

## สมบัติของคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ผสมเถ้าแกลบไม่บดปริมาณสูง

### Properties of Self-compacting Concrete incorporating High Volume Uground Rice Husk Ash

กฤษดา เสือเอี่ยม<sup>1</sup> และ ณัฐ ฎีกุล<sup>1,2</sup>

Gritsada Sua-iam<sup>1</sup> and Natt Makul<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาเทคโนโลยีอาคาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

เลขที่ 9 แขวงวัดมะขาม เขตบางเขน จังหวัดกรุงเทพฯ 10220 โทรศัพท์ : (+662) 544-8275

E-mail: cm\_gritsada@hotmail.com<sup>1</sup>, shinomomo7@hotmail.com<sup>2</sup>

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลของการนำเถ้าแกลบไม่บดมาเป็นวัสดุสำหรับผลิตคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ โดยใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 40 และ 60 โดยน้ำหนัก และกำหนดความสามารถในการไหลผ่านของคอนกรีตเท่ากับ  $70 \pm 2.5$  เซนติเมตร ทำการทดสอบสมบัติของคอนกรีตประกอบไปด้วย ความสามารถในการเติมแทรก ความสามารถในการไหลผ่าน และการต้านทานการแยกตัว จากผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบสูงขึ้น ในขณะที่หน่วยน้ำหนักและกำลังอัดมีแนวโน้มลดลง

#### Abstract

This paper presented the use of unground rice husk ash (RHA) as a material in the production of self-compacting concrete (SCC). RHA was used to replace Portland cement of 0, 10, 20, 40 and 60% by weight and the slump flow of SCC was controlled at  $70 \pm 2.5$  cm diameter. Test properties included filling ability, passing ability and segregation resistance. From the test results, it was found that the water requirements of SCC increased as increasing RHA fractions, whereas the unit weight and compressive strength tended to decrease.

#### 1. บทนำ

การลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตหรือการปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น วัสดุที่นิยมใช้คือ วัสดุปอชโซลานมาตรฐาน ASTM C618 [1] ได้ให้คำจำกัดความไว้ว่าเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกา และอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยปกติวัสดุปอชโซลานไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน แต่หากมีความละเอียดเพียงพอในสภาวะความชื้นที่เหมาะสม วัสดุปอชโซลานจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่อุณหภูมิปกติและได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ทั้งนี้วัสดุปอชโซลานที่ใช้ในประเทศไทย เถ้าแกลบถือได้ว่าเป็นวัสดุปอชโซลาน ชนิดประเภทหนึ่ง เนื่องจากมีปริมาณ ซิลิกา ที่สูง เป็นผลผลิตทางการเกษตรที่เหมาะสมสำหรับการนำมาพัฒนาเป็นวัสดุปอชโซลาน [2]

ด้วยบริบทของสังคมไทยที่เป็นสังคมเกษตรกรรมโดยข้าวเป็นผลิตผลที่สำคัญของประเทศและมีการผลิตและส่งออกข้าวเป็นอันดับต้นๆ ของโลกมาหลายปี ส่งผลให้ปริมาณแกลบดิบพลพลอยได้จากการสีข้าวเกิดขึ้นในปริมาณสูงมากขึ้นตามไปด้วย ปัจจุบันการใช้งานแกลบเพื่อเป็นแหล่งพลังงานเป็นที่นิยมและใช้กันมาก ส่วนใหญ่แกลบนำมาใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล ปัจจุบันมีโครงการโรงไฟฟ้าแกลบที่ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนอนุรักษ์พลังงานหลายโครงการ พลพลอยได้จากการเผาแกลบ คือ เถ้าแกลบซึ่งมีปริมาณร้อยละ 20-25 โดยน้ำหนักแกลบ ซึ่งถือว่ามีความเพียงพอเมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ทั้งนี้แกลบที่ผ่านการ

RECEIVED 22 May, 2013

ACCEPTED 25 July, 2013

เผายังคงรักษาความพรุนและโครงสร้างเซลล์ไว้  
 แก่กลับที่ได้ยังมีขนาดใหญ่ ดังนั้นต้องทำการบด  
 แก่กลับให้มีความละเอียดหรือใกล้เคียงกับขนาดของ  
 ปูนซีเมนต์เพื่อความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน [3]  
 เนื่องจากแก่กลับมีศักยภาพที่สูงในการนำมาพัฒนาเป็น  
 วัสดุปอซโซลานที่ดี หากต้องการปรับปรุงความละเอียดให้  
 สูงขึ้น [4] แต่อย่างไรก็ตามการนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ใน  
 อัตราส่วนที่สูงส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ลดลง [5] ซึ่ง  
 การต้องนำแก่กลับมาบดก่อนการใช้งานถือเป็นข้อจำกัดที่  
 สำคัญและส่งผลกระทบต่อต้นทุนของคอนกรีต ดังนั้นจึงได้มี  
 การศึกษาและพบความเป็นไปได้ในการนำแก่กลับไม่บด  
 มาใช้งานคอนกรีตทั้งการนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ [6] และ  
 การนำมาแทนที่มวลรวมละเอียด [7]

คอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ (Self-compacting  
 concrete) เป็นนวัตกรรมคอนกรีตที่พัฒนาขึ้นมาเมื่อ 20 กว่า  
 ปีที่แล้ว (ค.ศ.1988) โดยวิศวกรชาวญี่ปุ่น เพื่อแก้ไขปัญหา  
 ด้านคุณภาพและความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตใน  
 ระยะยาว เนื่องจากผลของการขาดทักษะในการปฏิบัติงาน  
 ของแรงงาน และแนวโน้มของการขาดแคลนแรงงานที่มี  
 คุณภาพในอนาคตของประเทศญี่ปุ่น ถือได้ว่าเป็นคอนกรีต  
 สมรรถนะสูงที่มีความสามารถในการไหลเข้าไปยังทุกมุม  
 ของแบบได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองโดยไม่ต้องมีการจี้เขย่า  
 และไม่เกิดการแยกตัวของส่วนผสมในคอนกรีตโดยเฉพาะ  
 อย่างยิ่งมวลรวม ซึ่งคอนกรีตต้องมีคุณลักษณะที่สำคัญ คือ  
 ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ความสามารถในการ  
 ไหลผ่าน สิ่งกีดขวาง และความต้านทานการแยกตัว  
 ของมวลรวม [8]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ใน  
 การใช้แก่กลับไม่บดซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้า  
 แก่กลับมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตชนิด

อัดแน่นตัวได้ เพื่อช่วยลดข้อจำกัดในการนำแก่กลับมา  
 ปรับปรุงทางกายภาพด้วยการบดก่อนการนำไปใช้งาน  
 คอนกรีต

## 2. วัสดุ และวิธีการศึกษา

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ตาม  
 มาตรฐาน ASTM C150 [9]
2. แก่กลับที่ใช้เป็นแก่กลับที่ได้จากโรงไฟฟ้าใน  
 จังหวัดชัยนาท ทำการอบแห้งและนำมาใช้เป็นส่วนผสม  
 คอนกรีตโดยไม่ทำการบดเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ
3. สารเคมีผสมเพิ่มเป็นสารลดน้ำพิเศษหรือซูเปอร์  
 พลาสติไซเซอร์ (Superplasticizer) ประเภท F ตามมาตรฐาน  
 ASTM C494 [10]
4. น้ำประปาที่มีค่าความเป็นกรดด่างในช่วง 6-8
5. ทรายแม่น้ำและหินที่อยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง  
 การกระจายขนาดตามมาตรฐาน ASTM C33 [11]

### 2.2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

อัตราส่วนผสมคอนกรีต แสดงในตารางที่ 1 การใช้  
 แก่กลับไม่บดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1  
 อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 40 และ 60 โดยน้ำหนัก  
 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/p) แปรผันตามความสามารถใน  
 การไหลผ่านของคอนกรีตเท่ากับ  $70 \pm 2.5$  เซนติเมตร

**ตารางที่ 1** สัดส่วนผสมของคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ที่ทำการศึกษา

| ส่วนผสม | อัตราส่วนการแทนที่โดยน้ำหนัก | วัสดุในส่วนผสม [กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร] |          |               |            | สารลดน้ำพิเศษ (ร้อยละ) |
|---------|------------------------------|------------------------------------------|----------|---------------|------------|------------------------|
|         |                              | ปูนซีเมนต์                               | เถ้าแกลบ | มวลรวมละเอียด | มวลรวมหยาบ |                        |
| Control | 0                            | 550                                      | 0        | 813           | 708        | 2.0                    |
| RHA10   | 10                           | 495                                      | 55       | 813           | 708        | 2.0                    |
| RHA20   | 20                           | 440                                      | 110      | 813           | 708        | 2.0                    |
| RHA40   | 40                           | 330                                      | 220      | 813           | 708        | 2.0                    |
| RHA60   | 60                           | 220                                      | 330      | 813           | 708        | 2.0                    |

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ Control และ RHA คือ คอนกรีตควบคุม และคอนกรีตผสมเถ้าแกลบไม่บดแทนที่ปูนซีเมนต์

## 2.3 วิธีการทดสอบ

1. ทำการทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดตามมาตรฐาน ASTM C 138 [12]
2. ทำการทดสอบระยะการไหลแผ่ (Slump flow test) สูงสุดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 1611 [13]
3. ทำการทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางซี่เหล็ก (J-Ring test) ตามมาตรฐาน ASTM C 1621 [14]
4. ทำการทดสอบการต้านทานการแยกตัวด้วยการไหลผ่านกล่องรูปทรงวี (V-funnel flow test) ตามมาตรฐาน European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete (EFNARC) [15]
5. กำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 [16] ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ

ส่วนผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุพบว่า ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้และความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์เท่ากับ 1.70 และ 3.20 ตามลำดับ ส่วนเถ้าแกลบร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้และความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์เท่ากับ 1.27 และ 2.24 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบเฉลี่ยโดยปริมาตรเท่ากับ 23.32 และ 39.34 ไมโครเมตร ตามลำดับการกระจายขนาดอนุภาคแสดงในรูปที่ 1

ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบไม่บด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า อนุภาคของปูนซีเมนต์มีลักษณะเหลี่ยมมุม ไม่แน่นอน ผิวขรุขระ ส่วนอนุภาคของเถ้าแกลบมีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นใย ลักษณะไม่แน่นอน มีความพรุนสูง ดังรูปที่ 2

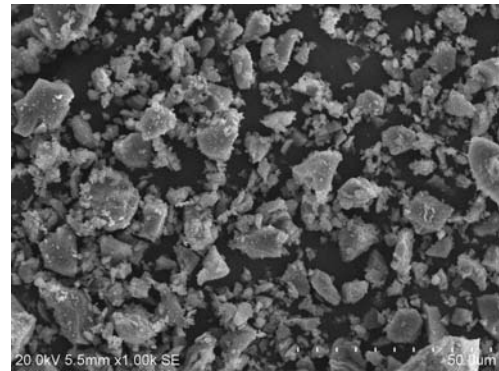
## 3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

### 3.1 องค์ประกอบเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

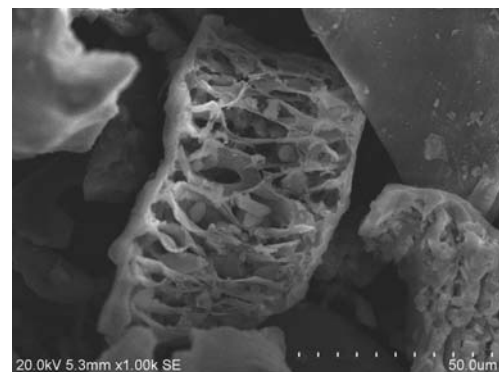
ผลการทดสอบองค์ประกอบเคมีของวัสดุพบ ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 68.48 รองลงมาได้แก่ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 16.39 และ 3.85 ตามลำดับ ส่วนเถ้าแกลบมีซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 93.44 รองลงมาได้แก่โปตัสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 1.98 และ 0.76 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 องค์ประกอบเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) และเถ้าแกลบ (RHA)

| คุณสมบัติ                                            | OPC   | RHA   |
|------------------------------------------------------|-------|-------|
| <b>องค์ประกอบเคมี (ร้อยละ)</b>                       |       |       |
| ซิลิกอน ไดออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> )                | 16.39 | 93.44 |
| อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 3.85  | 0.21  |
| ไออนออกไซด์ (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )        | 3.48  | 0.18  |
| แมงกานีสออกไซด์ (MnO)                                | 0.08  | 0.13  |
| แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)                              | 0.64  | 0.43  |
| แคลเซียมออกไซด์ (CaO)                                | 68.48 | 0.76  |
| โซเดียมออกไซด์ (Na <sub>2</sub> O)                   | 0.06  | 0.05  |
| โพแทสเซียมออกไซด์ (K <sub>2</sub> O)                 | 0.52  | 1.98  |
| ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> )                | 4.00  | 0.16  |
| <b>คุณสมบัติทางกายภาพ</b>                            |       |       |
| พื้นที่ผิวจำเพาะ (m <sup>2</sup> /kg)                | 610   | 370   |
| ความถ่วงจำเพาะ                                       | 3.20  | 2.24  |
| การสูญเสียน้ำหนักจากการการเผาไหม้ (ร้อยละ)           | 1.7   | 1.27  |
| อนุภาคเฉลี่ยโดยปริมาตร (μm)                          | 23.32 | 39.34 |

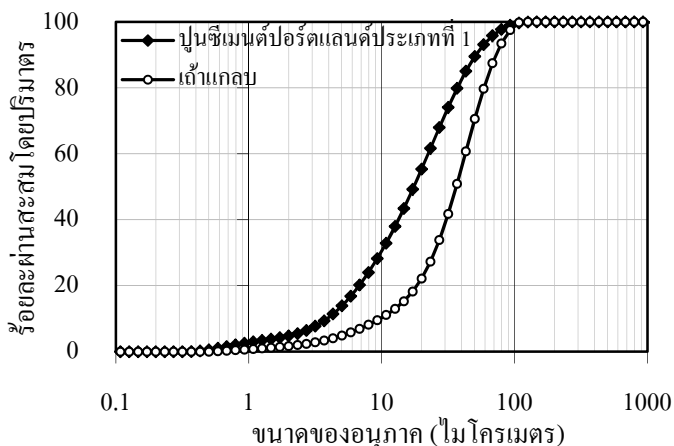


(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ข) เถ้าแกลบ

รูปที่ 2 ภาพขยายอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบ (x 1000 เท่า)



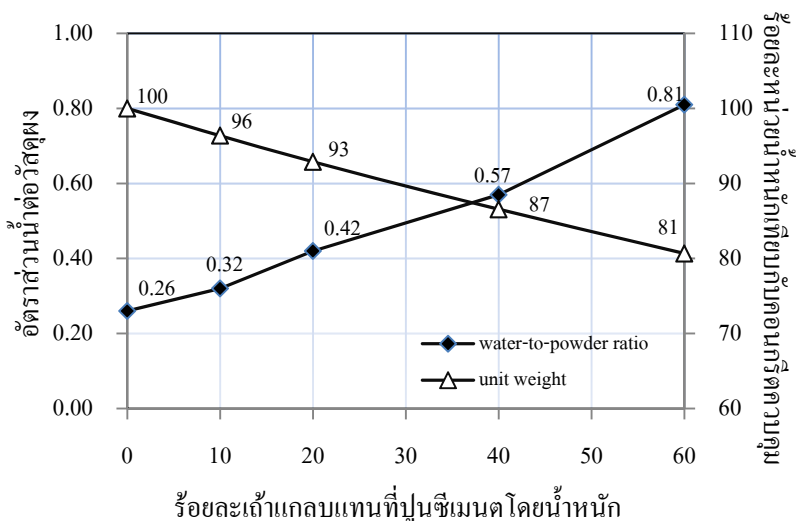
รูปที่ 1 การกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบ

### 3.2 ความต้องการน้ำ

จากข้อกำหนดในการออกแบบส่วนผสมให้คอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ให้มีความสามารถในการไหลแผ่ (Slump flow) ที่ระยะ  $70 \pm 2.5$  เซนติเมตร พบว่า ความต้องการน้ำของคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ผสมเถ้าแกลบบดมีความต้องการน้ำทุกส่วนผสมมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราทดแทนที่เถ้าแกลบสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3 ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของเถ้าแกลบมีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์รูปทรงที่ยังคงรักษาโครงสร้างเดิมไว้และมีความพรุนสูงทำให้มีการกักเก็บน้ำในอนุภาคของเถ้าแกลบ ส่งผลให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมมากขึ้นตามไปด้วย

### 3.3 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด

หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดของคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้จากการนำเอาแกลบไม่บดมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักกับคอนกรีตควบคุม พบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่แกลบสูงขึ้น หน่วยน้ำหนักของกรีตมีแนวโน้มลดลง และมี หน่วยน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3 เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะที่สูงกว่าแกลบ



รูปที่ 3 ความต้องการน้ำ และหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดในส่วนผสมคอนกรีต

### 3.4 ความสามารถในการไหลตัวของคอนกรีต

#### 3.4.1 เวลาของการไหลที่ระยะ 50 เซนติเมตร

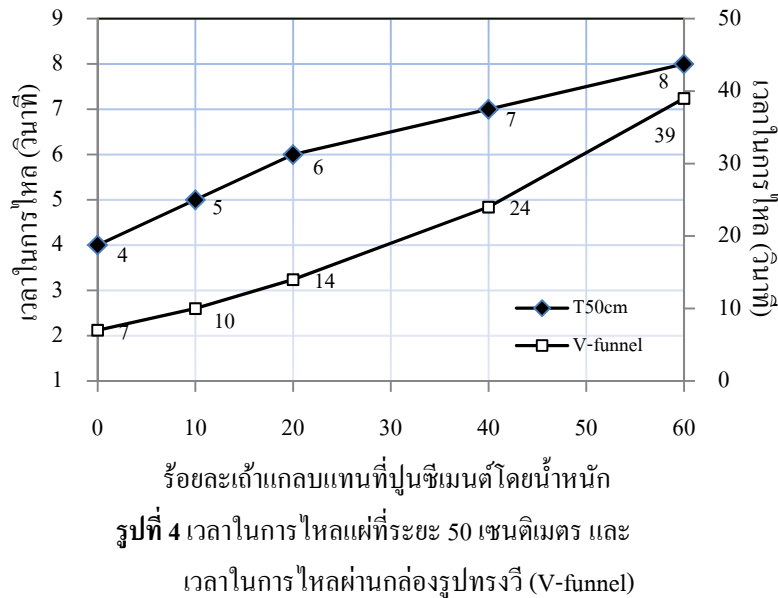
คอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ทุกส่วนผสมมีความสามารถในการไหลแผ่ (Slump flow) ที่ระยะ  $70 \pm 2.5$  เซนติเมตร ตามกำหนด ขณะเดียวกันได้ทำการทดสอบเวลาในการไหลแผ่ถึงระยะ 50 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 4 พบว่าคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ใช้ระยะเวลาในการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร อยู่ในช่วง 4-8 วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของ EFNARC [15] กำหนดอยู่ในช่วง 3-7 วินาที แสดงถึงคอนกรีตมีความสามารถในการไหลตัวได้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ยกเว้นคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ที่นำเอาแกลบไม่บดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราร้อยละ 60 ที่มีเวลาในการไหลแผ่สูงมากกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้เนื่องจากอิทธิพลของขนาด และลักษณะรูปทรงของแกลบ ส่งผลให้ความสามารถในการไหลแผ่แตกต่างกัน

#### 3.4.2 การไหลผ่านกล่องรูปทรงวี (V-funnel flow test)

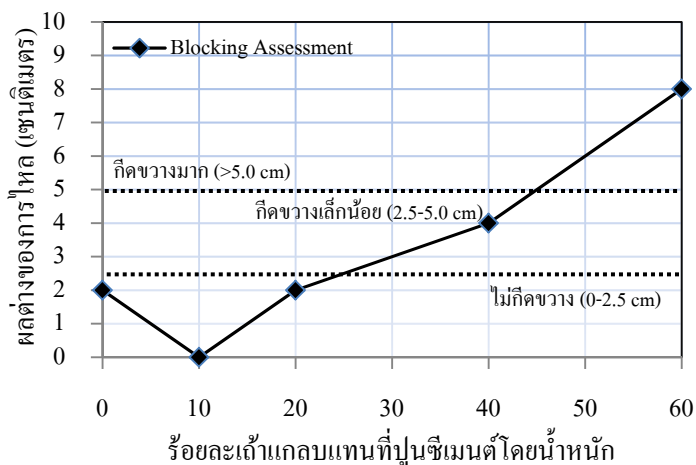
การทดสอบการไหลผ่านกล่องรูปทรงวี (V-funnel flow test) ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อประเมินความสามารถในการต้านทานการแยกตัวของคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้เป็นการทดสอบมิติของการไหลในแนวตั้งซึ่งแตกต่างจากการทดสอบการไหลแผ่ พบว่าคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ทุกอัตราส่วนผสมมีระยะเวลาไหลผ่านกล่องรูปทรงวีเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาทีจากการเติมคอนกรีตลงในกล่อง อยู่ในช่วง 7-39 วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของ EFNARC [15] กำหนดอยู่ในช่วง 6-12 วินาที หมายถึงความสามารถในการต้านทานการแยกตัวของคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้มีแนวโน้มลดลง เมื่ออัตราส่วนการแทนที่แกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงขึ้น โดยอัตราส่วนการแทนที่ของแกลบในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ไม่เกินร้อยละ 20 เนื่องจากปริมาณซีเมนต์เฟสที่ลดลงไม่สัมพันธ์กับปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสม ระยะเวลาในการไหลที่เพิ่มเกี่ยวข้องกับการแยกตัวของมวลรวมซึ่งหนักกว่าไหลลงสู่ด้านล่าง ในขณะที่น้ำส่วนเกินลอยขึ้นด้านบนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้มวลรวมหยาบมีความเครียดภายใน รวมถึงความหนืดที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดแรงต้านทานในการไหลมากขึ้น

ทั้งนี้พบว่าคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ผสมแกลบไม่บดแทนที่ปูนซีเมนต์ อัตราส่วนการแทนที่ไม่ควรเกินร้อยละ 20 เพื่อให้ผลการทดสอบความสามารถในการไหลของคอนกรีตเป็นไปตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของ EFNARC [15]



### 3.4.3 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางซีริงค์ (J-Ring)

จากการคำนวณผลต่างของการไหลสองรูปแบบถูกนำมาใช้เพื่อประเมินการติดขัดเนื่องจากการไหล (Blocking assessment) ดังรูปที่ 5

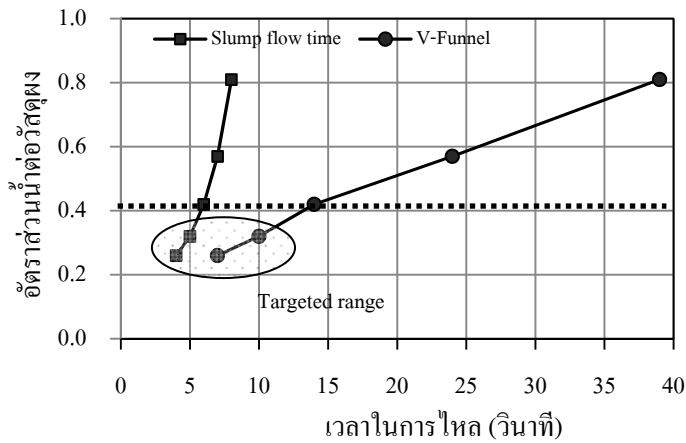


จากการทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางซีริงค์ (J-Ring) ของคอนกรีตอัดแน่นตัวได้เป็นการทดสอบลักษณะเดียวกับการทดสอบแบบไหลผ่าน แตกต่างแต่เพียงเป็นการไหลผ่านแบบอิสระ กับการไหลแบบมีวงซีริงค์กีดขวางการไหล โดยแนวทางการประเมินความสามารถใน

การไหลผ่านสิ่งกีดขวางเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1621 [14] โดยกำหนดส่วนต่างระยะของการไหลทั้ง 2 แบบอยู่ในช่วง 0-2.5 เซนติเมตร ถือได้ว่าไม่เกิดการกีดขวางในระหว่างการไหล (No visible blocking) ผลต่างในช่วง 2.6-5.0 เซนติเมตร ถือได้ว่าเกิดการกีดขวางในระหว่างการไหลเพียงเล็กน้อย (Minimal to noticeable blocking) ในขณะที่ส่วนผลต่างมากกว่า 5.0 เซนติเมตร ถือได้ว่าเกิดการกีดขวางในระหว่างการไหลในระดับสูงมาก (Noticeable to extreme blocking) จากผลการทดสอบ พบว่า คอนกรีตอัดแน่นตัวได้มีแนวโน้มเกิดการติดขัดของมวลรวมในระหว่างการไหลสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะการแทนที่เถ้ากลบร้อยละ 60 มีระดับในการติดขัดจากการไหลสูงมาก เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงจากผลของการแทนที่ ทำให้ความหนืดที่เกิดจากซีเมนต์เพสต์ลดลง จนไม่สามารถพามวลรวมไหลไปได้ อย่างเป็นเนื้อเดียวกัน

### 3.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการน้ำในส่วนผสมกับความสามารถในการไหล

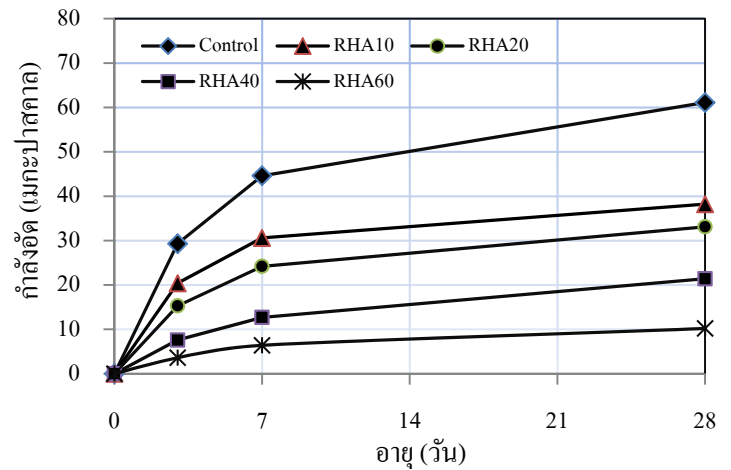
การทดสอบความสามารถในการไหลตัวของคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการน้ำกับระยะเวลาในการไหลผ่านมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50 เซนติเมตร และเวลาในการไหลผ่านกล่องวี ดังรูปที่ 6 พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่เพิ่มขึ้นจากการแทนที่เถ้ากลบไม่บดในส่วนผสมที่เพิ่มสูงขึ้นเพื่อคงความสามารถในการไหลผ่านที่ระยะ  $70 \pm 2.5$  เซนติเมตร ส่งผลต่อระยะเวลาในการไหลผ่านที่ระยะ 50 เซนติเมตร และเวลาในการไหลผ่านกล่องรูปทรงวีเพิ่มขึ้น เนื่องจากการดูดซึมน้ำของเถ้ากลบ และการแยกตัวในส่วนผสม เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของ EFNARC [15] อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่เหมาะสมไม่เกินกว่า 0.42 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง  
กับเวลาในการไหลแต่ละระยะ 50 ซม.และ  
เวลาในการไหลผ่านกลองวี

### 3.6 กำลังอัด

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ผสมเถ้าแกลบไม่บดแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน แสดงในรูปที่ 7 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ผสมเถ้าแกลบไม่บดแทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุมทุกส่วนผสม เนื่องจากขนาดอนุภาคที่ใหญ่ และโครงสร้างที่มีความพรุนสูง คอนกรีตมีความต้องการน้ำในส่วนผสมสูงขึ้น ทำให้เหลือน้ำส่วนเกินจากการทำปฏิกิริยากระจายอยู่ในรูปของโพรง ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่ลดลง [2] รวมถึงคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ผสมเถ้าแกลบไม่บดแทนที่ปูนซีเมนต์มีแนวโน้มกำลังอัดลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง



รูปที่ 7 กำลังอัดของคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้

## 4. สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. คอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ผสมเถ้าแกลบมีความต้องการเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบมากขึ้น
2. คอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ผสมเถ้าแกลบมี หน่วง น้ำหนักลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบสูงขึ้น
3. ความสามารถในการไหล (Flowability) ของคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ผสมเถ้าแกลบขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของเถ้าแกลบที่นำมาใช้ โดยเถ้าแกลบเมื่อใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มากขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการไหลตัวได้ลดลง คอนกรีตมีแนวโน้มเกิดการแยกตัวมากขึ้น
4. คอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ผสมเถ้าแกลบมีกำลังอัดลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบสูงขึ้น คอนกรีตมีกำลังอัดมากกว่า 30 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน อัตราส่วนเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

## เอกสารอ้างอิง

- [1] American Society for Testing and Material. "ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete". Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, 2011.

- [2] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. “ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีต”. พิมพ์ครั้งที่ 6. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ, 2553.
- [3] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ, “เถ้าแกลบในงานคอนกรีต”. สำนักพิมพ์ไชนส์ แอนด์ เอ็นจิเนียริง, อุบลราชธานี, 2552.
- [4] S. Rukzon, P. Chindaprasirt and R. Mahachai, “Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash”. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, vol.16, 2009, pp.242-247.
- [5] G. Sua-iam and N. Makul. “The Use of Residual Rice Husk Ash from Thermal Power Plant as Cement Replacement Material in Producing Self-Compacting Concrete”. Advanced Materials Research, vol. 415-417, 2012, pp.1490-1495.
- [6] R. Zerbino, G. Giaccio and G.C. Isaia. “Concrete incorporating rice-husk ash without processing”. Construction and building materials, vol. 25, 2011, pp.371-378.
- [7] G. Sua-iam and N. Makul. “Utilization of limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete incorporating high volumes of untreated rice husk ash as fine aggregate”. Construction and Building Materials, vol. 38, 2013, pp.455-464.
- [8] เฉลิมชัย วัฒนล้ำเลิศ และสมนึก ตั้งเดิมสิริกุล. “Self-compacting concrete และการใช้งานในอุตสาหกรรมการก่อสร้างด้วยชิ้นส่วนสำเร็จรูป Precast concrete”. วารสารคอนกรีต. ปีที่ 12, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2554.
- [9] American Society for Testing and Material “ASTM C150 Standard Specification for Portland Cement”. Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.01, 2009.
- [10] American Society for Testing and Material. “ASTM C494 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete”. Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, 2011.
- [11] American Society for Testing and Material. “ASTM C33 Standard Specification for Concrete Aggregates”. Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, 2011.
- [12] American Society for Testing and Material “ASTM C138 Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete”. Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, 2011.
- [13] American Society for Testing and Material. “ASTM C1611 Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete”. Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, 2011.
- [14] American Society for Testing and Material “ASTM C1621 Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring”. Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, 2011.
- [15] EFNARC. Specification and guidelines for self-compacting concrete, Surrey, UK, 2002.