไม่เกินร้อยละ 15

สำหรับการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม พบว่ามีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมแม้ว่าการใช้



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับรากที่สองของกำลังอัดของคอนกรีต

เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในบางส่วนผสมให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม เช่น คอนกรีต CSRG20 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ  $3.33 \times 10^4$  กก/ชม<sup>2</sup> และกำลังอัดมีค่าสูงถึง 505 กก/ชม<sup>2</sup> ขณะที่คอนกรีตควบคุมมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดเท่ากับ  $3.49 \times 10^4$  และ 470 กก/ชม<sup>2</sup> ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตขึ้นอยู่กับโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวมที่ใช้มากกว่าซีเมนต์เพสต์ [21] อย่างไรก็ตามค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทั้งที่ใช้และไม่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นส่วนผสมมีค่าสัมพันธ์กับกำลังอัด โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับรากที่สองของกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการของ ACI 318 [22] ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตทั้งที่ใช้และไม่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดเป็นส่วนผสมมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าค่าที่ได้จากสมการของ ACI 318 [22] เท่ากับร้อยละ 4 โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตในงานวิจัยนี้แสดงในสมการ 1

$$E_c = 14480 \sqrt{f'_c} \text{ ----- (1)}$$

เมื่อ  $E_c$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ( $\times 10^4$  กก/ชม<sup>2</sup>)  
 $f'_c$  = กำลังอัดของคอนกรีต (กก/ชม<sup>2</sup>)

5. สรุป

จากผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมต้องใช้สารลดน้ำในปริมาณมากขึ้น และส่งผลให้คอนกรีตมีการสูญเสียค่ายุบตัวเร็วกว่าคอนกรีตปกติอยู่ในช่วง 30 ถึง 60 นาที โดยขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

2. เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี และสามารถช่วยพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้น้ำรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม โดยการใส่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 20 ถึง 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้น้ำรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมและใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

3. การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดไม่มีผลต่อคุณสมบัติการรับกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่ใช้น้ำรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต โดยค่าเฉลี่ยของกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่ใช้น้ำรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 8.15 ของกำลังอัด ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้น้ำรวมจากธรรมชาติเล็กน้อย

4. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้น้ำรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมทั้งที่ใช้และไม่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมและให้ค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากสมการของ ACI 318 [22] เท่ากับร้อยละ 4

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ บริษัท ไทยพาวเวอร์ ซัพพลาย จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในการวิจัยครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Makaratat, N., Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., and Siripanichgom, A., 2004, "Utilization of rice husk-bark ash as a cement replacement", Proceedings of the First International Conference of Asian Concrete Federation, Thailand, pp. 650-659.
- [2] Sata, V., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., 2006, "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.
- [3] Hansen, T.C., 1992, "Recycling of demolished concrete and masonry", RILEM Report 6, E & FN SPON, 316 p.
- [4] Poon, C.S., Shui, Z.H., and Lam, L., "Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates", Construction and Building Materials, Vol. 18, No. 6, pp. 461-468.
- [5] Katz, A., 2003, "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 33, No. 5, pp. 703-711.
- [6] Barra, de O.M. and Vazquez, E., 1996, "The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete", Waste Management, Vol. 16, No. 1-3, pp. 113-117.
- [7] Chen, H.J., Ten, T., and Chen, K.H., "Use of building rubbles as recycled aggregates", Cement and Concrete Research, Vol. 33, No. 1, pp. 125-132.
- [8] Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Fok, H., and Kou, S.C., 2004, "Influence of moisture states of natural and recycled aggregate on the slump and compressive strength of concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 1, pp. 31-36.
- [9] Basha, E.A., Hashim, R., Mahmud, H.B., and Muntohar, A.S., 2005, "Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement", Construction and Building Materials, Vol. 19, No. 6, pp. 448-453.
- [10] Gastaldini, A.L.G., Isaia, G.C., Gomes, N.S., and Sperb, J.E.K., 2007, "Chloride penetration and carbonation in concrete with rice husk ash and chemical activators", Cement and Concrete Composites, Vol. 29, No. 3, pp. 176-180.
- [11] Agarwal, S.K., 2006, "Pozzolanic activity of various siliceous materials", Cement and Concrete Research, Vol. 36, No. 9, pp. 1735-1739.
- [12] ASTM C 618, 2001, "Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete", Annual Book of ASTM Standards 04.02, pp. 310-313.
- [13] ASTM C 33, 2001, "Standard Specification for Concrete Aggregates", Annual Book of ASTM Standards, 04.02, pp. 10-17.
- [14] Shayan, A. and Xu, A., "Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate", ACI Materials Journal, Vol. 100, No. 5, pp. 371-380.
- [15] Ravina, D. and Soroka, I., 1994, "Slump loss and compressive strength of concrete made with WRR and HRWR admixtures and subjected to prolonged mixing", Cement and Concrete Research, Vol. 24, No. 8, pp. 1455-1462.
- [16] Hansen, T.C. and Narud, H. "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate", Concrete International, Vol. 5, No. 1, pp. 79-83.
- [17] Mindess, S., Young, J.F., and Darwin, D., 2003, Concrete, 2nd ed., Upper Saddle River, New Jersey, p. 317.
- [18] Sagoe-Creutzsil, K.K., Brown, T., and Taylor, A.H., 2001, "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled aggregate", Cement and Concrete Research, Vol. 31, No. 5, pp. 707-712.
- [19] Ravindrarajah, R.S. and Tam, T.C., 1985, "Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate", Magazine of Concrete Research, Vol. 37, No. 130, pp. 29-38.
- [20] Gerardu, J.J.A. and Hendriks, C.F., 1985, "Recycling of road pavement materials in the Netherlands", Rijkswaterstaat Communications No. 38, the Hague.
- [21] Neville, A.M., 1997, "Aggregate bond and modulus of elasticity of concrete", ACI Materials Journal, Vol. 94, No. 1, pp. 71-74.
- [22] ACI Committee 318, 2005, "Building Code Requirements for Structural Concrete", ACI 318-05, ACI Manual of Concrete Practice Part 3, American Concrete Institute, Detroit.