

**การใช้เศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดเป็นวัสดุผสมเพิ่มร่วมกับเถ้าลอย  
ในคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง**

**Use of Ground Recycled Aggregate as an Admixture with Fly Ash  
in Self-Compacting Concrete**

**ไพฑูรย์ นาแซง อนุชาติ ลีอนันต์ศักดิ์ศิริ\* และ ชัยชาญ ยูวานศิริ**

**Phaithun Nasaeng Anuchat Leeanansaksiri\* and Chaichan Yuwanasiri**

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดขอนแก่น

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Northeastern University, Khon Kaen

\*E-mail: anuchat.lee@neu.ac.th

Received: Feb 08, 2023

Revised: Mar 13, 2023

Accepted: Mar 17, 2023

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่ใช้เศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดเป็นวัสดุผสมเพิ่มร่วมกับเถ้าลอย สำหรับคอนกรีตควบคุมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เป็นวัสดุประสาน และเถ้าลอยเป็นวัสดุผสมเพิ่มในอัตราส่วนร้อยละ 50 ต่อ 50 โดยน้ำหนัก ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก กำหนดอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานของทุกอัตราส่วนผสมเท่ากับ 0.38 ใช้สารลดน้ำพิเศษชนิดแอฟฟาลีนเพื่อเพิ่มความสามารถทำงานได้ ทำการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง ได้แก่ ความสามารถในการทำงานได้ การสูญเสียการยุบตัว กำลังอัด กำลังดึงผ่าซีก และการทดสอบความเร็วของคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่าง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเองมีความหนืดที่สูงขึ้น มีการสูญเสียการยุบตัวอย่างที่รวดเร็วขึ้น และมีคุณสมบัติเชิงกลที่ลดลงตามปริมาณเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดในส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่ใช้เศษคอนกรีตรีไซเคิลบดละเอียดร้อยละ 25 มีความสามารถทำงานที่ดี และมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน มากกว่าร้อยละ 75 ของคอนกรีตควบคุม

**คำสำคัญ:** คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง เถ้าลอย เศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียด วัสดุผสมเพิ่ม

**Abstract**

This research aimed to study the properties of self-compacting concrete (SCC) using ground recycled aggregate as an admixture combined with fly ash. For the control concrete, Portland cement type I was used as a binder and fly ash was used as an admixture at a ratio of 50:50 by weight. In this study, ground recycled aggregate was used to replace fly ash at the ratios of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% by weight. The water to binder ratio of all the mixes was 0.38. The naphthalene superplasticizer was used to increase workability. The properties of SCC, including workability, slump loss, compressive strength, splitting tensile and ultrasonic pulse velocity were tested. The results revealed that the SCC had increased viscosity, accelerated slump loss and decreased mechanical properties depending on the ratio of ground recycled aggregate. However, the SCC with 25% of ground recycled aggregate had good workability and compressive strength at 28 days more than 75% of the control concrete.

**Keywords:** Self-compacting concrete, Fly ash, Ground recycled aggregate, Admixture

## 1. บทนำ

คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง (Self-compacting concrete, SCC) คือ คอนกรีตชนิดพิเศษที่สามารถไหลรวมเข้ากันภายใต้น้ำหนักตัวเองโดยไม่ต้องใช้แรงสั่นสะเทือน เนื่องจากมีการเสียรูปที่ดีเยี่ยม เนื้อคอนกรีตมีความเหนียวไม่เกิดการแยกตัวและไม่เกิดการแยกน้ำ [1] คอนกรีตชนิดนี้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกเพื่อแก้ไขปัญหาคุณภาพการอัดแน่นของคอนกรีตที่ลดลงเนื่องจากฝีมือแรงงานในประเทศญี่ปุ่น [2] ปัจจุบันคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตัวเองถูกนำมาช่วยแก้ปัญหาจากข้อจำกัดหลายประการที่เกิดขึ้นในงานก่อสร้าง อาทิเช่น งานก่อสร้างโครงสร้างที่ไม่สามารถเทได้ภายในครั้งเดียว งานที่ต้องใช้เทคนิคพิเศษ งานโครงสร้างที่มีเหล็กเสริมซับซ้อนและหนาแน่นมาก อย่างไรก็ตามแม้ว่าการใช้คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตัวเองจะสามารถลดพลังงานในการจี้เขย่า ลดเวลาและค่าแรงในการก่อสร้าง ลดมลพิษทางเสียง ช่วยการทำงานในที่แคบได้งายขึ้นและลดการซึมผ่านของน้ำได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป แต่ก็มีข้อด้อยในด้านต้นทุนการผลิตที่สูงกว่าคอนกรีตทั่วไปเพราะจำเป็นต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่าเกือบสองเท่าโดยปริมาตร [2] และต้องใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการไหล แต่เมื่อพิจารณาคุณสมบัติที่โดดเด่นจึงไม่อาจปฏิเสธการพัฒนาส่วนผสมเพื่อใช้งานคอนกรีตชนิดนี้ได้

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาวัสดุทางเลือกหลายชนิดเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในการลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ เถ้าลอย [3] ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด [4] ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) [5] เถ้าแกลบ [6] เถ้าขานอ้อย [7] และวัสดุผงละเอียดอื่น ๆ อีกหลายชนิด จากรายงานวิจัยของ Suailam and Makul [8] พบว่าขนาดอนุภาคและลักษณะพื้นผิวของวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ส่งผลกระทบต่อความสามารถทำงานได้ (Workability) ของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง วัสดุที่มีรูปทรงกลมและผิวเรียบ อาทิเช่น เถ้าลอยช่วยเพิ่มความสามารถเทได้เมื่อใช้ในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น

มวลรวมรีไซเคิลบดละเอียด (Ground recycled aggregate, GRA) เป็นเศษวัสดุที่ได้จากการรื้อถอนงานก่อสร้าง หรือการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นการกำจัดวัสดุเหล่านี้จึงได้นำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้เป็นมวลรวมในคอนกรีต [9]-[11] นอกจากนี้ยังได้มีงานวิจัยศึกษาการใช้คอนกรีตเหลือทิ้งเพื่อเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ [12] โดยการใช้คอนกรีตเหลือทิ้งบดละเอียดเพื่อทดแทนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ไม่ควรเกินร้อยละ 15

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานร่วมกับเถ้าลอย ในอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก จากนั้นแทนที่เถ้าลอยด้วยเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดที่เพิ่มขึ้นต่อความสามารถในการไหล ความหนืด และความสามารถในการไหลผ่านกึ่งกีดขวางของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง ได้แก่ การทดสอบค่าการไหลแผ่ และระยะเวลาคอนกรีตเคลื่อนตัวสัมผัสวงเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร ค่าการไหลผ่านซี่เหล็กเส้นในแนวตั้ง ความสามารถในการไหลผ่านช่องแคบกล่องรูปทรงวี และการสูญเสียค่าการยุบตัว นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบของปริมาณเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดต่อคุณสมบัติเชิงกลของตัวอย่างคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ได้แก่ กำลังอัดของตัวอย่างทรงกระบอกที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน กำลังดึงผ่าซีกและความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่างที่อายุ 28 วัน

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการประยุกต์ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุผสมเพิ่มร่วมกับเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดเพื่อผลิตคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง โดยมีรายละเอียดของวิธีการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

### 2.1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุประสานใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 (Portland cement type I, OPC) ตามมาตรฐาน มอก. 15-2555 [13] วัสดุผสมเพิ่มใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูง (High calcium fly ash, HCFA) จากโรงไฟฟ้าเนชั่นพาวเวอร์ อำเภอสรีมหาโพธิ์ จังหวัดปราจีนบุรี และเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียด (Ground recycled aggregate, GRA) จากขยะคอนกรีตทรงกระบอกที่ทำการทดสอบกำลังอัดแล้วจากห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุก่อสร้าง มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ส่วนที่นำมาใช้เป็นเศษที่เหลือจากการย่อยขยะคอนกรีตเพื่อนำไปใช้เป็นมวลรวมหยาบในงานวิจัยอื่น ๆ โดยนำเศษที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มาบดละเอียดด้วยเครื่องบดแบบตกระทบให้มีขนาดใกล้เคียงกับเถ้าลอย ผลทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดแสดงดัง Table 1 การกระจายตัวและลักษณะทางกายภาพของอนุภาคแสดงดัง Figure 1 และ

Figure 2 ตามลำดับ มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำอัมตัมวิ  
แห่งที่มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 ค่าโมดูลัสความ  
ละเอียดเท่ากับ 2.63 และร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 2.02  
สำหรับมวลรวมหยาบใช้หินปูนย่อยอัมตัมวิแห่งขนาดใหญ่สุด  
3/4 นิ้ว มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.64 ค่าโมดูลัสความ  
ละเอียดเท่ากับ 7.37 และร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.25 ใช้  
น้ำประปา ในการผสมร่วมกับสารลดน้ำพิเศษชนิดแนฟทาซีน  
(Naphthalene superplasticizer, SP)

## 2.2. อัตราส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของตัวอย่าง  
คอนกรีตทั้งหมดเท่ากับ 0.38 กำหนดอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อ  
เถ้าลอยของคอนกรีตควบคุม (Control) เท่ากับร้อยละ 50:50  
โดยน้ำหนัก โดยใช้ปูนซีเมนต์เท่ากับ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์  
เมตร เถ้าลอยเท่ากับ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร น้ำ

เท่ากับ 190 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทรายเท่ากับ 825  
กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หินปูนย่อยเท่ากับ 829 กิโลกรัมต่อ  
ลูกบาศก์เมตร และสารลดน้ำพิเศษเท่ากับ 4.4 กิโลกรัมต่อ  
ลูกบาศก์เมตร จากนั้นแทนที่เถ้าลอยบางส่วนด้วยเศษมวลรวม  
รีไซเคิลบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ  
100 โดยน้ำหนัก ร้อยละอัตราส่วนวัสดุประสานแสดงใน  
Table 2 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ (ร้อยละโดยน้ำหนักวัสดุ  
ประสาน) ที่ใช้เพื่อเพิ่มความสามารถทำงานของคอนกรีต  
ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อเศษมวลรวมรีไซเคิล  
บดละเอียดในปริมาณที่ไม่ทำให้คอนกรีตเกิดการแยกตัวและมี  
คุณสมบัติใกล้เคียงกับคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง ทำ  
การผสมคอนกรีตโดยใช้เครื่องผสมแบบกระแทกเพื่อให้คอนกรีต  
มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุดหลังจากนั้นทำการทดสอบ  
คุณสมบัติคอนกรีตสดและเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ  
คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วตามอายุที่กำหนดไว้

**Table 1** The chemical composition and physical properties of HCFA and GRA

| Oxide (%)                               | HCFA  | GRA   |
|-----------------------------------------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>                        | 29.00 | 31.24 |
| CaO                                     | 23.80 | 61.75 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>          | 15.40 | 2.18  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>          | 11.80 | 2.27  |
| SO <sub>3</sub>                         | 6.78  | 1.15  |
| MgO                                     | 2.48  | 0.67  |
| Na <sub>2</sub> O                       | 1.88  | 0.10  |
| K <sub>2</sub> O                        | 1.99  | 0.23  |
| TiO <sub>2</sub>                        | 0.36  | 0.15  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>           | 0.27  | 0.08  |
| Specific density (g/cm <sup>3</sup> )   | 2.50  | 2.58  |
| Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)    | 3,159 | 5,237 |
| Retained on a 45-μm sieve by weight (%) | 27.0  | 24.7  |
| Median particle sizes (μm)              | 26.5  | 14.9  |

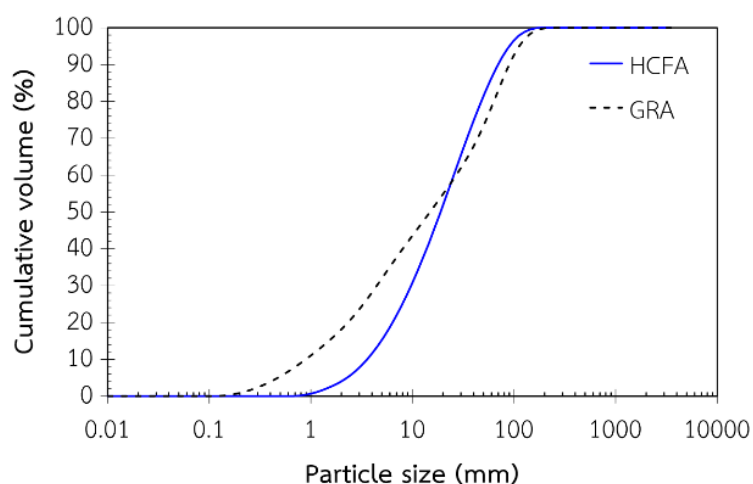


Figure 1 Particle size distribution of HCFA and GRA

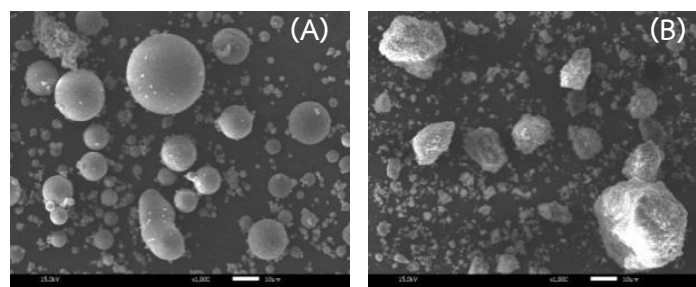


Figure 2 Scanning electron micrographs of HCFA particles (A) and GRA particles (B)

Table 2 The percentage of binder materials

| Mix     | %OPC | %HCFA | %GRA | %SP  |
|---------|------|-------|------|------|
| Control | 50   | 50    | -    | 0.88 |
| 25GRA   | 50   | 37.5  | 12.5 | 1.03 |
| 50GRA   | 50   | 25    | 25   | 1.26 |
| 75GRA   | 50   | 12.5  | 37.5 | 1.44 |
| 100GRA  | 50   | -     | 50   | 1.72 |

## 2.3. วิธีการทดสอบ

### 2.3.1. คอนกรีตสด

2.3.1.1. ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง ได้แก่ การไหลแผ่ (Slump flow) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1611M [14] และระยะเวลาคอนกรีตสัมผัสผิวลงเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร (T50 flow time) ค่าการไหลผ่านซีเหล็กเส้นใน

แนวตั้ง (L-box test) ความสามารถไหลผ่านช่องแคบกล่องรูปทรงวี (V-funnel) ตามมาตรฐานของ European Federation of National Associations Representing for Concrete (EFNARC) [15]

2.3.1.2. การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump loss) ทำการทดสอบทุก ๆ 15 นาทีหลังจากผสมคอนกรีตเสร็จเรียบร้อยแล้ว

### 2.3.2. คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

2.3.2.1. ทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 [16]

2.3.2.2. ทดสอบกำลังดึงผ่าซีก (Splitting tensile test) ของตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C496-96 [17]

2.3.2.3. ทดสอบความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่าง (Ultrasonic pulse velocity test) โดยใช้ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร และสูง 10 เซนติเมตร ทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C597 [18]

## 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

### 3.1. ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด

#### 3.1.1. ความสามารถในการไหลได้ของคอนกรีตสด

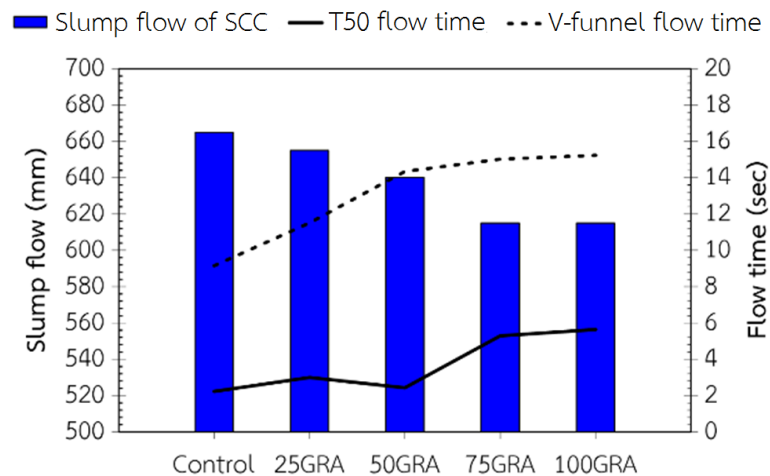
ความสามารถในการไหลแผ่ (Slump flow) ของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตัวเองแสดงดัง Figure 3 เมื่อพิจารณาตัวอย่างควบคุม (Control) พบว่ามีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 660-750 มิลลิเมตร ตามข้อแนะนำของ EFNARC [15] ดัง Table 3 จัดอยู่ในชั้นคุณภาพ SF2 การแทนที่เถ้าลอยด้วยเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดในปริมาณเพิ่มขึ้นโดยมีปริมาณปูนซีเมนต์คงที่ส่งผลทำให้คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตัวเองมีค่าการไหลแผ่ลดลง การลดลงของความสามารถในการเติมแทรกของเนื้อคอนกรีตเป็นผลกระทบเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของอนุภาควัสดุผสมเพิ่ม ซึ่งเมื่อพิจารณา Figure 2 (A) และ Figure 2 (B) พบว่าเถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีผิวเรียบช่วยเพิ่มการไหลและความสามารถในการทำงานของส่วนผสม [19] ในขณะที่อนุภาคของเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดมีลักษณะเป็นเหลี่ยมเป็นมุมพื้นที่ผิวขรุขระ ดังนั้นปริมาณการใช้ที่มากเกินไปส่งผลให้คอนกรีตสูญเสียความสามารถในการทำงานเป็นอย่างมากสังเกตได้จากอัตราส่วนผสมที่แทนที่เถ้าลอยด้วยเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดร้อยละ 75 (ตัวอย่าง 75GRA) และร้อยละ 100 (ตัวอย่าง 100GRA) โดยน้ำหนัก มีค่าการไหลแผ่น้อยกว่าตัวอย่างควบคุมประมาณร้อยละ 8 แม้ว่ามีการเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษมากกว่า 2 เท่าโดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการเพิ่มความสามารถทำงานได้ของสารลดน้ำในระบบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์พบว่าเมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ

จะทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}^{2+}$ ) ล้อมรอบเม็ดปูนดังแสดงใน Figure 4 หลังจากนั้นเมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ติดกับสารลดน้ำพิเศษที่มีประจุลบ ผลจากการทำให้เป็นกลางของประจุไฟฟ้าจะเกิดการก่อตัวเป็นแคลเซียมเชิงซ้อนและโมเลกุลของสารลดน้ำพิเศษจะกระจายตัวบนเม็ดปูนทำให้มีประจุเป็นลบ โดยเม็ดปูนซีเมนต์ที่มีประจุลบที่อยู่ติดกันจะแยกออกจากกันเนื่องจากแรงผลักไฟฟ้าช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้ [20] การเพิ่มเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดที่มีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก แต่สามารถละลายในน้ำได้ในปริมาณน้อยทำให้มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไม่เพียงพอจึงทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษช่วยเพิ่มค่าการไหลแผ่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าอัตราส่วนผสมที่แทนที่เถ้าลอยด้วยเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดไม่เกินร้อยละ 25 (ตัวอย่าง 25GRA) มีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 655 มิลลิเมตร ผ่านตามเกณฑ์ข้อแนะนำสำหรับใช้ในงานทั่วไปของ EFNARC

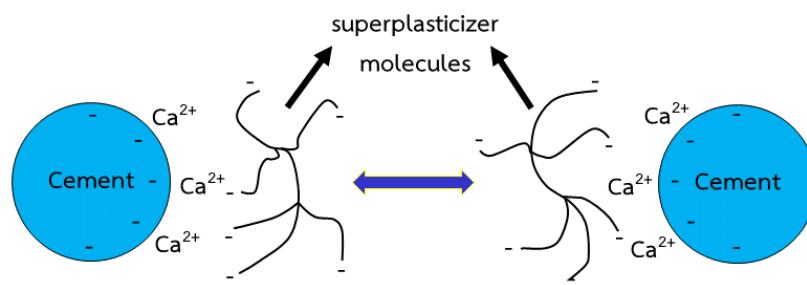
การวัดระยะเวลาแหว่ง 50 เซนติเมตร (T50 flow time) สามารถให้ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับความต้านทานการแยกส่วนและความสม่ำเสมอของไหลแผ่ในแต่ละอัตราส่วนเมื่อพิจารณาจากข้อแนะนำของ EFNARC คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตัวเองควรมีระยะเวลาแหว่ง 50 เซนติเมตร อยู่ในช่วง 2-5 วินาที จาก Figure 3 คอนกรีตควบคุมมีระยะเวลาแหว่ง 50 เซนติเมตรเท่ากับ 2.23 วินาที ในส่วนของอัตราส่วนผสมที่แทนที่เถ้าลอยด้วยเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในตัวอย่าง 25GRA และ 50GRA จากนั้นมีค่ามากกว่า 5 วินาที ในตัวอย่าง 75GRA และ 100GRA แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมคอนกรีตมีความหนืดเมื่อใช้เศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดในปริมาณมากเกินไปอยู่ในชั้นคุณภาพ VS2/VF2 มากกว่า 2 ดัง Table 3 สอดคล้องกับผลการทดสอบความสามารถไหลผ่านช่องแคบกล่องรูปทรงรีที่พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 9-15 วินาที จัดอยู่ในชั้นคุณภาพ VS2/VF2 อย่างไรก็ตามมีเพียงตัวอย่างควบคุมเท่านั้นที่มีระยะเวลาไหลผ่านช่องแคบใกล้เคียงชั้นคุณภาพ VS1/VF2 ที่ระบุค่าไว้น้อยกว่า 8 สำหรับอัตราส่วนที่ใช้เศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดในปริมาณสูง คือ ตัวอย่าง 75GRA และ 100GRA ใช้เวลาในการไหลผ่านช่องแคบทรงรีนานที่สุดเท่ากับ 15 วินาที ทั้งนี้สาเหตุหลักเนื่องจากอนุภาคของเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าและพื้นที่ผิวจำเพาะสูงส่งผลต่อความต้องการของเหลวที่ใช้ในการเคลือบผิวมากขึ้นทำให้เนื้อคอนกรีตมีความหนืดสูงและส่งผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการไหลลดลง [21]

**Table 3** EFNARC standards [15]

| Capacity        | Tests           | Standard criteria |                     |
|-----------------|-----------------|-------------------|---------------------|
|                 |                 | Quality           | Allowable           |
| Flow ability    | Slump flow test | Slump class       | Slump flow (mm)     |
|                 |                 | SF1               | 550-650             |
|                 |                 | SF2               | 660-750             |
|                 |                 | SF3               | 760-850             |
| Filling ability | V-funnel test   | Viscosity class   | V-funnel time (sec) |
|                 |                 | VS1/VF2           | <8                  |
|                 |                 | VS2/VF2           | 9-25                |
|                 | T50             | Viscosity class   | T50 time (sec)      |
|                 |                 | VS1/VF2           | <2                  |
| Passing ability | L-box test      | Passing class     | H2/H1 Index         |
|                 |                 | PA1               | >0.8 with 2 bar     |
|                 |                 | PA2               | >0.8 with 3 bar     |



**Figure 3** Slump flow, T50 flow time and V-funnel flow time of SCC



**Figure 4** Schematic of plasticizing function of superplasticizer for OPC [20]

ค่าการไหลผ่านซีเมนต์เส้นในแนวตั้ง (L-box test) แสดงดัง Figure 5 เป็นการทดสอบโดยวางกล่องทดสอบรูปทรงแอลชนิดที่มีเหล็กกีดขวาง 3 เส้น โดยจะต้องวางบนพื้นที่ได้ระดับพร้อมปิดแผ่นปิดกั้นการไหลให้สนิทและเทคอนกรีตที่ผสมเสร็จแล้วลงในกล่อง L-box ในแนวตั้งจนเต็ม จากนั้นเปิดแผ่นปิดกั้นเพื่อให้คอนกรีตไหลผ่านเหล็กกีดขวางทั้ง 3 เส้น อย่างอิสระจนหยุดไหลดัง Figure 6 ทำการวัดความสูงของระดับผิวหน้าคอนกรีตที่ต้นรางและที่ปลายรางเพื่อนำไปคำนวณหาค่าดัชนี H2/H1

ค่าดัชนี H2/H1 จากการไหลผ่านซีเมนต์เส้นในแนวตั้งแสดงดัง Figure 5 พบว่าตัวอย่าง Control, 25GRA, 50GRA, 75GRA และ 100GRA มีค่าเท่ากับ 0.88, 0.80,

0.69, 0.65 และ 0.50 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่าง Control ซึ่งเป็นตัวอย่างควบคุมผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ใน Table 3 จัดอยู่ในชั้นคุณภาพ PA2 เมื่อพิจารณาผลของการแทนที่เถ้าลอยด้วยเศษมวลรวมรีไซเคิลแต่ละเอียง พบว่าการใช้เศษมวลรวมรีไซเคิลแต่ละเอียงในปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตมีค่าดัชนีการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง H2/H1 ลดลงตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ Pensuwan [22] รวมถึงงานวิจัยของ Nasaeng and Yuwanasiri [23] อย่างไรก็ตามตัวอย่าง 25GRA มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ใน Table 3 จัดอยู่ในชั้นคุณภาพ PA2 สำหรับอัตราส่วนที่ใช้เศษมวลรวมรีไซเคิลแต่ละเอียงในปริมาณสูง คือ ตัวอย่าง 50GRA, 75GRA และ 100GRA ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้

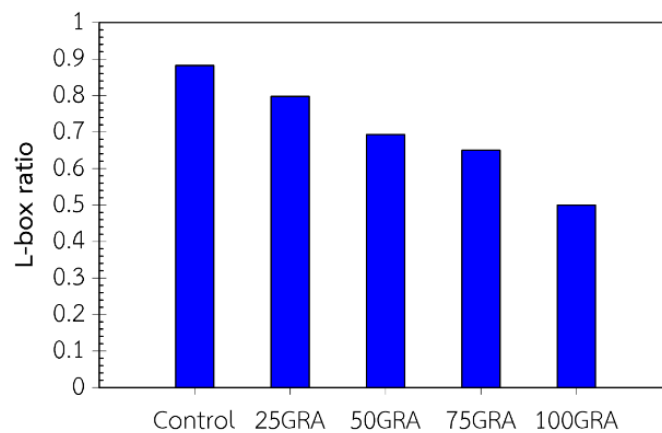


Figure 5 H2/H1 index values of L-box test



Figure 6 L-box test

### 3.1.2. ผลการทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัว

การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump loss) ทำการทดสอบทุก ๆ 15 นาทีหลังจากผสมคอนกรีตเสร็จเรียบร้อย ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของตัวอย่าง Control, 25GRA, 50GRA, 75GRA และ 100GRA ดัง Figure 7 พบว่าการแทนที่เถ้าลอยด้วยเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดในปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตเกิดการสูญเสียค่าการยุบตัวที่มากขึ้น เมื่อเทียบกับช่วงระยะเวลาที่เท่ากัน สอดคล้องกับการทดสอบความสามารถในการไหลแผ่ของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง การแทนที่เถ้าลอยด้วยเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดในปริมาณมากเกินไปส่งผลให้คอนกรีตสูญเสียความสามารถในการทำงานเป็นอย่างมาก รวมถึงระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ลดลง

เมื่อพิจารณาตัวอย่าง Control การสูญเสียค่าการยุบตัวเป็นสภาวะปกติสำหรับคอนกรีตที่เริ่มแข็งตัวไปเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไปจะเห็นพฤติกรรมของการยุบตัวมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับตัวอย่าง 25GRA พบว่ามีค่ายุบตัวของใกล้เคียงกับตัวอย่าง Control เมื่อทดสอบในระยะเวลาเดียวกัน ในขณะที่ตัวอย่าง 50GRA, 75GRA และ 100GRA มีการสูญเสียค่าการยุบตัวมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมอาจมีสาเหตุเนื่องจากเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าเถ้าลอยทำให้ต้องการของเหลวไปเคลือบผิวสูงอีกทั้งอุณหภูมิของเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดอาจมีอุณหภูมิสูงทำให้สามารถดูดน้ำอิสระเมื่อเวลาผ่านไป โดยการสูญเสียน้ำในส่วนผสมเป็นสาเหตุหลักของการสูญเสียความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตผสมเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียด ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim and Choi [12]

## 3.2. ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

### 3.2.1. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ผลทดสอบกำลังอัด (Compressive strength) ของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตรที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน ของตัวอย่าง Control, 25GRA, 50GRA, 75GRA และ 100GRA แสดงดัง Figure 8 โดยกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 159.8, 148.7, 143.8, 140.7 และ 132.1 ksc ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน เท่ากับ 261.1, 245.1, 210.7, 172.1 และ 152.7 ksc ตามลำดับ และกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 470.0, 366.2, 287.2,

220.3 และ 176.2 ksc ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดตามอายุของการบ่มทุกอัตราส่วนผสม เมื่อพิจารณากำลังอัดที่อายุ 3 วัน พบว่าทุกอัตราส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์ในทุกอัตราส่วนผสมมีค่าเท่ากัน ดังนั้นการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุดันเป็นผลของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำสอดคล้องกับ Chindaprasirt and Jaturapitakkul [21] ได้ศึกษาพบว่า การบ่มทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นได้ต่อเนื่อง ส่งผลให้โครงสร้างของเนื้อซีเมนต์เฟสแน่นขึ้น และมีความแข็งแรง ส่งผลให้เกิดการพัฒนากำลังรับแรงอัดตามอายุของตัวอย่างคอนกรีต เมื่อพิจารณากำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน พบว่าตัวอย่าง Control มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียด ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) อย่างต่อเนื่องเป็นผลทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าลอยด้วยเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดที่เพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณเถ้าลอยลดลงการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดมีการทำปฏิกิริยาที่ต่ำมากสอดคล้องกับการศึกษาที่ไว้สุดที่อุดมด้วยแคลเซียมออกไซด์ชนิดอื่นของ Nasaeng and Yuwanasiri [23]

### 3.2.2. ผลการทดสอบกำลังดึงผ่าซีกและความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่าง

ผลทดสอบกำลังดึงผ่าซีก (Splitting tensile) ของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตรที่อายุ 28 วัน แสดงดัง Table 4 และ Figure 9 พบว่าตัวอย่าง Control, 25GRA, 50GRA, 75GRA และ 100GRA มีค่ากำลังดึงผ่าซีกเท่ากับ 39.8, 34.8, 33.5, 27.1 และ 17.7 ksc ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการแทนที่เถ้าลอยด้วยเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่ากำลังดึงผ่าซีกของตัวอย่างทดสอบทำให้มีกำลังรับแรงดึงลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 3-38 สอดคล้องกับกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบที่อายุ 28 วัน ที่มีกำลังรับแรงอัดลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 22-63 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง Control

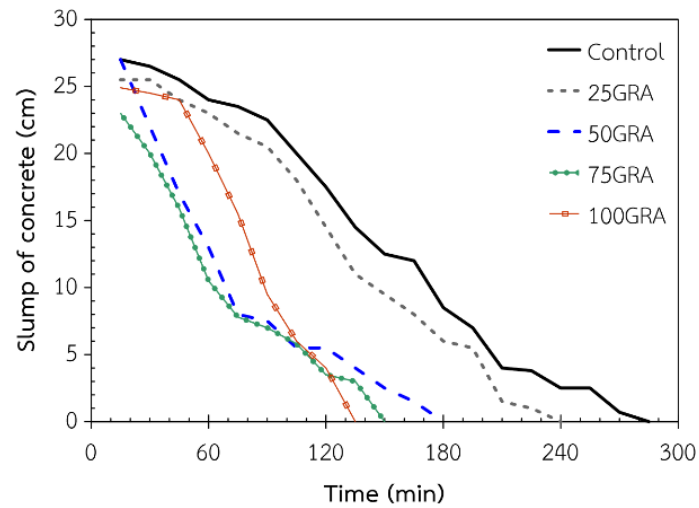


Figure 7 Slump loss of SCC

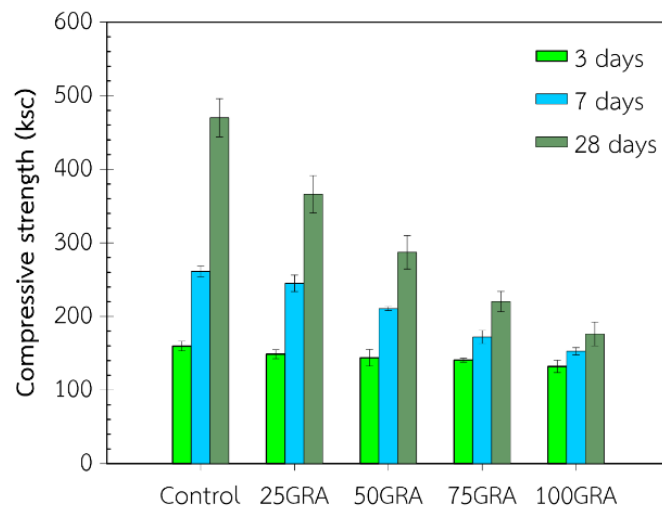


Figure 8 Compressive strength of SCC

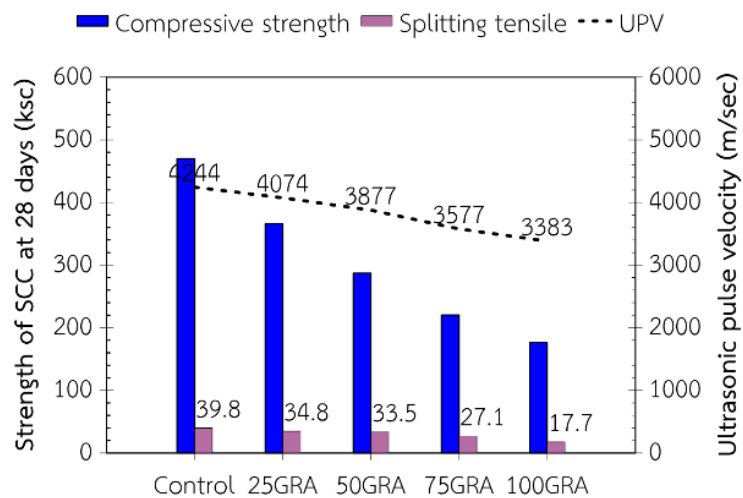


Figure 9 Compressive strength, splitting tensile and UPV results of SCC at 28 days

**Table 4** Compressive strength, splitting tensile strength, and ultrasonic pulse velocity of SCC at 28 days

| Mix     | Compressive strength<br>(ksc) (Percentage) | Splitting tensile strength<br>(ksc) (Percentage) | Ultrasonic pulse velocity<br>(m/sec) (Percentage) |
|---------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Control | 470 (100)                                  | 40 (100)                                         | 4244 (100)                                        |
| 25GRA   | 366 (78)                                   | 35 (97)                                          | 4074 (96)                                         |
| 50GRA   | 287 (61)                                   | 34 (88)                                          | 3877 (91)                                         |
| 75GRA   | 220 (47)                                   | 27 (53)                                          | 3577 (84)                                         |
| 100GRA  | 176 (37)                                   | 18 (62)                                          | 3383 (80)                                         |

สำหรับผลการทดสอบความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่าง (Ultrasonic pulse velocity, UPV) โดยใช้ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร และสูง 10 เซนติเมตร ทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน แสดงดัง Figure 10 ตัวอย่าง Control, 25GRA, 50GRA, 75GRA และ 100GRA มีค่าความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่างเท่ากับ 4244, 4074, 3877, 3577 และ 3383 m/sec ตามลำดับ ดัง Figure 9 จากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่าง Control แสดงค่าความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่างทดสอบสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง 25GRA, 50GRA, 75GRA และ 100GRA การแทนที่เถ้าลอยด้วยเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่า

ความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่างทดสอบลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 4-20 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ผลการทดสอบนี้ยืนยันได้ว่าการใช้เศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดเป็นวัสดุผสมเพิ่มส่งผลเสียต่อโครงสร้างของเพสต์ในตัวอย่างคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตัวเองอาจทำให้เกิดโพรงหรือเนื้อเจลที่มีลักษณะหลวมส่งผลให้การไหลผ่านของคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่างทำได้ช้าและส่งผลเสียต่อกำลังรับแรงอัดสอดคล้องกับการศึกษาของ Lao-unand et al. [24] ที่ศึกษาพบว่าตัวอย่างทดสอบที่มีคลื่นความถี่สูงไหลผ่านได้เร็วกว่าหรือตัวอย่างทดสอบที่มีค่าความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่างมากกว่าจะแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่สูงตามไปด้วย

**Figure 10** Ultrasonic pulse velocity test

#### 4. บทสรุป

การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่ใช้เศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดเป็นวัสดุผสมเพิ่มร่วมกับเถ้าลอย โดยการแทนที่เถ้าลอยด้วยเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การแทนที่เถ้าลอยด้วยเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดส่งผลทำให้ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต รวมถึงด้านกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบ ด้านกำลังดึงผ่าซีก และความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่าน ตัวอย่างลดลงเมื่อแทนที่เถ้าลอยด้วยเศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามแนะนำให้ใช้เศษมวลรวมรีไซเคิลบดละเอียดเพื่อช่วยในการลดขยะที่เกิดจากสิ่งก่อสร้างไม่ควรแทนที่เกินร้อยละ 25 เนื่องจากการแทนที่ดังกล่าวยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับของ EFNARC และมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของคอนกรีตควบคุม

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืนสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนทุนวิจัยในการจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ในการทดสอบ และสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่อนุเคราะห์ให้ใช้อุปกรณ์และห้องทดสอบ

#### 6. References

- [1] Shi, C. and et al. 2015. A review on mixture design methods for self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**. 84: 387-398.
- [2] Okamura, H. and Ouchi M. 2003. Self-compacting concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**. 1(1): 5-15.
- [3] Khatib, J.M. 2008. Performance of self-compacting concrete containing fly ash. **Construction and Building Materials**. 22(9): 1963-1971.
- [4] Zhao, H. and et al. 2015. The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. **Journal of Cleaner Production**. 95: 66-74.
- [5] Sasanipour, H., Aslani, F. and Taherinezhad, J. 2019. Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**. 227: 1-12.
- [6] Chopra, D., Siddique, R. and Kunal. 2015. Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash. **Biosystems Engineering**. 130: 72-80.
- [7] Akram, T., Memon, S.A. and Obaid, H. 2009. Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. **Construction and Building Materials**. 23(2): 703-712.
- [8] Sua-lam, G. and Makul, N. 2013. Incorporation of agricultural and industrial by-products in self-compacting concrete: A review. **KMUTT Research & Development Journal**. 36(4): 517-552. (in Thai)
- [9] Poon, C.S.Z., Shui, H. and Lam, L. 2004. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**. 18(6): 461-468.
- [10] Etxeberria, M., Mari, A.R. and Vazquez, E. 2007. Recycled aggregate concrete as structural material. **Materials and Structures**. 40(5): 529-541.
- [11] Sata, V., Wongs, A. and Chindaprasit, P. 2013. Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. **Construction and Building Materials**. 42: 33-39.
- [12] Kim, Y.J. and Choi, Y.W. 2012. Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement. **Construction and Building Materials**. 30: 500-504.
- [13] Thailand Industrial Standards Institute (TISI). 2019. **TIS 15-2562 (2019) Portland Cement**. [https://www3.tisi.go.th/hscodex/hscodex\\_view.asp?id=1](https://www3.tisi.go.th/hscodex/hscodex_view.asp?id=1). Accessed 8 January 2023. (in Thai)

- [14] ASTM International. 2018. **ASTM 1611/C1611M-14 Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete.** [https://www.astm.org/c1611\\_c1611m-14.html](https://www.astm.org/c1611_c1611m-14.html). Accessed 12 January 2023.
- [15] European Federation of National Associations Representing for Concrete (EFNARC). 2002. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete.** <https://www.feb.unesp.br/pbastos/c.especiais/Efnarc.pdf>. Accessed 15 January 2023.
- [16] ASTM International. 2021. **ASTM C39/C39M-21 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.** [https://www.astm.org/c0039\\_c0039m-21.html](https://www.astm.org/c0039_c0039m-21.html). Accessed 12 January 2023.
- [17] ASTM International. 2017. **ASTM C496-96 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.** <https://www.astm.org/c0496-96.html>. Accessed 12 January 2023.
- [18] ASTM International. 2016. **ASTM C597-16 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.** <https://www.astm.org/c0597-16.html>. Accessed 12 January 2023.
- [19] Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S. and Sirivivatnanon, V. 2004. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. **Cement and Concrete Research.** 34(7): 1087-1092.
- [20] Xie, J. and Kayali, O. 2016. Effect of superplasticiser on workability enhancement of Class F and Class C fly ash-based geopolymers. **Construction and Building Materials.** 122: 36-42.
- [21] Chindaprasirt, P. and Jaturapitakkul, C. 2006. **Cement, Pozzolan and Concrete. 1<sup>st</sup> edition.** Bangkok: Thailand Concrete Association. (*in Thai*)
- [22] Pensuwan, B. and et al. 2021. Effect of calcium carbonate powder on flowing performances and compressive strength of lightweight aggregate self-compacting concrete (LWASCC). **Vocational Education Innovation and Research Journal.** 5(2): 21-30. (*in Thai*)
- [23] Nasaeng, P. and Yuwanasiri, C. 2014. Effects of fly ash mixed with calcium carbide residue and ground bagasse ash content as filler on the properties of self-compacting concrete. In: **Proceedings of the 2<sup>nd</sup> National and International Conference Northeastern University,** 24 May 2014. Khon Kaen, Thailand. (*in Thai*)
- [24] Lao-unand, J. and et al. 2022. Use of car broken glass as fine aggregate in mortar. **Engineering Journal of Research and Development.** 33(3): 47-57. (*in Thai*)