



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การหาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ด้วยวิธีทางภาพถ่าย

Determination of Coarse Aggregate Content in Hardened Concrete

by Image Processing

ดร.ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 3244
สัญญาเลขที่ 131/2561

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การหาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว
ด้วยวิธีทางภาพถ่าย

Determination of Coarse Aggregate Content in Hardened Concrete
by Image Processing

ดร.จิตาพร เชื้อสวัสดิ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ปีงบประมาณ 2561

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ สัญญาเลขที่ 131/2561

Acknowledgement

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant No. 131/2561)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาวิธีการหาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีทางภาพถ่าย โดยพิจารณาผลกระทบของขนาดมวลรวมใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ รูปทรงหน้าตัด ขนาดหน้าตัด อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด และอายุที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้การศึกษาจากตัวอย่างที่ถูกเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ โดยตัวอย่างที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่สุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ผลการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 5.13% ในขณะที่ตัวอย่างที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่สุด $1 \frac{1}{2}$ นิ้ว มีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าชัดเจน และมีแนวโน้มสูงขึ้นหากเป็นตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก ส่วนผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นจะทำให้ปริมาณมวลรวมหยาบที่หาได้จากวิธีการทางภาพถ่ายนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนผลกระทบด้านรูปทรงหน้าตัด ขนาดหน้าตัด อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด และอายุที่แตกต่างกัน ไม่แสดงแนวโน้มว่ามีผลกระทบต่อวิธีการหาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีทางภาพถ่ายอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: กระบวนการทางภาพถ่าย, ปริมาณมวลรวมหยาบ, คอนกรีตทรงกระบอก, คอนกรีตทรงลูกบาศก์, ส่วนผสมคอนกรีต, คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว, ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ

Abstract

The objectives of this investigation were to study the determination of coarse aggregate content in hardened concrete via the method of image processing. The effects of the maximum size of aggregate, the shape of the cross-section area of the sample, size of the cross-section area of the sample, water to cement ratio, sand to total aggregate ratio, and age in concrete were considered in this study. The samples were prepared in a laboratory. The experimental results showed that both the maximum size of aggregate and water to cement ratio significantly affect the determination of coarse aggregate content in hardened concrete when examined via the image processing method. The experimental results of the sample with $\frac{3}{4}$ " of the maximum size of aggregate have a maximum error of 5.13%, but the experimental results of the sample with $1\frac{1}{2}$ " of the maximum size of aggregate are much higher. Moreover, the experimental results tend to increase error with the cylindrical concrete sample. When examining water to cement, error tended to increase when the water to cement ratio increased. On the other hand, the shape of the cross-section area of the sample, size of the cross-section area of the sample, sand to total aggregate ratio, and age did not significantly affect the determination of coarse aggregate content in hardened concrete when examined via the image processing method.

Keywords: Image processing, coarse aggregate content, Cylindrical concrete, Cube concrete, Mix proportion, Hardened concrete, Maximum size of aggregate

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| กิตติกรรมประกาศ | ก |
| บทคัดย่อภาษาไทย | ข |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| สารบัญภาพ | ช |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 1 |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 ชนิดและแหล่งหินที่นำมาใช้ผสมคอนกรีต | 4 |
| 2.2 คุณสมบัติของหินหรือมวลรวมหยาบ | 4 |
| 2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ | 5 |
| 2.2.2 คุณสมบัติเชิงกล | 9 |
| 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 10 |
| 2.3.1 การหาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัว | 10 |
| 2.3.2 วิธีการทางภาพถ่าย | 10 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย | 13 |
| 3.1 ทัวไป | 13 |
| 3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง | 13 |
| 3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง | 13 |
| 3.2.2 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ | 15 |
| 3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง | 17 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 3.3 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ | 17 |
| 3.4 การหาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวด้วยวิธีทางภาพถ่าย | 18 |
| 3.4.1 การทดสอบด้วยวิธีการทางภาพถ่าย | 18 |
| 3.4.2 การทดสอบหาพื้นที่มวลรวมหยาบ | 20 |
| 3.4.3 การคำนวณหาปริมาณมวลรวมหยาบ | 20 |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง | 22 |
| 4.1 ผลการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว | 22 |
| 4.2 ผลกระทบของขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบต่อการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบ ในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีทางภาพถ่าย | 23 |
| 4.3 ผลกระทบของรูปทรงหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีตต่อการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบ ของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีทางภาพถ่าย | 24 |
| 4.4 ผลกระทบของขนาดหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีตต่อการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบ ของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีทางภาพถ่าย | 25 |
| 4.5 ผลกระทบของอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดต่อการวิเคราะห์หาปริมาณ มวลรวมหยาบของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีทางภาพถ่าย | 26 |
| 4.6 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ต่อการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบ ของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีทางภาพถ่าย | 27 |
| 4.7 ผลกระทบของอายุคอนกรีตต่อการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบของคอนกรีตที่ แข็งตัวแล้วด้วยวิธีทางภาพถ่าย | 28 |
| บทที่ 5 สรุปผล | 30 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง | 30 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 30 |
| บรรณานุกรม | 32 |
| ภาคผนวก | 33 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ | 15 |
| ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ | 16 |
| ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์และความคลาดเคลื่อนปริมาณมวลรวมหยาบ | 22 |

สารบัญภาพ

| | หน้า |
|--|------|
| ภาพที่ 2.1 ลักษณะหินแต่ละชนิด | 4 |
| ภาพที่ 2.2 การแบ่งชนิดของมวลรวมตามรูปร่าง | 6 |
| ภาพที่ 2.3 การเรียงตัวของขนาดคละ | 6 |
| ภาพที่ 2.4 ตัวอย่างแผนภูมิขนาดคละของมวลรวมที่มีขนาดคละได้ตามกำหนด | 7 |
| ภาพที่ 2.5 ตัวอย่างแผนภูมิขนาดคละของมวลรวมที่มีขนาดคละไม่ได้ตามกำหนด | 8 |
| ภาพที่ 2.6 สภาพความชื้นของมวลรวม | 8 |
| ภาพที่ 2.7 ผลเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการทำนายมวลโดยการสุ่มตัวอย่าง | 9 |
| ภาพที่ 2.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จาก DIP ที่ปรับแก้แล้วกับการร่อนผ่านตะแกรง | 12 |
| ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง | 13 |
| ภาพที่ 3.2 ขนาดคละของมวลรวมละเอียด | 14 |
| ภาพที่ 3.3 ขนาดคละของมวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว | 14 |
| ภาพที่ 3.4 ขนาดคละของมวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุด $1 \frac{1}{2}$ นิ้ว | 15 |
| ภาพที่ 3.5 การตัดก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์ | 18 |
| ภาพที่ 3.6 ขั้นตอนการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบ | 18 |
| ภาพที่ 3.7 ภาพถ่ายตัวอย่างก่อนทดสอบ | 19 |
| ภาพที่ 3.8 ภาพถ่ายตัวอย่างหลังปรับแต่งเพิ่มเติมให้เห็นขอบเขตของหินที่ชัดเจน | 19 |
| ภาพที่ 3.9 ภาพตัวอย่างवाद้าที่ผ่านการคัดเลือกขอบเขตของมวลรวมหยาบ | 20 |
| ภาพที่ 3.10 ภาพตัวอย่างที่ทำการหาพื้นที่ของมวลรวมหยาบ | 21 |
| ภาพที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบ ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุดต่างกัน | 23 |
| ภาพที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบ ในคอนกรีตที่มีรูปทรงหน้าตัดตัวอย่างต่างกัน | 24 |
| ภาพที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบ ในคอนกรีตที่มีขนาดหน้าตัดตัวอย่างต่างกัน | 25 |
| ภาพที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบ ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด (s/a) ต่างกัน | 26 |
| ภาพที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบ ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ต่างกัน | 27 |
| ภาพที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบ ในคอนกรีตที่มีอายุต่างกัน | 28 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

สัดส่วนผสมของคอนกรีตเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในด้านกำลังและความสามารถในการต้านทานความเสื่อมสภาพประเภทต่างๆ ดังนั้น เมื่อคอนกรีตเกิดปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพ ทั้งในช่วงอายุต้นหรือในระยะยาวก็ตาม ส่วนผสมของคอนกรีตถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาหรือแนวทางแก้ไขของคอนกรีตนั้นๆ จึงมีความจำเป็นในการตรวจสอบหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แท้จริงแล้ว

จนถึงปัจจุบัน มีวิธีการหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แท้จริงแล้วหลายวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้นมา แต่ยังไม่มีการใดเป็นที่นิยมและสามารถตรวจสอบได้อย่างครอบคลุมโดยทั่วกัน เนื่องจากความหลากหลายของวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตคอนกรีต อีกทั้ง วิธีการมีความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้น การวิเคราะห์หาปริมาณของวัสดุชนิดต่างๆ ที่นำมาใช้ในผสมคอนกรีตของแต่ละวิธีจึงมีข้อจำกัดแตกต่างกันไป เช่น ข้อจำกัดด้านชนิดของวัสดุประสานหรือมวลรวมที่ใช้ หรือข้อจำกัดด้านการใช้อุปกรณ์เฉพาะและเทคนิควิเคราะห์ที่ยุ่งยากซับซ้อน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยังมีวิธีการอื่นๆ ที่สามารถหาได้เฉพาะบางปริมาณของสัดส่วนผสมคอนกรีต เช่น ปริมาณปูนซีเมนต์, ปริมาณน้ำ, สัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน, ปริมาณมวลรวม เป็นต้น

มวลรวมหยาบหรือหินเป็นวัสดุหลักชนิดหนึ่ง ที่นำมาใช้ในการทำคอนกรีต ถึงแม้ว่าโดยทั่วไปจะถือว่าหินเป็นวัสดุเฉื่อยไม่มีการทำปฏิกิริยาในคอนกรีตแต่หินก็มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเช่นกัน และมักจะถูกใช้เป็นส่วนผสมที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักมากที่สุดในคอนกรีต หินจึงเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญในสัดส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งในปัจจุบันนี้ยังไม่ค่อยมีวิธีการสำหรับหาปริมาณหินในคอนกรีตโดยเฉพาะที่มีความแม่นยำและสามารถใช้ได้โดยทั่ว ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีความมุ่งหมายที่จะพัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณหินในคอนกรีตที่แท้จริงแล้ว ซึ่งมีความแตกต่างทั้งขนาดและรูปร่างที่แตกต่าง และจะนำไปสู่การพัฒนาวิธีการหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แท้จริงแล้วต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาวิธีการหาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แท้จริงแล้วโดยวิธีทางภาพถ่ายที่มีความแม่นยำและสามารถใช้กับตัวอย่างได้อย่างเหมาะสม ดังนั้น เพื่อเป็นการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการนี้ ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้จึงมีความแตกต่างกัน คือ

- 1) หินที่มีขนาดมวลรวมใหญ่สุดแตกต่างกันถูกนำมาใช้ในการผสมเป็นตัวอย่างคอนกรีต
- 2) รูปทรงหน้าตัดตัวอย่างแตกต่างกันถูกนำมาใช้ในการผสมเป็นตัวอย่างคอนกรีต
- 3) ขนาดของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบมีความแตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในการศึกษาเพื่อพัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณหินด้วยวิธีการทางภาพถ่ายในงานวิจัยนี้ ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก (Cylinder) และทรงลูกบาศก์ (Cube) ถูกเตรียมขึ้นเพื่อนำมาใช้ในการศึกษา คอนกรีตจะถูกผสมขึ้นในห้องปฏิบัติการทดสอบ โดยใช้มวลรวมหยาบหรือหินที่มีความแตกต่างกัน คือ ขนาดคละ (Grading) 2 ประเภท มาผสมคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคือ 0.40, 0.50 และ 0.60 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบ (s/a) เป็น 3 สัดส่วนโดยปริมาตร ซึ่งจะทำการทดสอบที่ 2 ช่วงอายุคือ ช่วงอายุต้นและช่วงอายุปลาย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ด้านวิชาการ

1) ทำให้ทราบถึงผลกระทบของขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบต่อการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีทางภาพถ่าย เมื่อขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการผสมคอนกรีตมีขนาดแตกต่างกัน

2) ทำให้ทราบถึงผลกระทบของรูปร่างหน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีตต่อการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีทางภาพถ่าย เมื่อรูปร่างหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบแตกต่างกัน

3) ทำให้ทราบถึงผลกระทบของขนาดหน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีตต่อการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีทางภาพถ่าย เมื่อขนาดหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบแตกต่างกัน

4) ทำให้ทราบถึงผลกระทบของอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดต่อการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีทางภาพถ่าย เมื่ออัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมที่ใช้มีค่าแตกต่างกัน

5) ทำให้ทราบถึงผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีทางภาพถ่าย เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้มีค่าแตกต่างกัน

6) ทำให้ทราบถึงผลกระทบของอายุต่อการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีทางภาพถ่าย เมื่อตัวอย่างคอนกรีตที่อายุแตกต่างกัน

โดยผลการศึกษาจะเป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนากระบวนการหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วต่อไปในอนาคต

ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์ อุตสาหกรรม

หากสามารถพัฒนาวิธีการหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพได้ เมื่อเกิดข้อสงสัยว่า ส่วนผสมของคอนกรีตเป็นไปตามที่ออกแบบหรือไม่ก็จะสามารถตรวจสอบและแก้ปัญหาความขัดแย้งที่

เกิดขึ้นระหว่างผู้เกี่ยวข้องได้ หรือเมื่อคอนกรีตเกิดปัญหาจำเป็นต้องมีการตรวจสอบและประเมินผลเพื่อหาสาเหตุหรือประเมินอายุการใช้งาน ส่วนผสมคอนกรีตอาจเป็นข้อมูลหนึ่งสำคัญที่จำเป็นต่อการพิจารณาด้านต่าง ๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หินหรือมวลรวมหยาบที่นำมาใช้ในงานคอนกรีตนั้นไม่ควรทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์หรือสารอื่น ๆ ซึ่งในประเทศไทยมีการนำหินหรือมวลรวมหยาบชนิดต่าง ๆ มาใช้ผสมคอนกรีต ดังนี้

2.1 ชนิดและแหล่งหินที่นำมาใช้ผสมคอนกรีต

การจำแนกประเภทหินตามการกำเนิดจากธรรมชาติ แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ หินอัคนี หินตะกอนหรือหินชั้น และหินแปร ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งหินที่สามารถนำมาผสมคอนกรีตจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์ ในประเทศไทยมีการนำหินชนิดต่าง ๆ มาใช้ผสมคอนกรีต ได้แก่



ภาพที่ 2.1 ลักษณะหินแต่ละชนิด

หินตะกอนหรือหินชั้นที่นิยมใช้ ได้แก่ หินปูน (limestone) ซึ่งเกิดจากการทับถมตัวของซากสัตว์ทะเล เป็นหินที่นำมาใช้ผสมคอนกรีตมากที่สุดในประเทศ เนื่องจากมีแหล่งหินอยู่มากเกือบทั่วประเทศ โดยมีแหล่งผลิตสำคัญอยู่แถบจังหวัด สระบุรี ราชบุรี ชลบุรี กำแพงเพชร ลำปาง เลย และ นครศรีธรรมราช มีค่าความแข็งแรงประมาณ 55-105 กก./ลบ.ซม.

หินอัคนีมีความแข็งแรงกว่าหินปูนแต่ไม่มีผู้ผลิตมากนัก เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตและค่าสึกหรอสูง มักจะผลิตในท้องถิ่นที่ไม่สามารถหาแหล่งหินปูนได้ หินอัคนีที่มีการผลิตในประเทศ ได้แก่ หินแกรนิต มีแหล่งอยู่ที่จังหวัดชลบุรี ระยอง ตาก ปราจีนบุรี สงขลา และสุราษฎร์ธานี มีความแข็งแรงประมาณ 60-190 กก./ลบ.ซม.

กรวด (Gravel) เกิดจากการผุพังของหินอัคนีพบอยู่ทั่วไปตามแม่น้ำลำธาร สามารถนำมาผสมคอนกรีตได้ดีเท่าหินชนิดอื่น โดยนำมาร่อนให้มีขนาดและส่วนคละตามมาตรฐาน แต่ในประเทศไทยยังไม่นิยมใช้กรวดในการผสมคอนกรีตมากนัก

2.2 คุณสมบัติของหินหรือมวลรวมหยาบ

หินหรือมวลรวมหยาบนั้น เป็นวัสดุที่มีขนาดตั้งแต่ 4.75 มิลลิเมตรขึ้นไป หรือที่ไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ได้ ซึ่งคุณสมบัติที่ดีของหินหรือมวลรวมหยาบนั้นจะมีลักษณะที่เหมือนกันกับ

ทราย (มวลรวมละเอียด) สามารถจัดแบ่ง ออกเป็น 3 คุณสมบัติด้วยกัน ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติเชิงกล เป็นต้น

2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

รูปร่าง

รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมากกว่าคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว โดยทั่วไปแล้วจะแบ่งลักษณะทางกายภาพใหญ่ๆ ออกเป็น 2 ประเภท คือ กลม (Rounded) และเหลี่ยม (Angular) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 มวลรวมหยาบที่ลักษณะกลมนั้นจะมีความสามารถในการทำงานที่ดี (Good-Workability) แต่จะมีการขัดกันของอนุภาคที่ต่ำ จึงไม่นิยมใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูง แตกต่างจากมวลรวมที่ลักษณะเหลี่ยมที่มีความสามารถในการทำงานต่ำ (Least Workability) แต่เนื่องจากการขัดกันของอนุภาคที่มาก ทำให้นิยมใช้กับงานที่ต้องการกำลังรับแรงอัดสูง เช่น งานคอนกรีตกำลังสูง เป็นต้น ซึ่งตามมาตรฐานอังกฤษ BS812 Part1 1975 ได้ให้คำนิยามของรูปร่างและลักษณะมวลรวมไว้ ดังนี้

- กลม (Rounded) ลักษณะผิวของมวลรวมเกลี้ยงไม่มีเหลี่ยมเนื่องจากการเสียดสีกันเอง เช่น กรวด ทรายจากแม่น้ำ หรือชายทะเล มวลรวมที่มีลักษณะก้อนกลมจะช่วยให้ทำงานง่ายและประหยัด เพราะต้องการการปูซีเมนต์และน้ำในส่วนผสมน้อยกว่า เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสที่น้อยกว่า

- บิดเบี้ยว (Irregular) มีลักษณะรูปร่างของมวลรวมไม่สม่ำเสมอโดยธรรมชาติ หรือถูกเสียดสีมาบ้างและมีเหลี่ยมมน เช่น กรวดทรายที่ได้จากบ่อ หินเหล็กไฟ ที่ได้จากพื้นดินหรือขุดขึ้นมา

- เหลี่ยม (Angular) ลักษณะรูปร่างของมวลรวมมีเหลี่ยมเกิดจากด้านที่เรียบมาบรรจบกันและเห็นได้ชัด เช่น หินย่อยจากเครื่องโม่ทุกแบบ หินที่ตกตามไหล่เขา

- แบน (Flat or Flaky) ลักษณะรูปร่างของมวลรวมมีความหนาน้อยมากเมื่อเทียบกับความกว้างหรือความยาว ปกติจะเป็นเหลี่ยมด้วย เช่น หินที่มีลักษณะเป็นชั้น การพิจารณาว่ามวลรวมนั้นแบนก็ต่อเมื่อมีความหนาน้อยกว่า 0.6 เท่า ของค่าเฉลี่ยขนาดตะแกรงมาตรฐาน ซึ่งใช้เป็นตัวกำหนดขนาดของอนุภาคในแต่ละขนาดตะแกรง

- ยาวเรียว (Elongated) ลักษณะรูปร่างของมวลรวมมีความยาวมาก เมื่อเทียบความกว้างและความหนา การพิจารณาว่ามวลรวมนั้นยาวเรียว ก็ต่อเมื่อมีความยาวมากกว่า 1.8 เท่า ของค่าเฉลี่ยขนาดตะแกรงมาตรฐานซึ่งใช้เป็นตัวกำหนดขนาดของอนุภาคในแต่ละขนาดตะแกรง

- แบนและยาวเรียว (Flaky and Elongated) ลักษณะรูปร่างของมวลรวมมีความยาวมากกว่าความกว้างมาก และมีความกว้างมากกว่าความหนามาก

กลม (Rounded)



กลม

(Spherical)



บิดเบี้ยว

(Irregular)



บิดเบี้ยวมาก

(Highly Irregular)



แบน

(Flat)



ยาวเรียว

(Elongated (Needle-Like))

เป็นเหลี่ยมมุม (Angular)



ลูกบาศก์

(Cubical)



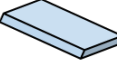
บิดเบี้ยว

(Irregular(Chunky))



บิดเบี้ยวมาก

(Highly Irregular)



แบน

(Flat or Flasky)



ยาวเรียว

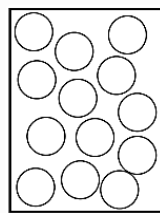
(Elongated (Prismatic))

ภาพที่ 2.2 การแบ่งชนิดของมวลรวมตามรูปร่าง

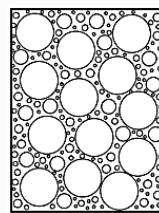
ขนาด

ขนาดของมวลรวมมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยคุณสมบัติที่ใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบ ส่วนผสมคอนกรีตให้เหมาะสม เช่น ขนาดคละมวลรวม (Gradation) ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) และขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวม (Nominal Maximum Size of Aggregate)

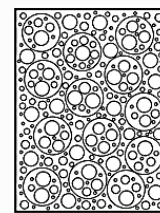
1) ขนาดคละ (Gradation) คือ การกระจายของขนาดต่างๆ ของอนุภาคมวลรวมในคอนกรีต ประกอบด้วย มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด ซึ่งจะต้องมีขนาดใหญ่อเล็กคละต่อเนื่องกันไปดังแสดง ตัวอย่างในภาพที่ 2.3 คอนกรีตที่มีขนาดคละของมวลรวมดี มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจะต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม เมื่อนำมาผสมรวมกันแล้วมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าจะต้องบรรจุอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่าให้มากที่สุดขนาดคละของมวลร่วนับเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการกำหนดปริมาณเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่ต้องการนำไปหล่อหุ้มมวลรวม ผลของขนาดคละต่อคุณสมบัติของคอนกรีต เช่น ความสามารถเทได้ การแยกตัว เป็นต้น



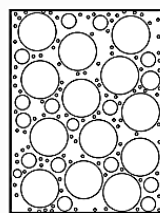
ขนาดเดียว



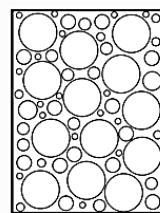
ขนาดคละต่อเนื่อง



การใช้มวลรวมขนาดใหญ่แทนขนาดเล็ก



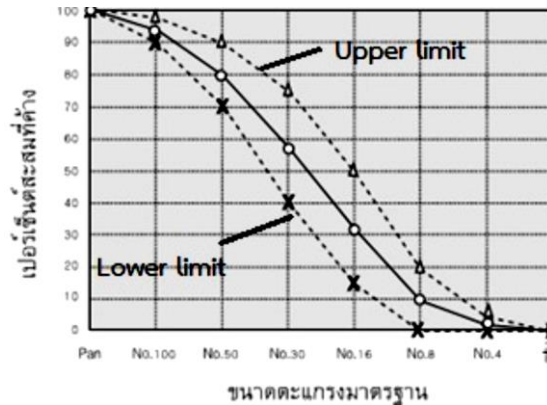
ขนาดคละขนาดตอน



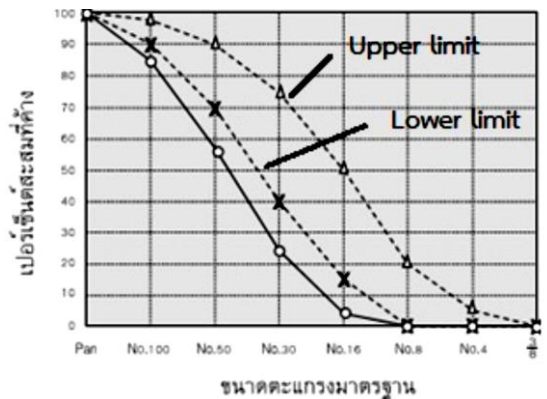
ขนาดคละขนาดส่วนละเอียด

ภาพที่ 2.3 การเรียงตัวของขนาดคละ

การพิจารณาขนาดคละด้วยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเพื่อควบคุมตรวจสอบให้ขนาดคละของมวลรวมเป็นไปตามที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานตาม ASTM C33 โดยตัวอย่างของแผนภูมิคละ (Gradation Curves) ที่มีมวลรวมอยู่ในช่วงมาตรฐาน ดังแสดงในภาพที่ 2.4 แต่ถ้าหากขนาดคละที่ได้ไม่เหมาะสมในการใช้งาน ช่วงของกราฟจะออกนอกขอบเขตมาตรฐาน ดังแสดงในภาพที่ 2.5 การใช้งานขนาดคละที่เหมาะสมนั้นจะช่วยให้ทำงานง่าย กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตดี รวมถึงประหยัดค่าใช้จ่ายด้วย



ภาพที่ 2.4 ตัวอย่างแผนภูมิขนาดคละของมวลรวมที่มีขนาดคละได้ตามกำหนด



ภาพที่ 2.5 ตัวอย่างแผนภูมิขนาดคละของมวลรวมที่มีขนาดคละไม่ได้ตามกำหนด

2) ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) คือ ตัวเลขดัชนีที่เป็นปฏิภาคโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของก้อนวัสดุในมวลรวม เป็นตัวบ่งบอกว่าลักษณะทรายนั้นหยาบหรือละเอียด ค่าโมดูลัสความละเอียดไม่สามารถใช้บอกขนาดคละของมวลรวมได้ แต่สามารถใช้ควบคุมความสม่ำเสมอของมวลรวมที่ผลิตจากแหล่งเดียวกัน ทรายที่มี F.M. สูง คือทรายที่มีความหยาบมาก เช่น ทรายที่มี F.M.=3.2 จะมีความหยาบมากกว่าทรายที่มี F.M.=2.3 ทรายที่มีเหมาะสมสำหรับผลิตคอนกรีต ควรมีค่าโมดูลัสความละเอียดในช่วง 2.30–3.20

3) ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม คือ ขนาดของตะแกรงที่ใหญ่กว่าถัดขึ้นไปจากตะแกรงที่ใหญ่ที่สุดที่มีมวลรวมค้างอยู่ไม่น้อยกว่าร้อยละ 15 ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้มีผลโดยตรงกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ต้องการและขนาดคละของวัสดุผสม กล่าวคือ มวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวโดยรวมน้อยกว่ามวลรวมที่มีขนาดเล็กเมื่อมีน้ำหนักมวลรวมเท่ากัน ดังนั้นถ้าให้ปริมาณซีเมนต์และค่ายุบตัว (Slump) เท่ากัน คอนกรีตที่มีส่วนผสมของมวลรวมขนาดใหญ่ก็จะให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่ามวลรวมขนาดเล็กแต่ทั้งนี้คุณภาพของหินต้องเป็นไปตามข้อกำหนด ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไปมักจะมีขนาดไม่เกิน 40 มม.

4) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) คือ อัตราส่วนของน้ำหนักมวลรวมในอากาศเทียบกับน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่าความถ่วงจำเพาะของหินทรายขึ้นอยู่กับค่าความถ่วงจำเพาะของแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบของมวลรวมและปริมาณช่องว่างของมวลรวม สามารถทดสอบหาได้ตามมาตรฐาน ASTM C127 โดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วง 2.4–3.0

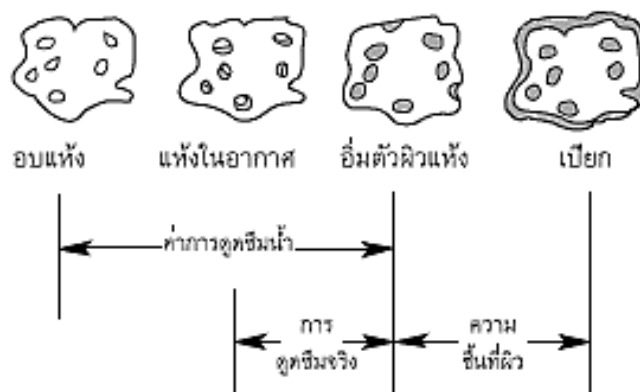
5) ค่าความชื้นทั้งหมด (Moisture) คือ ปริมาณน้ำทั้งหมดในมวลรวมทั้งที่อยู่ในช่องว่าง (Capillary pores) และน้ำที่ผิวของมวลรวม (Free Water) โดยคำนวณจากผลรวมระหว่างค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวม (Surface Moisture) โดยแสดงค่าเป็นร้อยละของน้ำหนักน้ำทั้งหมดต่อน้ำหนักของมวลรวมที่สภาพอบแห้ง (Oven-Dry) สภาพความชื้นแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะ ดังแสดงในภาพที่ 2.6

- สภาพอบแห้ง (Oven-Dry) คือ สภาพที่ความชื้นในมวลรวมทั้งหมด ถูกขับออกด้วยความร้อนจากเตาอบจนมวลรวมมีน้ำหนักคงที่

- สภาพแห้งในอากาศ (Air-Dry, AD) คือ สภาพที่มวลรวมผิวแห้งแต่น้ำในช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ (Capillary pores)

- สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) คือ สภาพที่มวลรวมผิวแห้งแต่น้ำเต็มช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ (Capillary pores)

- สภาพเปียก (Wet, W) คือ สภาพที่มวลรวมผิวเปียกและมีน้ำเต็มช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ (Capillary pores)



ภาพที่ 2.6 สภาพความชื้นของมวลรวม

6) ค่าการดูดซึมน้ำ (Absorption) คือ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมน้ำเข้าไปจนเต็มช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ (Capillary pores) ของมวลรวมแต่ไม่รวมน้ำที่เกาะอยู่ผิววนอกของมวลรวม (Free Water) แสดงค่าเป็นร้อยละของน้ำหนักที่อยู่ในช่องว่างต่อน้ำหนักของมวลรวมที่สภาพอบแห้ง ค่าการดูดซึมน้ำยังสามารถแสดงถึงความพรุนของมวลรวมได้ด้วย

2.2.2 คุณสมบัติเชิงกล

ปัจจุบันได้มีการนำมวลรวมหยาบมาใช้งานในงานด้านต่างๆ เช่น งานถนน งานสะพาน งานโครงสร้างอาคาร และงานโครงสร้างอื่นๆ เนื่องจากมวลรวมหยาบนั้นมีความแข็งแรงที่สูง ทนทานต่อการสึกกร่อนได้ดีและสามารถหาได้ง่าย มวลรวมหยาบจึงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของคอนกรีตในการรับแรงกระทำจากภายในและภายนอก โดยคุณสมบัติของมวลรวมหยาบจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

1) ด้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบผิวหน้าของคอนกรีตนอกจากจะทำหน้าที่รับน้ำหนักจากล้อรถยนต์พาหนะ เพื่อถ่ายลงสู่พื้นทางแล้วยังต้องมีความสามารถรับแรงเสียดสีและแรงกระแทกจากล้อพาหนะที่กระทำอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงเป็นหน้าที่ของมวลรวมในการต้านทานการสึกกร่อนซึ่งเป็นค่าที่สำคัญอีกค่าหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง เพื่อให้คอนกรีตมีความทนทานสูงและมีอายุการใช้งานยาวนาน จากมาตรฐาน ASTM C33 หินที่ใช้ในงานคอนกรีตที่ต้องรับแรงเสียดทานมากตัวอย่างเช่น งานถนน เมื่อผ่านการทดสอบโดยเครื่อง ลอสแอนเจลลิส แล้วจะต้องมีส่วนที่สึกกร่อนไปไม่เกิน 35% ของน้ำหนักเดิม จึงเหมาะสมกับการนำมาผสมเพื่อทำคอนกรีต นอกจากการเลือกใช้หินและทรายที่มีความแข็งแรงแล้ว ยังสามารถเพิ่มความต้านทานการสึกกร่อนได้โดยการเลือกใช้มวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

ถ้าหากว่ามวลรวมหยาบมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนที่ต่ำแล้ว ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเพื่อให้มีคุณสมบัติในการรับแรงเฉือนและแรงกระแทกตามความต้องการนั้น จำเป็นต้องเพิ่มปริมาณมวลรวมละเอียดซึ่งจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์ โดยจะทำให้เกิดความสิ้นเปลืองมากขึ้น

2) ความคงทนของมวลรวมคุณสมบัติของมวลรวมที่เหมาะสมที่จะนำมาทำคอนกรีตนั้นนอกจากมีความแข็งแรงและสามารถต้านทานการขีดสีแล้ว ความคงทน (Soundness) ยังเป็นอีกคุณสมบัติที่สำคัญมาก ทั้งนี้เพราะคอนกรีตอาจจะต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น สภาพเปียกและแห้งสลับกัน (Wetting and Drying) หรือต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดเยือกแข็ง (Freezing and Thawing) สภาพแวดล้อมดังกล่าวจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมวลรวมอย่างมาก ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายในคอนกรีต เช่น การแตกร่อนเป็นแผ่น (local scaling, pop-outs) จนถึงก่อให้เกิดการวิบัติของโครงสร้าง ดังนั้น มวลรวมที่ใช้จึงควรมีความคงทนหรือเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่คอนกรีตต้องเผชิญ การทดสอบความคงทนของมวลรวมทำได้หลายวิธี เช่น ตามมาตรฐาน ASTM C88 เป็นการทดสอบความคงทนของมวลรวมต่อซัลเฟต เป็นต้น

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 การหาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัว

มวลรวมหยาบเป็นส่วนประกอบสำคัญในคอนกรีต ซึ่งในปัจจุบันมีการศึกษาหาปริมาณมวลรวมในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในด้านต่างๆ และมีความยุ่งยากในการทดสอบ

BS1881: Part124 ได้แนะนำวิธีการหามวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว วิธีการทุบ เาะ เลื่อยเอามวลรวมหยาบออกจากก้อนตัวอย่างคอนกรีต เมื่อผ่านขั้นตอนการวิเคราะห์จะทำให้ทราบถึงสัดส่วนผสมของมวลรวมหยาบและสัดส่วนของซีเมนต์ในคอนกรีตได้ ข้อจำกัดของวิธีนี้คือต้องอาศัยทักษะทางเคมีที่สูงและเครื่องมือที่ใช้ทดสอบนั้นมีความซับซ้อนและหาได้ยาก นอกจากนี้วิธีนี้ยังใช้ได้เฉพาะกับคอนกรีตที่มีอายุที่ยาวนาน เมื่อนำไปใช้กับคอนกรีตที่มีอายุน้อยอาจจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่ถูกต้อง

M.S.Jung, M.C.Shin, and Y. Ann. (2012) ได้นำเสนอวิธีการศึกษาโดยอาศัยระดับความเป็นกรด (Acid neutralization capacity, ANC) เป็นข้อมูลนำมาวิเคราะห์หาปริมาณปูนซีเมนต์, น้ำ และมวลรวม แต่ไม่สามารถแยกส่วนปริมาณระหว่างมวลรวมหยาบกับมวลรวมละเอียดได้ตัวอย่างที่นำมาใช้ทำการทดสอบเป็นตัวอย่างที่อายุ 200 วันวิธีการนี้ใช้กรดไนตริกผสมทำปฏิกิริยากับผงตัวอย่างคอนกรีตและพิจารณาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารแขวนลอยที่มีตัวอย่างคอนกรีตผสมอยู่นั้น โดยจะใช้ความเข้มข้นของสารละลายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กันทดสอบ เพื่อทำให้ค่า pH ของสารแขวนลอยนั้นเปลี่ยนไป จากนั้นจะนำค่ากรดด่าง (pH) ดังกล่าวไปสร้างกราฟความสัมพันธ์และทำการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ที่สร้างไว้ แล้วจึงพิจารณาหาค่าต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาส่วนผสมโดยใช้สมการที่สร้างขึ้น (Empirical Equation) วิธีการนี้จึงไม่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่มีมวลรวมบางประเภทที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่ใช้ได้ เพราะจะทำให้ค่ากรด-ด่าง (pH) ที่โคคลาดเคลื่อนไป อีกทั้ง วิธีการนี้จะเหมาะสมกับตัวอย่างที่เกิดปฏิกิริยาเต็มที่แล้ว

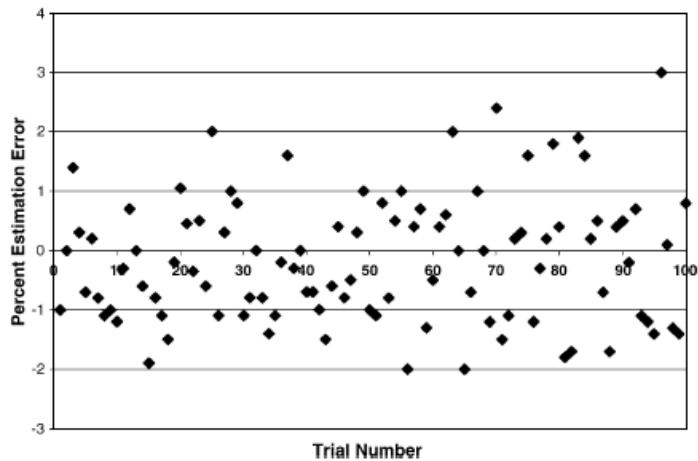
2.3.2 วิธีการทางภาพถ่าย

ในปัจจุบัน วิธีการทางภาพถ่ายนิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือตรวจสอบคอนกรีตกันอย่างแพร่หลาย อีกทั้ง มีการศึกษาเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของมวลรวมหยาบต่างๆ

Sandhya N. Baviskar (2011) ได้เสนอวิธีการทางภาพถ่ายในการใช้วิธีที่รวดเร็วในการหาพื้นที่ของเซลล์จากภาพถ่ายโดยอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม Image J ซึ่งนักวิจัยได้ใช้บล็อกอินของโปรแกรมที่มีชื่อว่า cell-counter จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวโปรแกรมสามารถวิเคราะห์ได้อย่างเที่ยงตรง แต่มีข้อจำกัดตรงที่ในภาพตัวอย่างต้องมีสีพื้นหลังที่แตกต่างจากเซลล์ชัดเจน และสีของเซลล์ต้องมีลักษณะเดียวกันทั้งหมด จึงจะสามารถวิเคราะห์พื้นที่ได้แบบอัตโนมัติ

J.M.R. Fernlund, (2005) ได้เสนอวิธีการทางภาพถ่ายโดยมุ่งเน้นในการหาลักษณะรูปร่าง 3 มิติของมวลรวมหยาบ ในการทดสอบจะถ่ายภาพตัวอย่าง 2 ภาพต่อตัวอย่างที่มุมต่าง ๆ กันเพื่อแปลงขนาดภาพที่ได้ให้เป็น 3 มิติ ในเรื่องของการวิเคราะห์รูปทรงนั้นวิธีการนี้ให้ผลลัพธ์ที่ดีในการหาทั้งขนาดและและการกระจายตัวของรูปทรง

Banta et al. (2003) ใช้กล้อง CCD โดยจะแปลงสัญญาณให้เป็นดิจิทัลจะใช้ frame grabber เพื่อประเมินหินปูนด้วยภาพ 2 มิติ ภาพจะถูกประมวลผลเพื่อแยกผิวสัมผัสและอนุภาคที่ทับซ้อนกัน มีการกำหนดพารามิเตอร์ที่ได้จากรูปภาพและสร้างเป็นแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น สำหรับทำนายมวลของหินปูน ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในการทำนายน้อยกว่า 2 % ดังภาพที่ 2.7



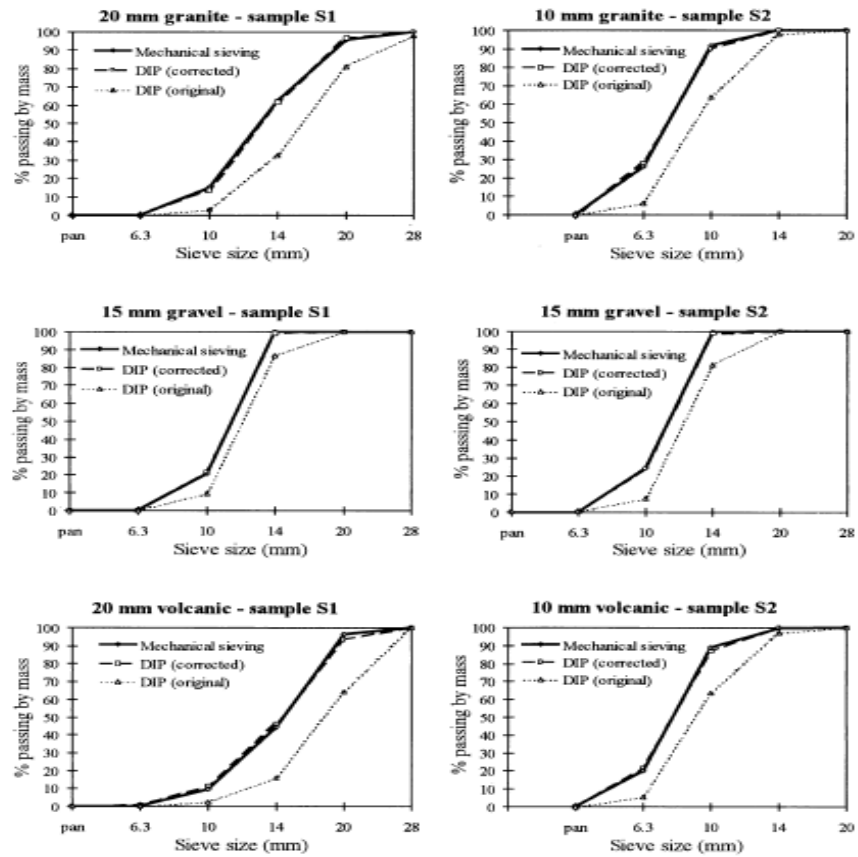
ภาพที่ 2.7 ผลเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการทำนายมวลโดยการสุ่มตัวอย่าง

Weixing Wang (1999) ได้เสนอวิธีการทางภาพถ่ายโดยมุ่งเน้นในการหามวลรวมหยาบจากการตกอิสระของหินในโรงม่หิน ในการทดสอบจะใช้กล้องที่บันทึกภาพการตกจากสายพานของมวลรวมหยาบในโรงม่หินซึ่งจะบันทึกในรูปของภาพระดับสีเทา (Grayscale) จากนั้นจะนำมาแปลงเป็นภาพขาวดำเพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ของมวลรวมหยาบ แต่วิธีการนี้มีตัวแปรที่ทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนอยู่มาก เช่น ภาพถ่ายที่ติดก่อนเมฆจะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์และถ้าหากหินที่ตกโดนแสงอาทิตย์ส่องระนาบข้างก็จะทำให้บริเวณนั้นกลืนหายไปกับพื้นหลัง ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนขึ้น

A.K.H. Kwan, C.F. Mora, & H.C. Chan (1999) ได้เสนอวิธีการทางภาพถ่ายในการวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคของมวลรวมหยาบซึ่งมีผลกระทบต่อความแข็งแรงทนทานของคอนกรีตโดยใช้การประมวลผลภาพแบบดิจิทัล (DIP) ในการวิเคราะห์รูปร่างของอนุภาคมวลรวมหยาบ โดยพิจารณารูปทรง ความเรียวยาว ความแบน และความกลมมนของหิน แต่วิธีการนี้ไม่สามารถวิเคราะห์หาความหนาและปริมาตรของมวลรวมหยาบได้

Mora et.al (1998) นำเสนอเทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing : DIP) เพื่อวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคหยาบ เนื่องจาก DIP สร้างการไล่ระดับสีเฉพาะพื้นที่และใช้การกำหนดขนาดอนุภาคที่แตกต่างจากขนาดตะแกรงจึงไม่สามารถเปรียบเทียบได้โดยตรง เว้นแต่จะมีการจัดแนวการไล่ระดับสีและนิยามขนาดอนุภาคไว้ นอกจากนี้ยังใช้ปัจจัยการแก้ไขขนาดที่ใช้ในการแปลงขนาดของอนุภาคที่วัดโดย DIP ไปเป็นเทียบเท่ากับขนาดของตะแกรงเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบ

ระหว่าง DIP กับผลที่ได้ การศึกษาแสดงให้เห็นว่าเป็นเทคนิคที่รวดเร็วสะดวกและถูกต้องสำหรับการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาค ดังแสดงในภาพที่ 2.8



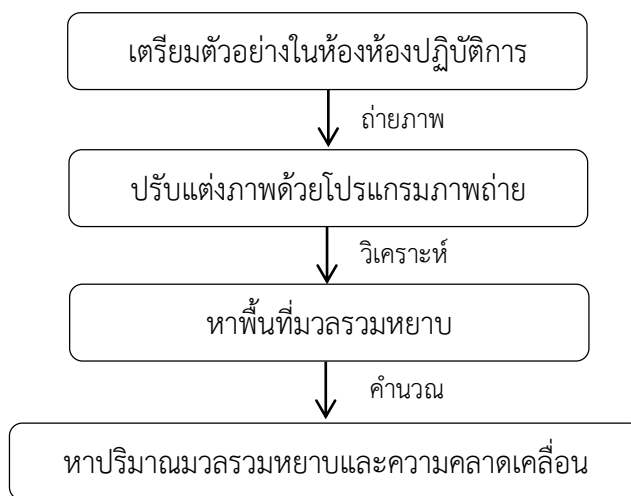
ภาพที่ 2.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จาก DIP ที่ปรับแก้แล้วกับการร่อนผ่านตะแกรง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ทัวไป

ในการศึกษาวิธีการหาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว มีแผนการดำเนินการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 3.1 โดยตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบจะถูกเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการทดสอบ ทำให้สามารถทราบถึงปริมาณมวลรวมหยาบที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ทำให้สามารถตรวจสอบความถูกต้องของการหาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจากกระบวนการทางภาพถ่ายได้



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

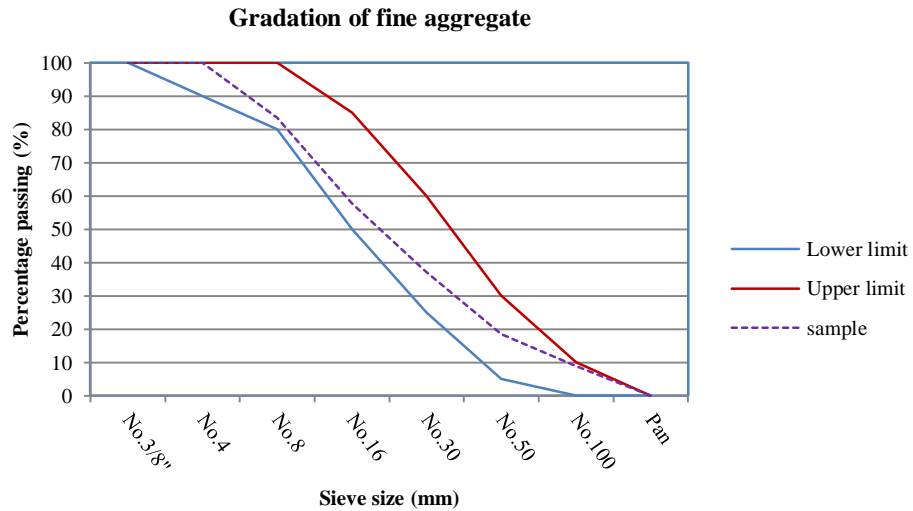
- 1) ปูนซีเมนต์ (Cement)

ในการศึกษานี้เลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement Type

- 1) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย มอก.15-2547

- 2) มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)

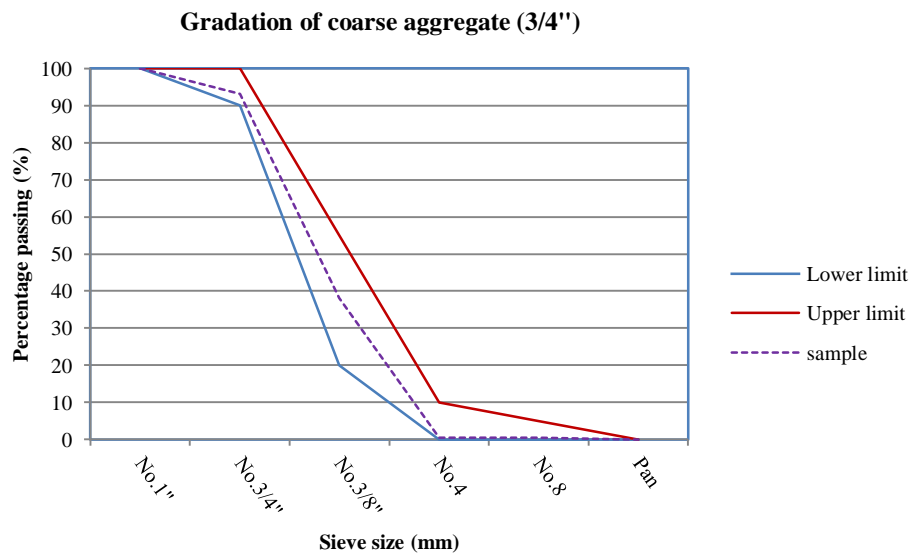
มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นทรายมาตรฐานที่ใช้สำหรับงานก่อสร้าง ที่ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 โดยมีขนาดละเอียดอยู่ในช่วงตามมาตรฐาน ASTM C33 ดังแสดงในภาพที่ 3.2 และความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดอยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C128



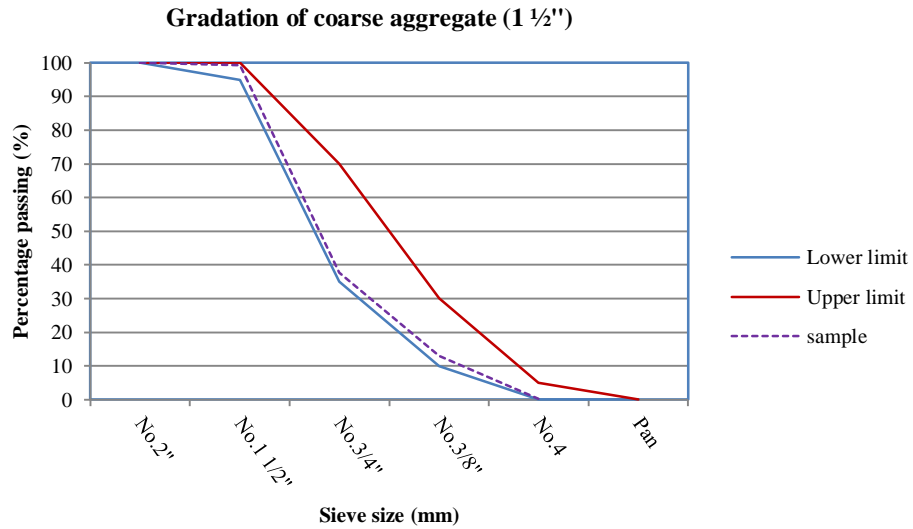
ภาพที่ 3.2 ขนาดคละของมวลรวมละเอียด

3) มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate)

มวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นหินมาตรฐานที่ใช้สำหรับงานก่อสร้าง ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันคือมีขนาดใหญ่มากที่สุดของมวลรวมหยาบแตกต่างกัน 2 ขนาด คือ ขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว และ $1\frac{1}{2}$ นิ้ว โดยมีขนาดคละอยู่ในช่วงตามมาตรฐาน ASTM C33 ดังแสดงในภาพที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ และความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C127



ภาพที่ 3.3 ขนาดคละของมวลรวมหยาบขนาดใหญ่ที่สุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว



ภาพที่ 3.4 ขนาดคละของมวลรวมหยาบขนาดใหญ่ที่สุด 1 ½ นิ้ว

3.2.2 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการเพื่อนำมาใช้ในการศึกษา โดยใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักในการผสม ตัวอย่างคอนกรีตจะมีทั้งรูปทรงกระบอก (Cylinder) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร และรูปทรงลูกบาศก์ (Cube) ขนาด กว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร มวลรวมหยาบที่ใช้จะมีขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมหยาบด้วยกัน 2 ขนาด คือ ขนาด ¾ นิ้ว และขนาด 1 ½ นิ้ว ปริมาณอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบ (s/a) เท่ากับ 0.30 0.44 และ 0.60 โดยปริมาตร ปริมาณน้ำที่ใช้เป็นอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/c) คือ 0.40, 0.50 และ 0.60 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบที่ 2 ช่วงอายุคือช่วงอายุต้นและช่วงอายุปลาย รายละเอียดตัวอย่าง และสัดส่วนผสมดังแสดงในตาราง 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

| No. | Mix id. | w/c | s/a | Max. size of aggregate (inch) | Size of sample | Age (Days) |
|-----|---------------|------|------|-------------------------------|----------------|------------|
| 1 | W40S44M1CL10E | 0.40 | 0.44 | ¾ | CL10 | 7 |
| 2 | W40S44M1CL15E | | | | CL15 | 7 |
| 3 | W40S44M1CL10L | | | | CL10 | 28 |
| 4 | W40S44M1CU15L | | | | CU15 | 28 |
| 5 | W40S44M2CL10L | 0.50 | 0.30 | 1 ½ | CL10 | 28 |
| 6 | W50S30M1CL10L | | | | CL10 | 28 |
| 7 | W50S30M1CL15E | | | | CL15 | 7 |

| No. | Mix id. | w/c | s/a | Max. size of aggregate (inch) | Size of sample | Age (Days) | |
|-----|---------------|------|------|-------------------------------|----------------|------------|---|
| 8 | W50S44M1CL10E | | 0.44 | 3/4 | CL10 | 7 | |
| 9 | W50S44M1CL15E | | | | CL15 | 7 | |
| 10 | W50S44M1CL10L | | | | CL10 | 28 | |
| 11 | W50S44M1CU15L | | | | CU15 | 28 | |
| 12 | W50S44M2CL10L | | | 1 ½ | CL10 | 28 | |
| 13 | W50S44M2CU15L | | | | CU15 | 28 | |
| 14 | W50S60M1CL10L | | 0.60 | 3/4 | CL10 | 28 | |
| 15 | W50S60M1CL15E | | | | CL15 | 7 | |
| 16 | W60S44M1CL10E | | 0.60 | 0.44 | 3/4 | CL10 | 7 |
| 17 | W60S44M1CL15E | | | | | CL15 | 7 |
| 18 | W60S44M1CL10L | CL10 | | | | 28 | |
| 19 | W60S44M1CU15L | CU15 | | | | 28 | |
| 20 | W60S44M2CL10L | 1 ½ | | | CL10 | 28 | |

หมายเหตุ : CL10 หมายถึง รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร

CL15 หมายถึง รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร

CU15 หมายถึง รูปทรงลูกบาศก์ขนาด กว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร

M1 หมายถึง ขนาดคดสุดของมวลรวมคือ 3/4" และ M2 หมายถึง ขนาดคดสุดของมวลรวมคือ 1 ½"

S หมายถึง สัดส่วนมวลรวมหยาบต่อมวลรวมทั้งหมด (s/a)

W หมายถึง สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c)

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

| No. | Mix id. | Mix proportion (kg/m ³) | | | |
|-----|---------------|-------------------------------------|-------|------------|------------|
| | | Cement | Water | Sand (SSD) | Rock (SSD) |
| 1 | W40S44M1CL10E | 436 | 174 | 749 | 995 |
| 2 | W40S44M1CL15E | 436 | 174 | 769 | 1,018 |
| 3 | W40S44M1CL10L | 436 | 174 | 749 | 995 |
| 4 | W40S44M1CU15L | 436 | 174 | 749 | 995 |
| 5 | W40S44M2CL10L | 436 | 174 | 749 | 995 |
| 6 | W50S30M1CL10L | 382 | 191 | 511 | 1,244 |
| 7 | W50S30M1CL15E | 382 | 191 | 524 | 1,273 |
| 8 | W50S44M1CL10E | 382 | 191 | 749 | 995 |
| 9 | W50S44M1CL15E | 382 | 191 | 769 | 1,018 |
| 10 | W50S44M1CL10L | 382 | 191 | 749 | 995 |
| 11 | W50S44M1CU15L | 382 | 191 | 749 | 995 |

| No. | Mix id. | Mix proportion (kg/m ³) | | | |
|-----|---------------|-------------------------------------|-------|------------|------------|
| | | Cement | Water | Sand (SSD) | Rock (SSD) |
| 12 | W50S44M2CL10L | 382 | 191 | 749 | 995 |
| 13 | W50S44M2CU15L | 382 | 191 | 749 | 995 |
| 14 | W50S60M1CL10L | 382 | 191 | 1,021 | 711 |
| 15 | W50S60M1CL15E | 382 | 147 | 1,082 | 729 |
| 16 | W60S44M1CL10E | 340 | 204 | 749 | 995 |
| 17 | W60S44M1CL15E | 340 | 204 | 769 | 1,018 |
| 18 | W60S44M1CL10L | 340 | 204 | 749 | 995 |
| 19 | W60S44M1CU15L | 340 | 204 | 749 | 995 |
| 20 | W60S44M2CL10L | 340 | 204 | 749 | 995 |

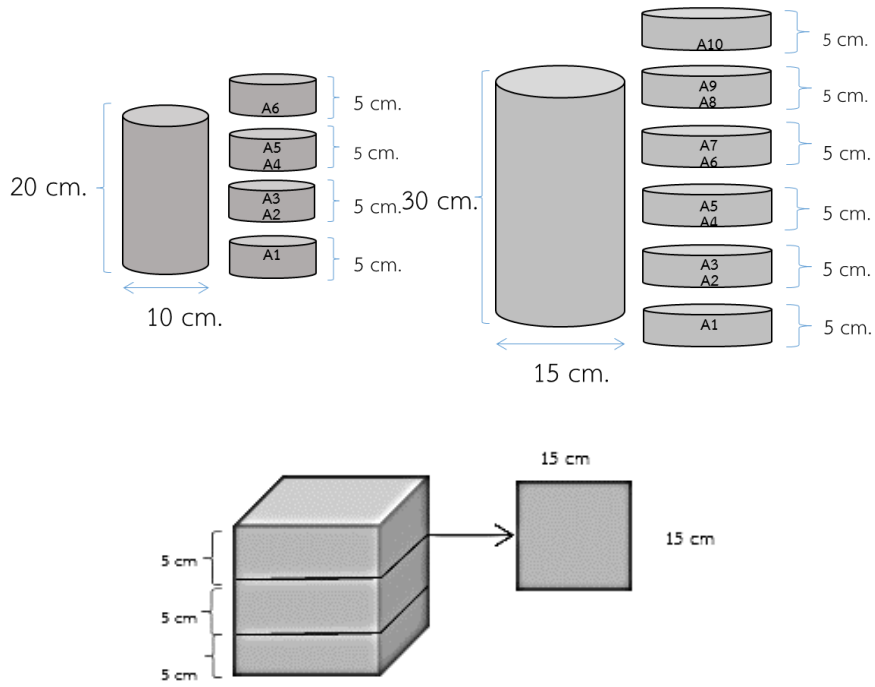
หมายเหตุ : CL10 หมายถึง รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร
 CL15 หมายถึง รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร
 CU15 หมายถึง รูปทรงลูกบาศก์ขนาด กว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร
 M1 หมายถึง ขนาดคดสุดของมวลรวมคือ 3/4" และ M2 หมายถึง ขนาดคดสุดของมวลรวมคือ 1 1/2"
 S หมายถึง สัดส่วนมวลรวมหยาบต่อมวลรวมทั้งหมด (s/a)
 W หมายถึง สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c)

3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องผสมคอนกรีต
- 2) แบบหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีต 2 รูปทรง คือ แบบหล่อทรงกระบอก (Cylinder Mold) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร และแบบหล่อทรงลูกบาศก์ (Cube Mold) ขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร และความสูง 15 เซนติเมตร
- 3) เครื่องตัดคอนกรีต
- 4) อุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพ
- 5) คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ต่าง ๆ

3.3 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

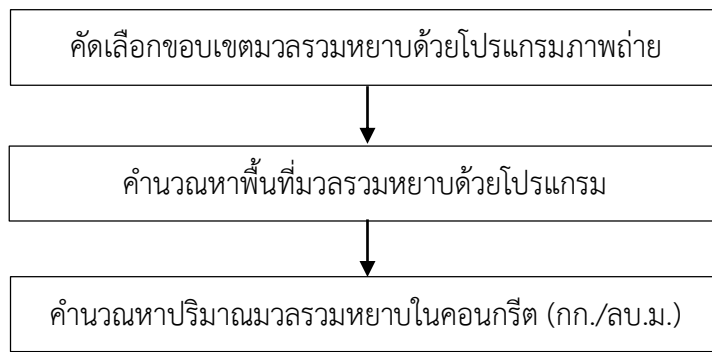
ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์ โดยทำการบ่มน้ำที่อุณหภูมิห้องจนครบระยะเวลาที่กำหนดแล้วจึงนำตัวอย่างไปตัดให้มีขนาดความหนาประมาณ 5 เซนติเมตรดังแสดงในภาพที่ 3.5 และนำไปทดสอบวิธีการทางภาพถ่าย (Image Processing) โดยหน้าตัดทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร จะได้ภาพทั้งหมด 6 รูปภาพต่อ 1 ก้อนตัวอย่าง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร จะถ่ายภาพทั้งหมด 10 รูปภาพต่อ 1 ก้อนตัวอย่าง ส่วนหน้าตัดทรงลูกบาศก์จะได้ภาพทั้งหมด 4 รูปภาพต่อ 1 ก้อนตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างผิวด้านล่างสุด และผิวด้านบนสุด จะไม่นำมาพิจารณา



ภาพที่ 3.5 การตัดก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์

3.4 การหาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวด้วยวิธีทางภาพถ่าย

การหาปริมาณมวลรวมหยาบมีขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ขั้นตอนการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบ

3.4.1 การทดสอบด้วยวิธีการทางภาพถ่าย

เมื่อทำการตัดคอนกรีตเป็นชิ้นส่วนที่มีความหนา 5 เซนติเมตรแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเข้าสู่กระบวนการ Image processing โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1. นำภาพถ่ายไปปรับแต่งด้วยโปรแกรมทางภาพถ่าย โดยในการปรับแต่งขั้นแรกนั้นจะทำการครอบตัดภาพให้มีความกว้างและความยาวเท่ากับก้อนตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 3.7

ขั้นตอนที่ 2. ปรับขนาดของภาพให้มีขนาดสัมพันธ์กับขนาดของก้อนตัวอย่างเพื่อให้สเกลของภาพและก้อนตัวอย่างนั้นตรงกัน

ขั้นตอนที่ 3. ปรับแต่งเพิ่มเติมให้เห็นขอบเขตของหินที่ชัดเจน เพื่อให้ง่ายต่อการเลือกขอบเขตมวลรวมหยาบในก้อนตัวอย่างด้วยโปรแกรม ดังแสดงในภาพที่ 3.8

ขั้นตอนที่ 4. ทำการเลือกขอบเขตมวลรวมหยาบ โดยพิจารณาคัดเลือกอ้างอิงจากขนาดตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ตาม ASTM C33

ขั้นตอนที่ 5. เมื่อเลือกมวลรวมหยาบที่ผ่านเกณฑ์ดังกล่าวในภาพจนครบถ้วนแล้ว จะทำการเปลี่ยนรูปภาพเป็นสีขาวดำ ดังแสดงดังภาพที่ 3.9

ขั้นตอนที่ 6. บันทึกรูปภาพขาวดำเป็นไฟล์รูปภาพสำหรับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณพื้นที่ต่อไป



ภาพที่ 3.7 ภาพถ่ายตัวอย่างก่อนทดสอบ



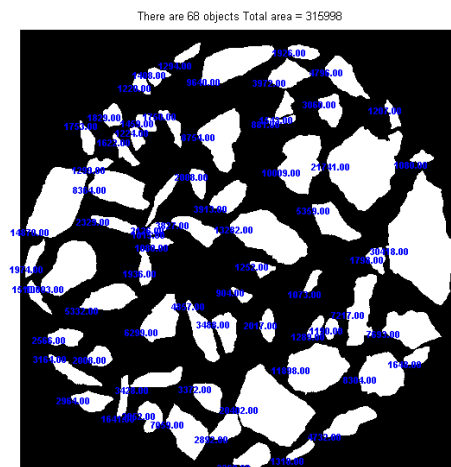
ภาพที่ 3.8 ภาพถ่ายตัวอย่างหลังปรับแต่งเพิ่มเติมให้เห็นขอบเขตของหินที่ชัดเจน



ภาพที่ 3.9 ภาพตัวอย่างขาวดำที่ผ่านการคัดเลือกขอบเขตของมวลรวมหยาบ

3.4.2 การทดสอบหาพื้นที่มวลรวมหยาบ

ภาพตัวอย่างขาวดำจะถูกนำมาคำนวณวิเคราะห์หาพื้นที่ของมวลรวมหยาบโดยใช้โปรแกรมที่สามารถคำนวณหาพื้นที่สีขาวจากภาพถ่าย โดยหลักการทำงานคือจะใช้สคริปต์คำสั่งให้ตัวโปรแกรมทำการวิเคราะห์หาพื้นที่พิกเซลเล็ก ๆ สีขาวในภาพถ่ายขาวดำ แล้วจึงแสดงผลลัพธ์ออกมาในรูปของจำนวนพิกเซลของมวลรวมหยาบทั้งหมดในภาพดังแสดงในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 ภาพตัวอย่างที่ทำการหาพื้นที่ของมวลรวมหยาบ

3.4.3 การคำนวณหาปริมาณมวลรวมหยาบ

การคำนวณหาปริมาณมวลรวมหยาบจะคำนวณจากผลสัดส่วนโดยพื้นที่ของมวลรวมหยาบต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบกระบวนการทางภาพถ่าย แล้วจึงทำการแปลงเป็นสัดส่วนโดยปริมาตรของมวลรวมหยาบ โดยวิเคราะห์ตามหลักการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1356 ซึ่งเป็นวิธีการหาปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยวิธีการนับจำนวนจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ (Microscopical Point-Count) หลังจากได้ปริมาตรของมวลรวมหยาบแล้วจึงนำมาคูณด้วยความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ

ได้เป็นปริมาณมวลรวมหยาบออกมา ผลคำนวณที่ได้จะเป็นค่าปริมาณน้ำหนักกิโลกรัมต่อปริมาตรคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร การคำนวณเพื่อหาปริมาณมวลรวมหยาบมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. คำนวณหาพื้นที่มวลรวมหยาบโดยทำการคิดปริมาณมวลรวมหยาบในหน่วยพิกเซลที่ได้จากโปรแกรมให้อยู่ในหน่วยของตารางเซนติเมตร

ขั้นตอนที่ 2. คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดตัวอย่างจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ตัวอย่างรูปทรงกระบอก) หรือความกว้างความยาว (ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์) ที่วัดจากขนาดหน้าตัดตัวอย่างจริง

ขั้นตอนที่ 3. หาอัตราส่วนของพื้นที่มวลรวมหยาบต่อพื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง ดังสมการ
อัตราส่วนพื้นที่ที่เห็นต่อจากกระบวนการทางภาพถ่ายต่อพื้นที่หน้าตัดตัวอย่างจริง = $\frac{\text{พื้นที่มวลรวมหยาบ (cm}^2\text{)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างคอนกรีต (cm}^2\text{)}}$

ขั้นตอนที่ 4. คำนวณหาน้ำหนักมวลรวมหยาบในหน้าตัด หน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากสมการ

$$\text{น้ำหนักมวลรวมหยาบ (kg/m}^3\text{)} = \left(\frac{\text{พื้นที่มวลรวมหยาบ (cm}^2\text{)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างคอนกรีต (cm}^2\text{)}} \right) \times \text{ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3}$$

ขั้นตอนที่ 5. ทำการคำนวณทุกภาพหน้าตัดในแต่ละตัวอย่าง จากนั้นทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยพิจารณาค่ามาตรฐาน (Z-Score) พิจารณาค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ของผลการทดสอบ

ขั้นตอนที่ 6. นำผลเฉลี่ยปริมาณมวลรวมหยาบได้จากการวิเคราะห์มาหาร้อยละความคลาดเคลื่อนเทียบกับปริมาณมวลรวมหยาบที่ออกแบบผสมจริง จากสมการ

$$\text{ร้อยละความคลาดเคลื่อน} = \left(\frac{\text{น้ำหนักมวลรวมหยาบจากการวิเคราะห์} - \text{น้ำหนักมวลรวมหยาบจากส่วนผสมจริง}}{\text{น้ำหนักมวลรวมหยาบจากส่วนผสมจริง}} \right) \times 100$$

โดยถ้าผลการคำนวณแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเป็น - แสดงว่าผลการวิเคราะห์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ ถ้าผลการคำนวณแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเป็น + แสดงว่าผลการวิเคราะห์มีค่าสูงกว่าค่าที่ออกแบบ

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

การหาปริมาณมวลรวมหยาบ พิจารณาโดยอาศัยการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายของหน้าตัดตัวอย่างแต่ละชนิดตามขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวไปในบทที่ 3 ผลการวิเคราะห์และค่าความคลาดเคลื่อนของผลวิเคราะห์ ดังแสดงในตาราง 4.1

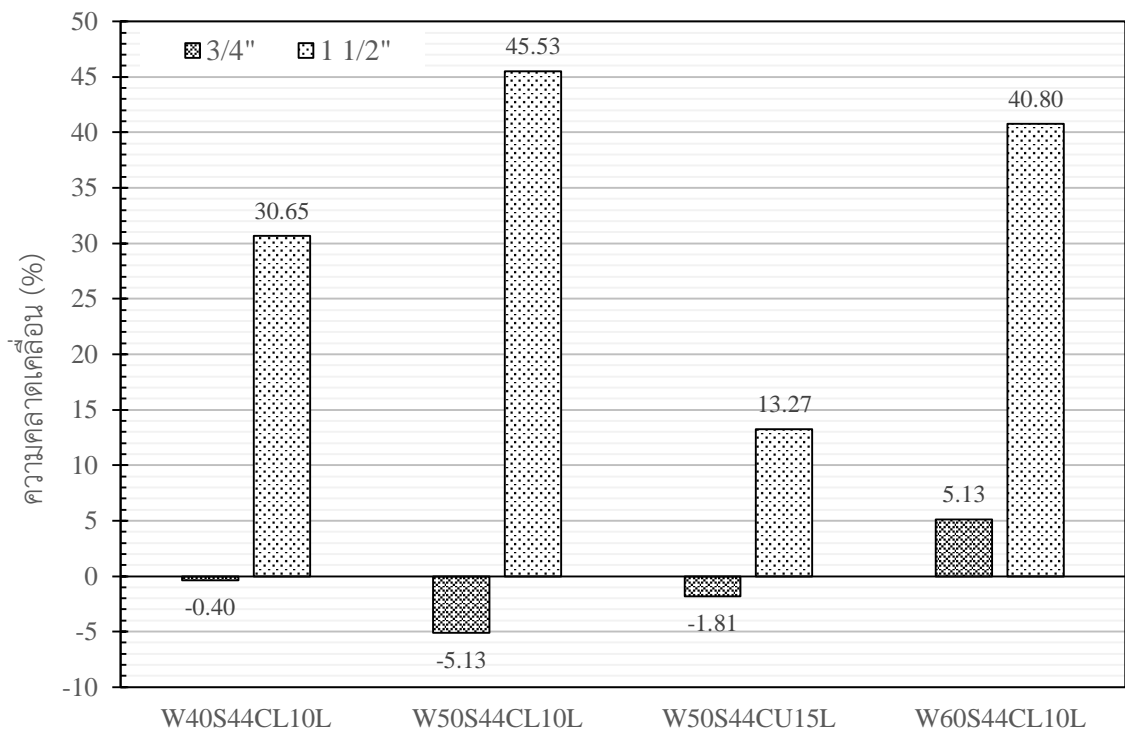
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์และความคลาดเคลื่อนปริมาณมวลรวมหยาบ

| No. | Mix id. | ปริมาณมวลรวมหยาบ (กก./ลบ.ม.) | | ความคลาดเคลื่อน (%) |
|-----|---------------|------------------------------|-------------------|---------------------|
| | | ออกแบบ | ผลวิเคราะห์เฉลี่ย | |
| 1 | W40S44M1CL10E | 995 | 993 | -0.20 |
| 2 | W40S44M1CL15E | 1,018 | 1,059 | +4.03 |
| 3 | W40S44M1CL10L | 995 | 991 | -0.40 |
| 4 | W40S44M1CU15L | 995 | 976 | -1.91 |
| 5 | W40S44M2CL10L | 995 | 1,300 | +30.65 |
| 6 | W50S30M1CL10L | 1,244 | 1,259 | +1.21 |
| 7 | W50S30M1CL15E | 1,273 | 1,348 | +5.89 |
| 8 | W50S44M1CL10E | 995 | 978 | -1.71 |
| 9 | W50S44M1CL15E | 1,018 | 1,044 | +2.55 |
| 10 | W50S44M1CL10L | 995 | 944 | -5.13 |
| 11 | W50S44M1CU15L | 995 | 977 | -1.81 |
| 12 | W50S44M2CL10L | 995 | 1,448 | +45.53 |
| 13 | W50S44M2CU15L | 995 | 1,127 | +13.27 |
| 14 | W50S60M1CL10L | 711 | 730 | +2.67 |
| 15 | W50S60M1CL15L | 729 | 770 | +5.62 |
| 16 | W60S44M1CL10E | 995 | 1,040 | +4.52 |
| 17 | W60S44M1CL15E | 1,018 | 1,070 | +5.11 |
| 18 | W60S44M1CL10L | 995 | 1,046 | +5.13 |
| 19 | W60S44M1CU15L | 995 | 1,090 | +9.55 |
| 20 | W60S44M2CL10L | 995 | 1,401 | +40.80 |

หมายเหตุ : (-) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ , (+) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าสูงกว่าค่าที่ออกแบบ

4.2 ผลกระทบของขนาดใหญ่มากที่สุดของมวลรวมหยาบต่อการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีทางภาพถ่าย

จากภาพที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบที่ได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันแต่ใช้ขนาดมวลรวมหยาบที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีมวลรวมหยาบขนาดใหญ่มากที่สุด $\frac{3}{4}$ นิ้วอยู่ในช่วง -5.13% ถึง $+5.13\%$ และความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีมวลรวมหยาบขนาดใหญ่มากที่สุด $1\frac{1}{2}$ นิ้ว อยู่ในช่วง $+13.27\%$ ถึง $+45.53\%$



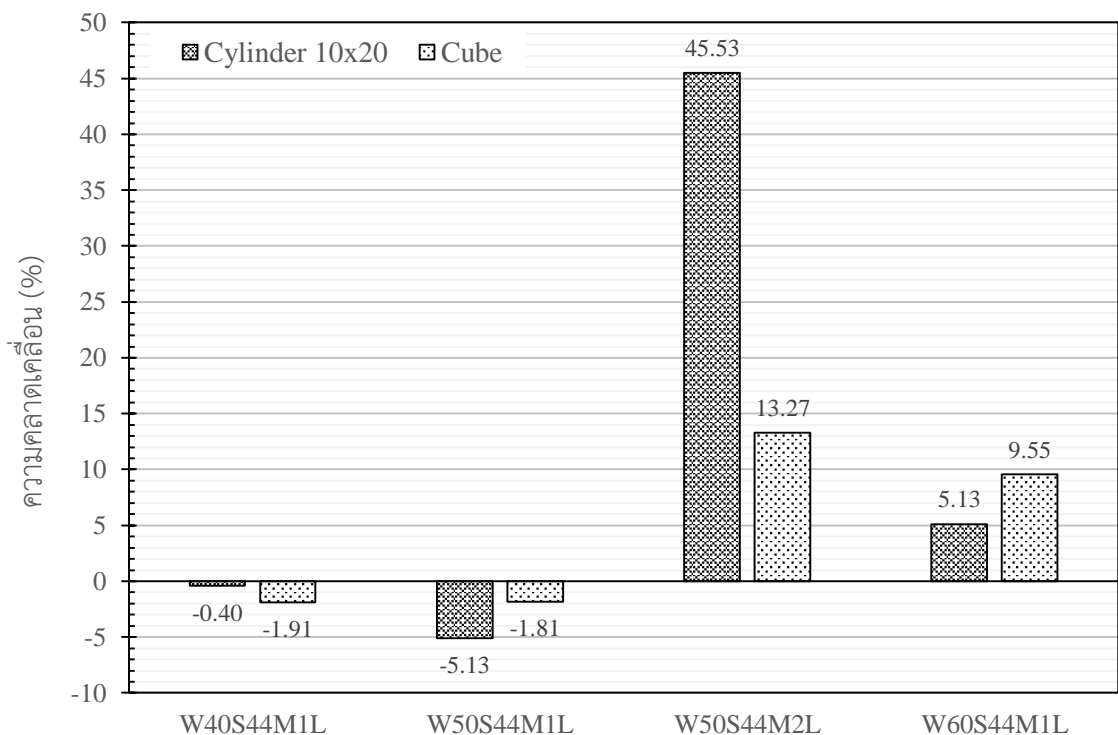
ภาพที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่มากที่สุดต่างกัน

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่มากที่สุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อนค่อนข้างต่ำ ส่วนตัวอย่างที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่มากที่สุด $1\frac{1}{2}$ นิ้ว ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อนสูงกว่าในทุกส่วนผสม อาจเป็นผลจากการเตรียมตัวอย่างทดสอบโดยการตัดแบ่งเป็นช่วง ๆ ละ 5 เซนติเมตร ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงขนาดของมวลรวมใหญ่มากที่สุด $1\frac{1}{2}$ นิ้ว มากกว่า จึงทำให้ภาพหน้าตัดตัวอย่างที่ได้มีแนวโน้มสัดส่วนพื้นที่มวลรวมหยาบมากขึ้น เนื่องจากพื้นที่ของอนุภาคมวลรวมหยาบอาจเกิดพื้นที่ที่ซ้ำซ้อนกัน ดังนั้น ขนาดใหญ่มากที่สุดของมวลรวมหยาบมีผลกระทบต่อหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายนี้เห็นได้ชัดและอย่างมีนัยสำคัญ

โดยผลการศึกษาในงานวิจัยนี้อาจสรุปได้เบื้องต้นว่าการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีทางภาพถ่ายนี้ เหมาะสำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว

4.3 ผลกระทบของรูปทรงหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีตต่อการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีทางภาพถ่าย

จากภาพที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบที่ได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันแต่ตัวอย่างมีรูปทรงหน้าตัดที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีรูปทรงหน้าตัดกลมอยู่ในช่วง -0.40% ถึง $+45.53\%$ และความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีรูปทรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมอยู่ในช่วง -1.81% ถึง $+13.27\%$



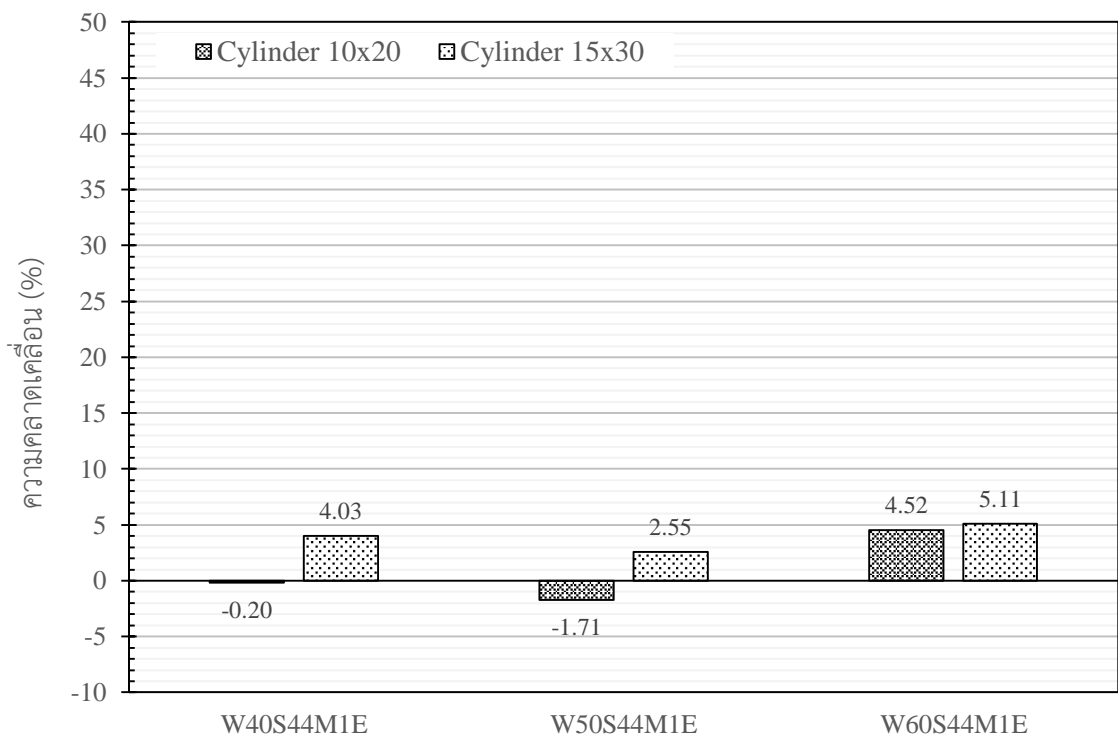
ภาพที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่มีรูปทรงหน้าตัดตัวอย่างต่างกัน

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตทั้งแบบรูปทรงหน้าตัดกลมและรูปทรงหน้าตัดสี่เหลี่ยม ซึ่งใช้มวลรวมขนาดใหญ่สุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงไม่เกิน $\pm 10\%$ ส่วนผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่สุด $1\frac{1}{2}$ นิ้ว ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อน $+13.27\%$ และ $+45.53\%$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเกิดค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่า อาจเนื่องจากผลกระทบของขนาดของมวลรวมใหญ่สุด นอกจากนี้ ตัวอย่างหน้าตัดทรงกลมซึ่งตัดแบ่งเป็นก้อนทดสอบโดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 10×20 เซนติเมตร ทำให้มีจำนวนหน้าตัดตัวอย่างมากกว่า

ตัวอย่างหน้าตัดทรงสี่เหลี่ยมซึ่งตัดแบ่งเป็นก้อนทดสอบโดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 15×15 เซนติเมตร จึงอาจทำให้แนวโน้มสัดส่วนพื้นที่มวลรวมหยาบคลาดเคลื่อนสะสมมากขึ้น อย่างไรก็ตาม แนวโน้มความคลาดเคลื่อนของตัวอย่างแบบรูปทรงหน้าตัดกลมและรูปทรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมมีผล ความคลาดเคลื่อนที่ไม่สัมพันธ์กันอย่างชัดเจนและอย่างมีนัยสำคัญว่ารูปทรงหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีตมี ผลกระทบต่อการหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายนี้ ดังนั้น ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ อาจสรุปได้เบื้องต้นว่าการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีทางภาพถ่ายนี้ไม่มีผลกระทบอย่างมี นัยสำคัญจากรูปทรงหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีต

4.4 ผลกระทบของขนาดหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีตต่อการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบของ คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีทางภาพถ่าย

จากภาพที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบที่ได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่มี ส่วนผสมเดียวกันแต่ตัวอย่างมีขนาดหน้าตัดที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อน ของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีขนาดหน้าตัดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 เซนติเมตร อยู่ในช่วง -0.20 % ถึง +4.52 % และความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของ ตัวอย่างที่มีขนาดหน้าตัดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 เซนติเมตร อยู่ในช่วง -1.71 % ถึง +5.11 %

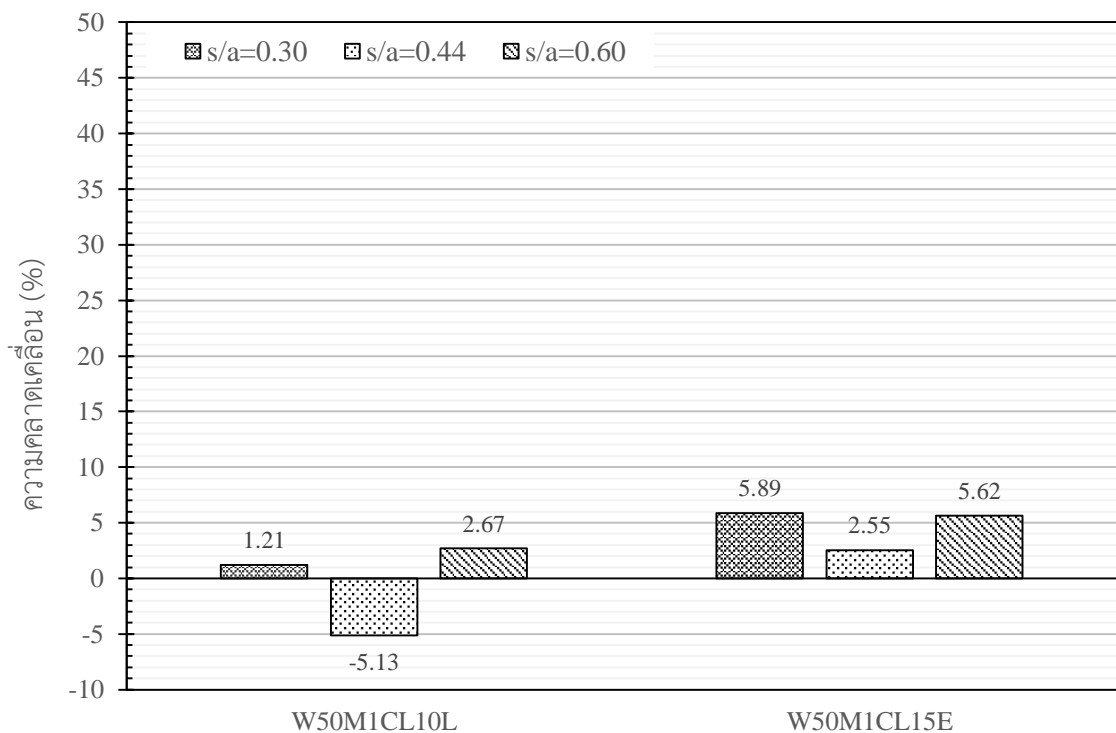


ภาพที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบ ในคอนกรีตที่มีขนาดหน้าตัดตัวอย่างต่างกัน

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่มีขนาดหน้าตัดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 เซนติเมตร ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มต่ำกว่าตัวอย่างที่มีขนาดหน้าตัดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 เซนติเมตร ในทุกส่วนผสม ดังนั้น ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้อาจสรุปได้เบื้องต้นว่าขนาดหน้าตัดมีผลกระทบต่อค่าปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายนี้เพียงเล็กน้อย

4.5 ผลกระทบของอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดต่อการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีทางภาพถ่าย

จากภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบที่ได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่มีอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดแตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดเท่ากับ 0.30, 0.44 และ 0.60 อยู่ในช่วง +1.21 % ถึง +5.89 %, -5.13 % ถึง +2.55 % และ +2.67 % ถึง +5.62 % ตามลำดับ



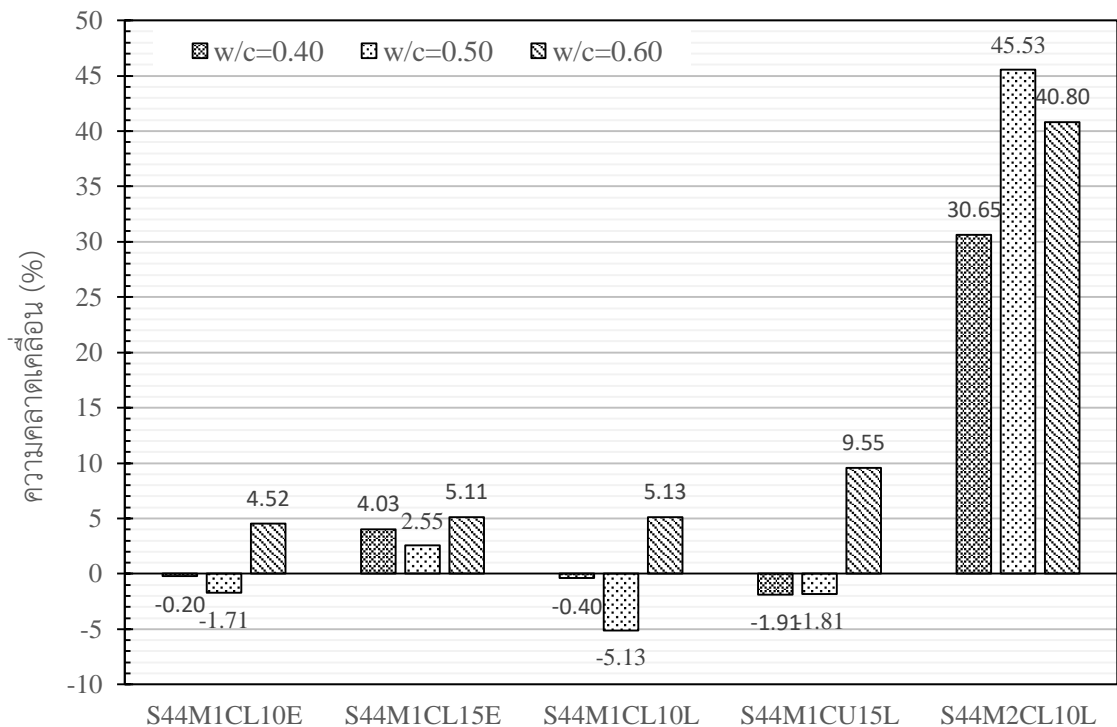
ภาพที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด (s/a) ต่างกัน

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดแตกต่างกันคือ 0.30, 0.44 และ 0.60 ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงไม่เกิน $\pm 10\%$ อีกทั้ง แนวโน้มความคลาดเคลื่อนของตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด

แตกต่างกัน มีผลความคลาดเคลื่อนที่ไม่สัมพันธ์กันอย่างชัดเจนและอย่างมีนัยสำคัญว่าอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดของตัวอย่างคอนกรีตมีผลกระทบต่อค่าการหาปริมาณมวลรวมหายไปด้วยวิธีการทางภาพถ่ายนี้ ดังนั้น ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้อาจสรุปได้เบื้องต้นว่าการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหายด้วยวิธีการทางภาพถ่ายนี้ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจากอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด

4.6 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่อการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหายของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีการทางภาพถ่าย

จากภาพที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบที่ได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์แตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหายของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.50 และ 0.60 อยู่ในช่วง -0.20 % ถึง +30.65 %, -1.71 % ถึง +40.53 % และ +4.52 % ถึง +40.80 % ตามลำดับ



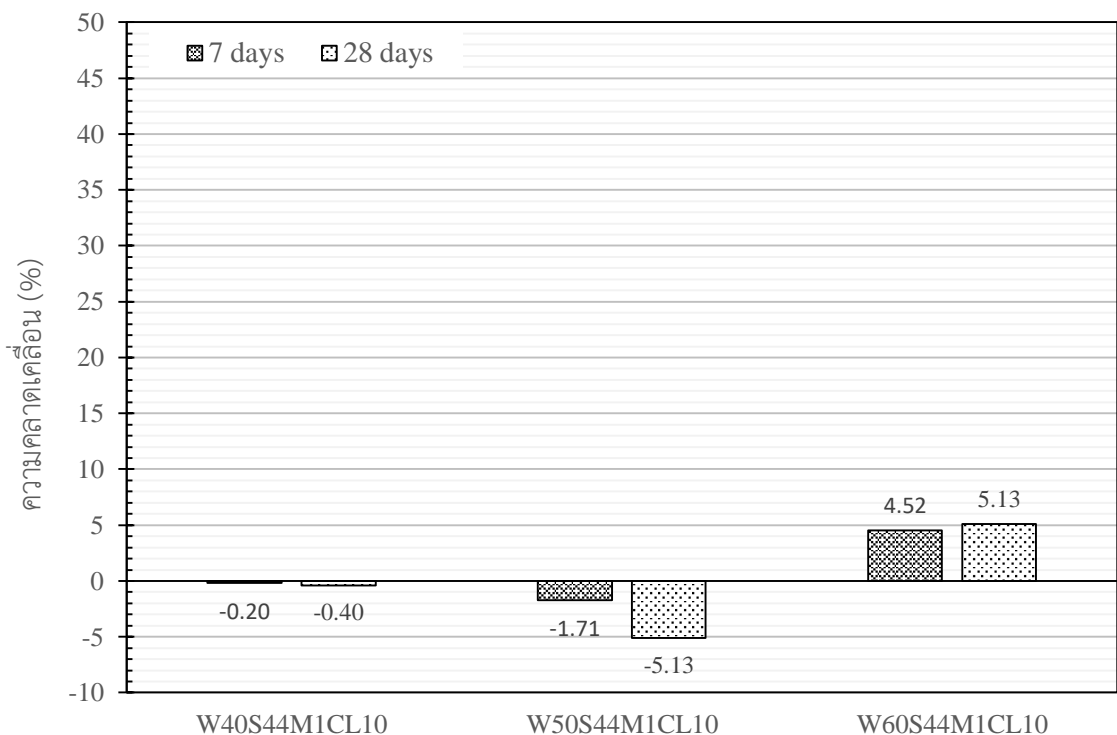
ภาพที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหายในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ต่างกัน

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.40 มีผลการคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดเกือบทุกส่วนผสม ในทางกลับกัน จะเห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.60 มีผลความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดเกือบทุกส่วนผสม อาจเนื่องจากมีปริมาณน้ำในส่วนผสมสูง คอนกรีตจึงมีความชื้นเหลวมากกว่าทำให้การกระจายตัวของมวลรวมไม่สม่ำเสมอเพราะมวลรวม

หยาบเกิดการจมตัวลงสู่ด้านล่างได้ง่าย จึงทำให้มีความหนาแน่นของพื้นที่มวลรวมหยาบของขึ้นตัวอย่าง ส่วนล่างสูง ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายหน้าตัดตัวอย่างที่พบว่าบริเวณหน้าตัดด้านล่างจะมีสัดส่วนพื้นที่มวลรวมหยาบมากกว่าด้านบน ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น ดังนั้น อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีผลกระทบต่อการศึกษาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายนี้อย่างมีนัยสำคัญ โดยผลการศึกษาในงานวิจัยนี้อาจสรุปได้เบื้องต้นว่าการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีทางภาพถ่ายนี้ หากอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงขึ้น จะทำให้ปริมาณมวลรวมหยาบที่หาได้จากวิธีการทางภาพถ่ายนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

4.7 ผลกระทบของอายุคอนกรีตต่อการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ด้วยวิธีทางภาพถ่าย

จากภาพที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบที่ได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่มีอายุแตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มี 7 วัน และ 28 วัน อยู่ในช่วง -0.20% ถึง $+4.52\%$ และ -5.13% ถึง $+5.13\%$ ตามลำดับ



ภาพที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบ ในคอนกรีตที่มีอายุต่างกัน

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 7 วัน ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มใกล้เคียงกันกับตัวอย่างที่อายุ 28 วัน ในทุกส่วนผสม ดังนั้น ผลการศึกษาใน

งานวิจัยนี้อาจสรุปได้เบื้องต้นว่าอายุไม่มีผลกระทบต่อการศึกษาปริมาณมวลรวมหยาดด้วยวิธีการทาง
ภาพถ่ายนี้

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการหาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีการทางภาพถ่าย สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. การศึกษาผลกระทบของขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบที่มีขนาดแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบมีผลกระทบต่อการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลการศึกษาในงานวิจัยนี้อาจสรุปได้เบื้องต้นว่าการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีทางภาพถ่ายนี้ เหมาะสำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว

2. การศึกษาผลกระทบของรูปทรงของตัวอย่างที่มีลักษณะแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่ารูปทรงของตัวอย่างที่ต่างกันไม่มีผลกระทบต่อการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อใช้มวลรวมขนาดใหญ่สุดเท่ากับ $\frac{3}{4}$ นิ้ว

3. การศึกษาผลกระทบของขนาดหน้าตัดที่มีขนาดแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าขนาดหน้าตัดมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายนี้ เมื่อใช้มวลรวมขนาดใหญ่สุดเท่ากับ $\frac{3}{4}$ นิ้ว

4. การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดไม่มีผลกระทบต่อการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายนี้

5. การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายนี้ โดยผลการศึกษาในงานวิจัยนี้อาจสรุปได้เบื้องต้นว่าการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีทางภาพถ่ายนี้ หากอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงขึ้น จะทำให้ปริมาณมวลรวมหยาบที่หาได้จากวิธีการทางภาพถ่ายนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

6. การศึกษาผลกระทบของอายุของคอนกรีตที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าอายุของคอนกรีตที่ต่างกันไม่มีผลกระทบต่อการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่าย

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการหาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีการทางภาพถ่าย มีข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป ดังนี้

1. เนื่องจากขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบมีผลกระทบอย่างชัดเจน จึงควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนความสัมพันธ์ของขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบต่อขนาดการตัดแบ่งก้อนตัวอย่างที่นำมาใช้ทดสอบให้เหมาะสม

2. เนื่องจากการศึกษานี้พิจารณาผลกระทบของรูปทรงของตัวอย่างที่มีลักษณะแตกต่างกัน โดยใช้ขนาดตัวอย่างที่นิยมใช้กันแพร่หลาย ซึ่งมีขนาดเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบประเภทอื่น ทำให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดแตกต่างกัน จึงควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของผลกระทบด้านขนาดของรูปทรงหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีต โดยกำหนดให้ขนาดรูปทรงตัวอย่างคอนกรีตที่แตกต่างกันและมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน เพื่อสามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบได้อย่างเหมาะสม

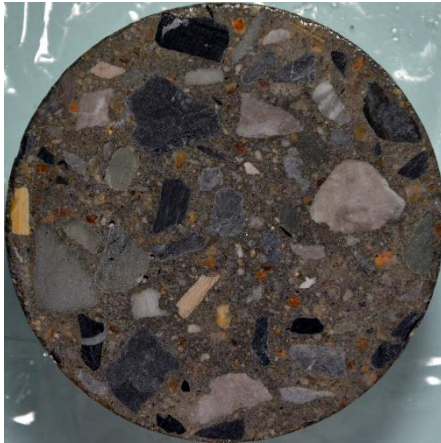
3. เนื่องด้วยชนิดของมวลรวมอาจมีผลกระทบต่อการทดสอบด้วยวิธีทางภาพถ่าย เนื่องด้วยสีหรือเนื้อผิวของมวลรวมที่แตกต่างกัน อาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการทดสอบ จึงควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของผลกระทบด้านชนิดของมวลรวมที่แตกต่างกัน

บรรณานุกรม

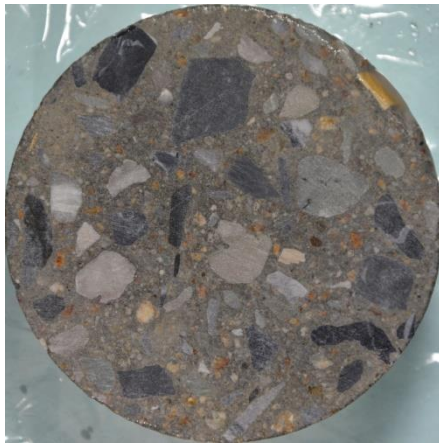
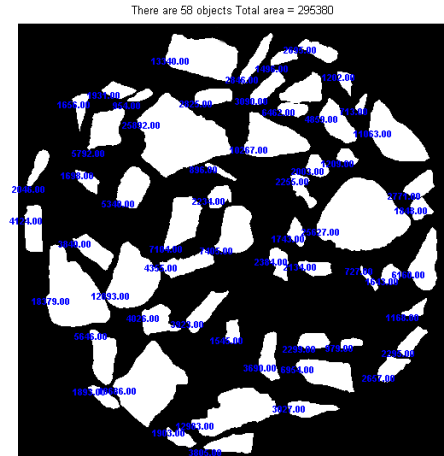
- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. กันยายน (2547). หินอุตสาหกรรมเพื่อการก่อสร้าง. หจก.ซี นาย คอมพิวเตอร์กราฟฟิค. กรุงเทพมหานคร.
- ชัยวาลย์ เศรษฐบุตร. (2537). คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 3. บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด. กรุงเทพมหานคร.
- มยุรี ปาลวงศ์. (2544). หินเพื่ออุตสาหกรรมก่อสร้าง. กองวิชาการและวางแผน กรมทรัพยากรธรณี. กรุงเทพมหานคร.
- C.F. Mora, A.K.H. Kwan, et al. (1998). Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing. *Cement and Concrete Research*, 28(1998) 921–932.
- J.M.R. Fernlund (2005). Image analysis method for determining 3-D shape of coarse aggregate. *Cement and Concrete Research*, 35 (2005) 1629 – 1637.
- L. Banta, K. Cheng, et al. (2003). Estimation of limestone particle mass from 2D images. *Powder Technology*, 132 (2003) 184 – 189.
- M.S. Jung, M.C. Shin, et al. (2012). Fingerprinting of a concrete mix proportion using the acid neutralisation capacity of concrete matrices. *Construction and Building Materials*, 26 (2012) 65–71.
- P.V. Beton (1988). Methods for analysis of hardened concrete. *Testing concrete, Part 124* (1988).
- T. Chuosavasdi, W. Saengsoy, et al. (2014). Determination of mix proportion of hardened OPC concrete. The 19 th National Convention on Civil Engineering, Khon-Kaen, Thailand. (2014) 670-675.
- W. Wang. (1999). Image analysis of aggregates. *Division of Engineering Geology. Construction and Building Materials*, 26 (2012) 65–71.

ภาคผนวก

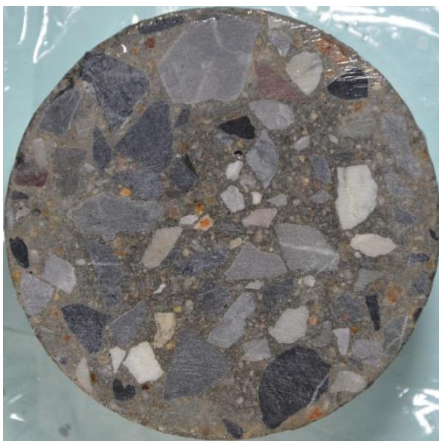
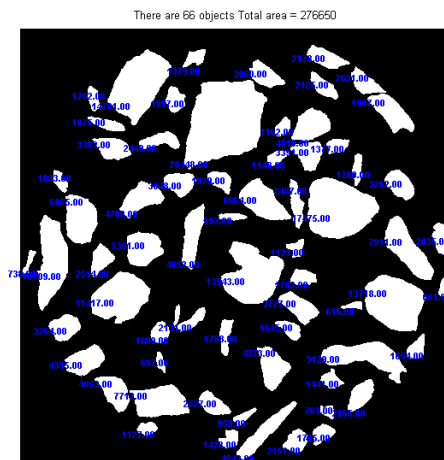
ภาคผนวก ก
ภาพถ่ายหน้าตัดตัวอย่างทดสอบ



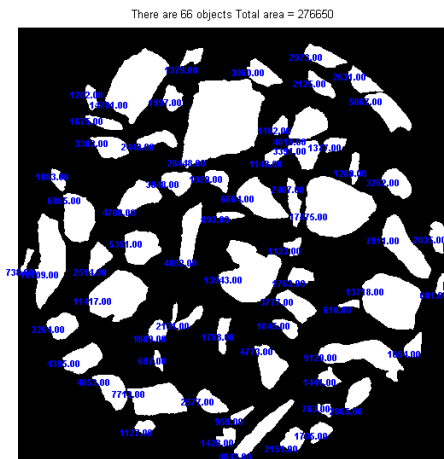
W40S44M1CL10E-A6-1

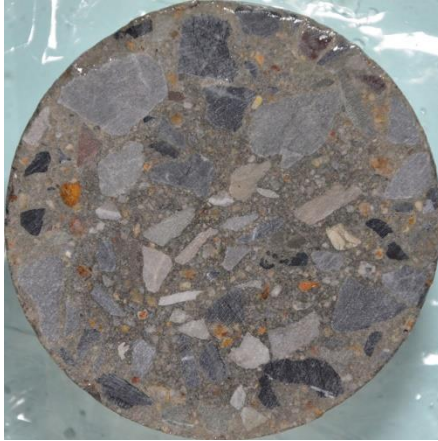


W40S44M1CL10E-A5-1

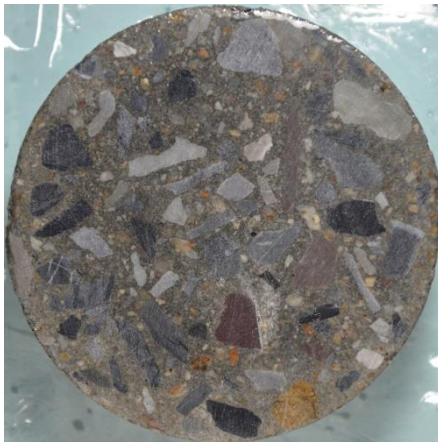
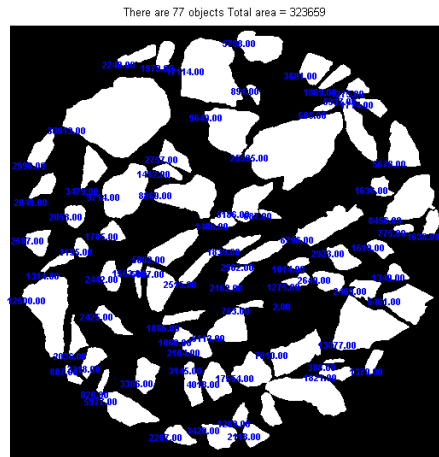


W40S44M1CL10E-A4-1

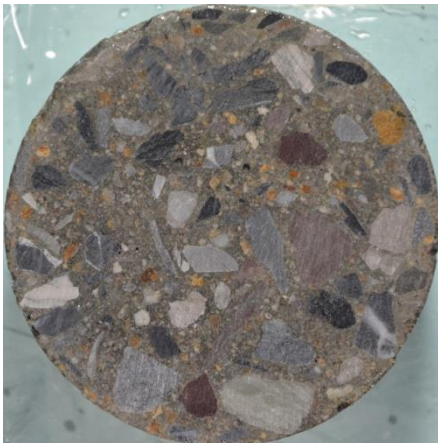
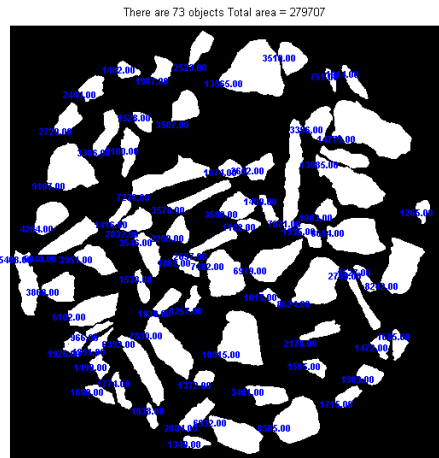




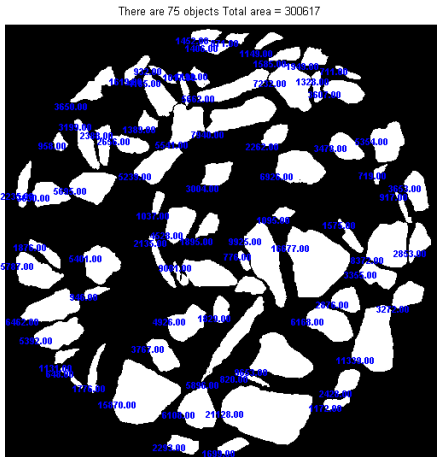
W40S44M1CL10E-A3-1

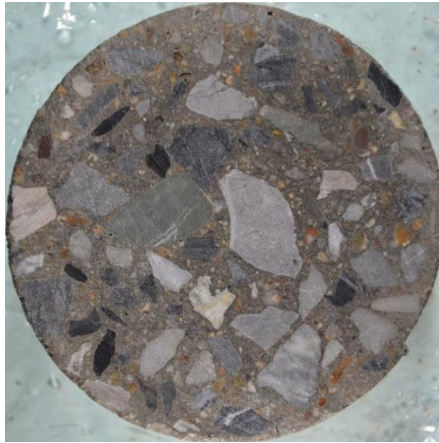


W40S44M1CL10E-A2-1

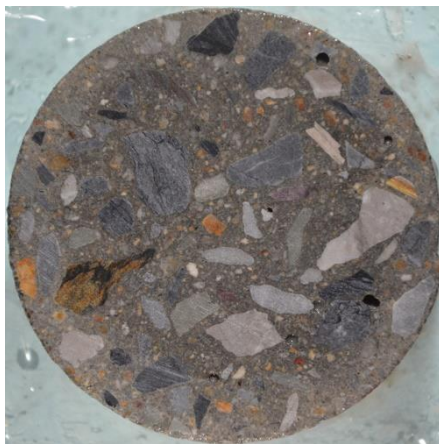
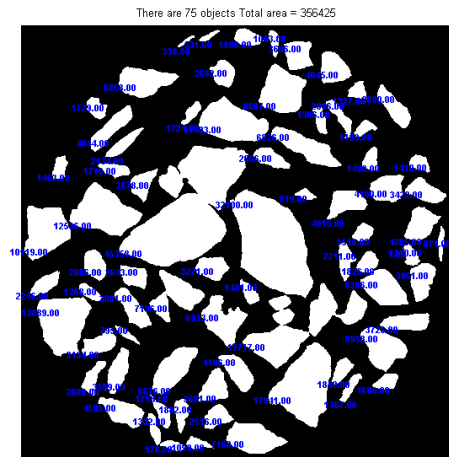


W40S44M1CL10E-A1-1

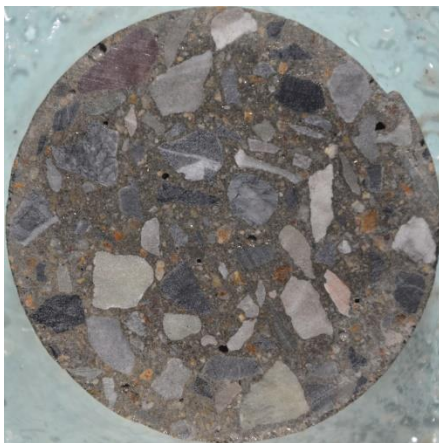
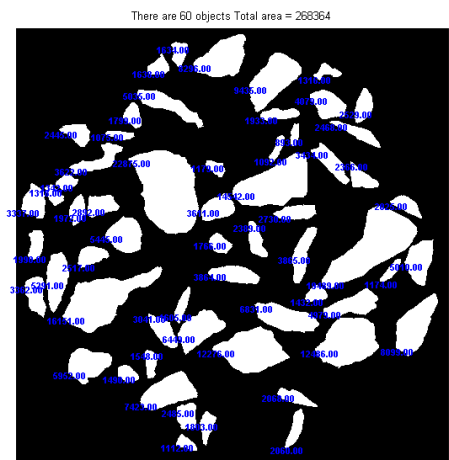




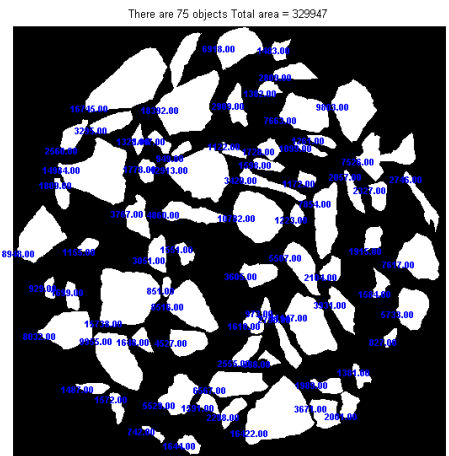
W40S44M1CL10E-A6-2



W40S44M1CL10E-A5-2

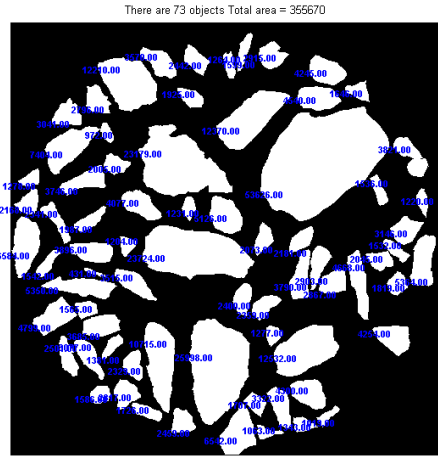


W40S44M1CL10E-A4-2

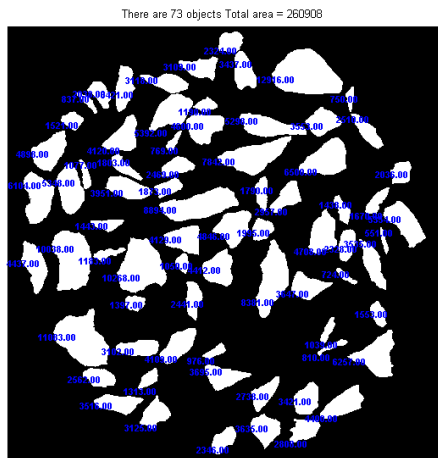




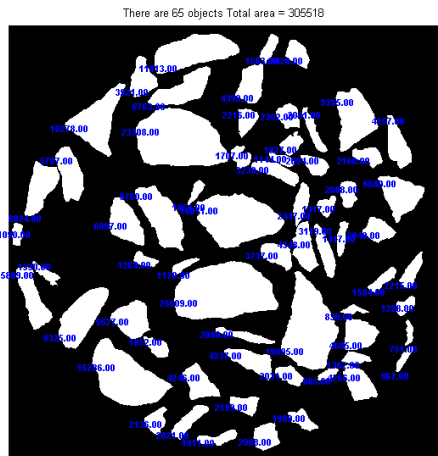
W40S44M1CL10E-A3-2



W40S44M1CL10E-A2-2

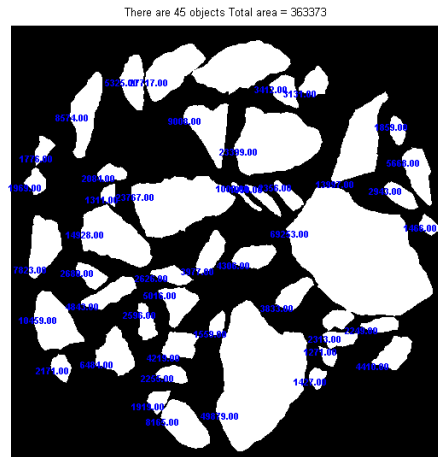


W40S44M1CL10E-A1-2

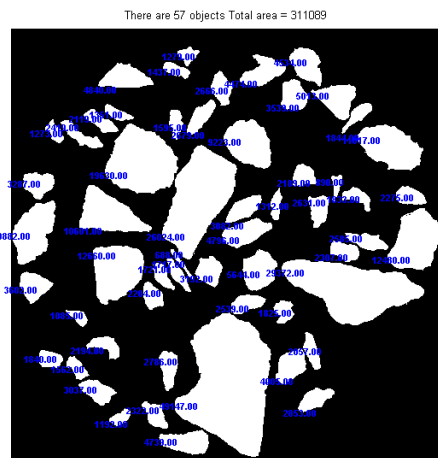




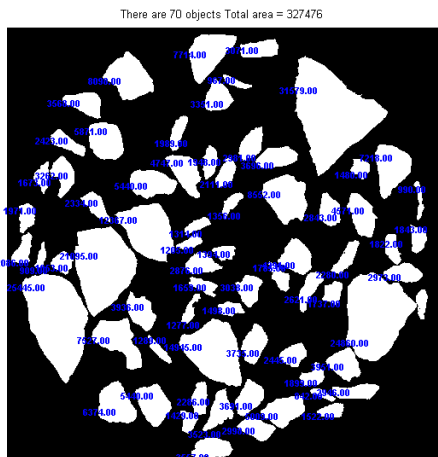
W40S44M1CL10L-A6-1



W40S44M1CL10L-A5-1

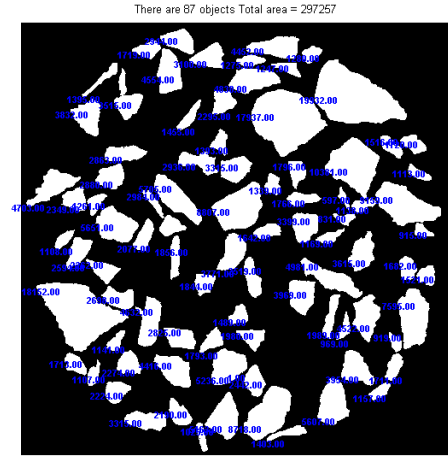


W40S44M1CL10L-A4-1

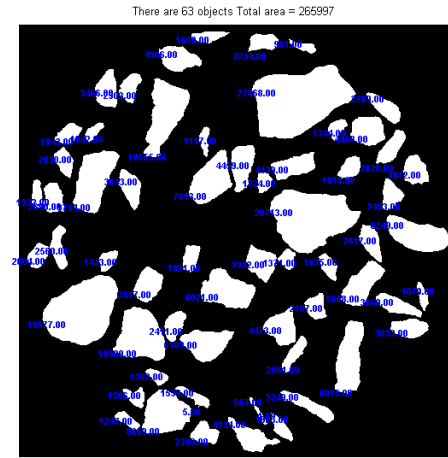




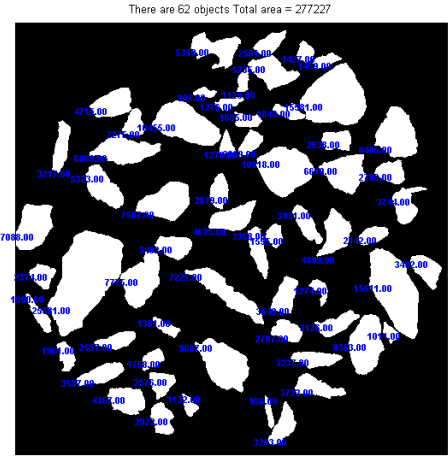
W40S44M1CL10L-A3-1



W40S44M1CL10L-A2-1

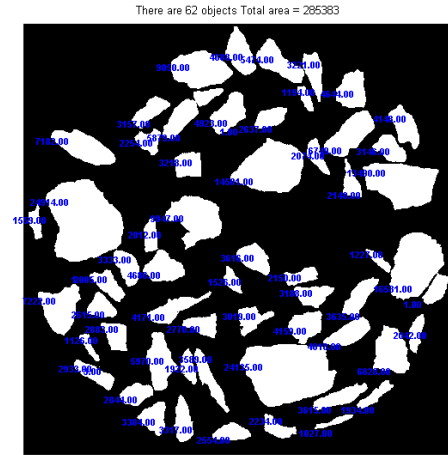


W40S44M1CL10L-A1-1

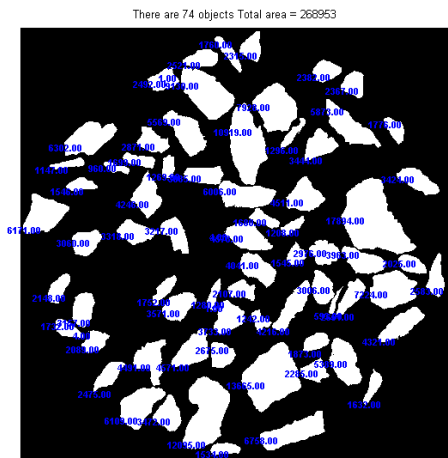




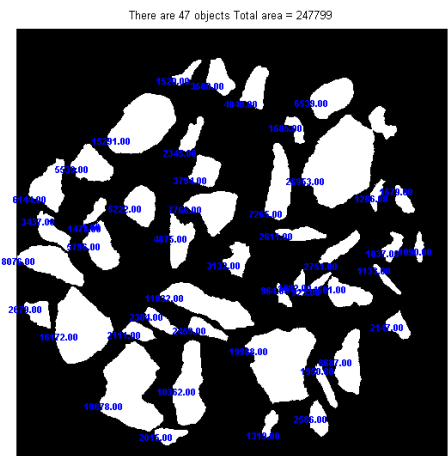
W40S44M1CL10L-A6-2



W40S44M1CL10L-A5-2

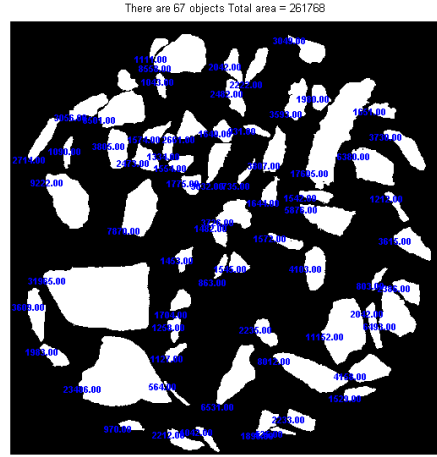


W40S44M1CL10L-A4-2

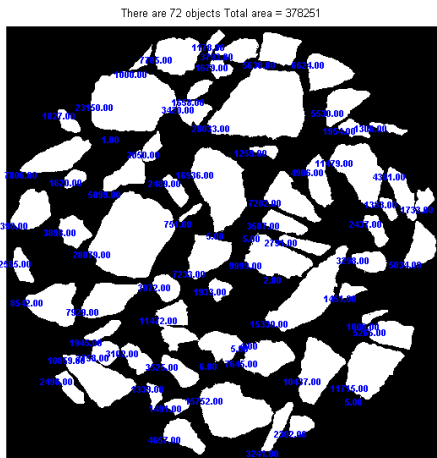




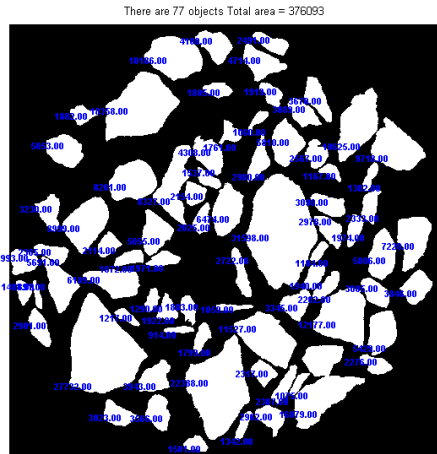
W40S44M1CL10L-A3-2



W40S44M1CL10L-A2-2

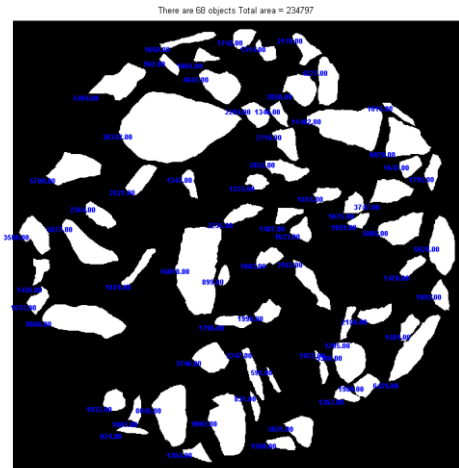


W40S44M1CL10L-A1-2

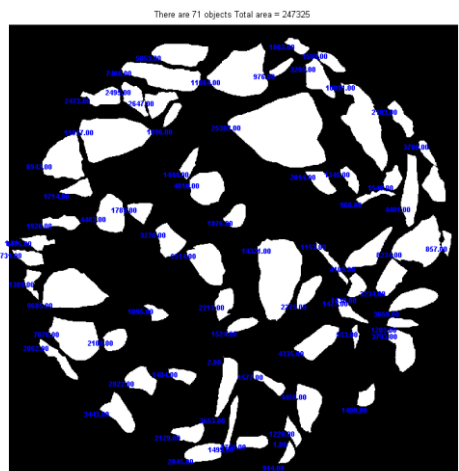




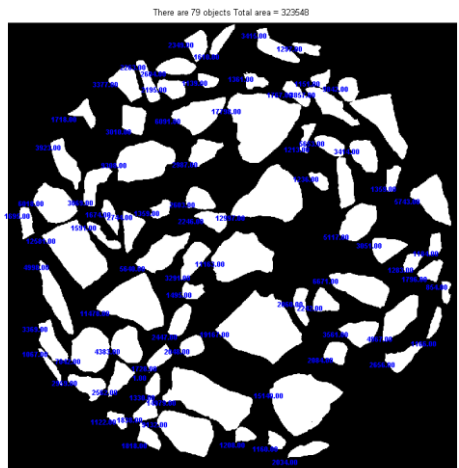
W60S44M1CL10E-A6-1

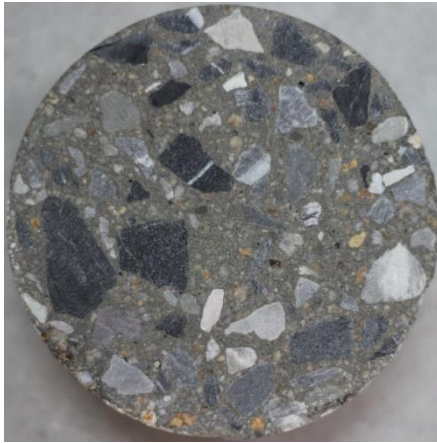


W60S44M1CL10E-A5-1

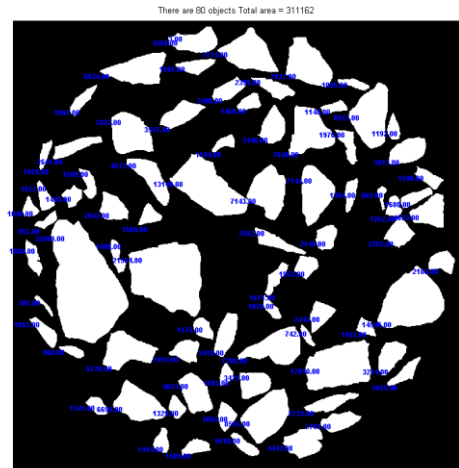


W60S44M1CL10E-A4-1

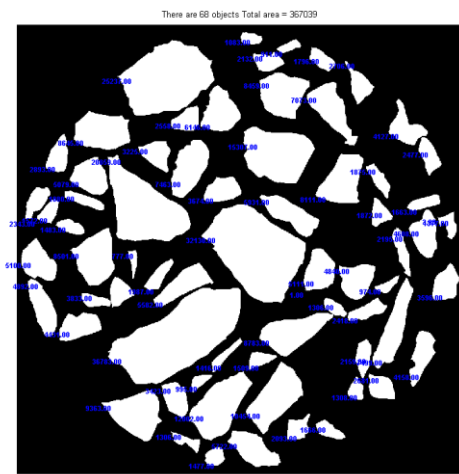




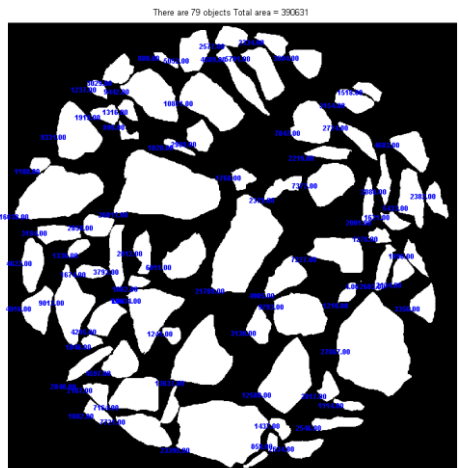
W60S44M1CL10E-A3-1



W60S44M1CL10E-A2-1

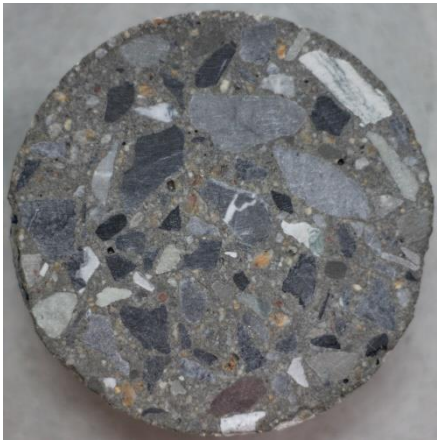
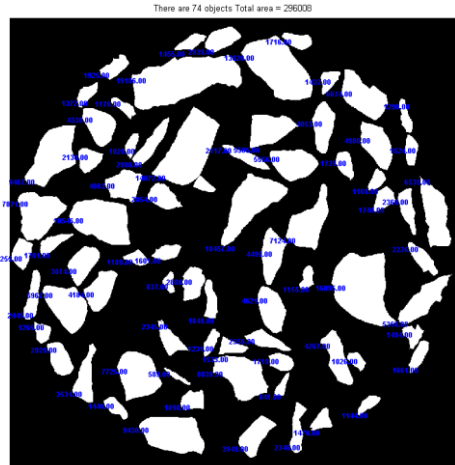


W60S44M1CL10E-A1-1

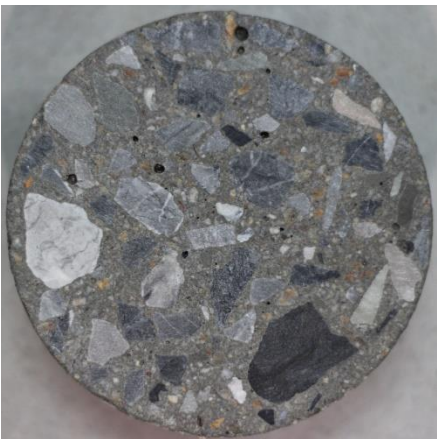
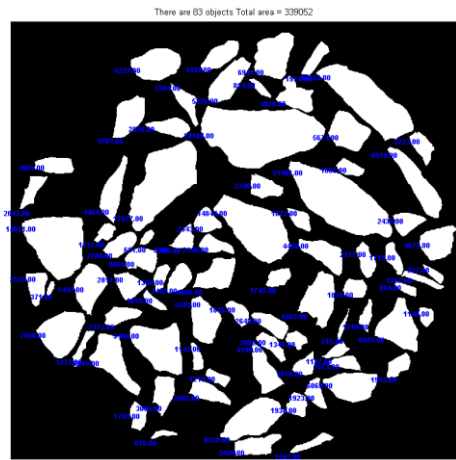




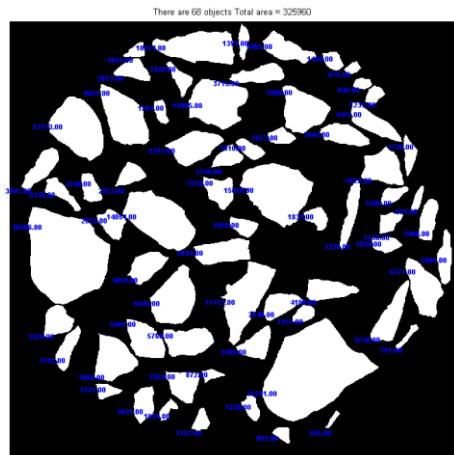
W60S44M1CL10E-A6-2



W60S44M1CL10E-A5-2

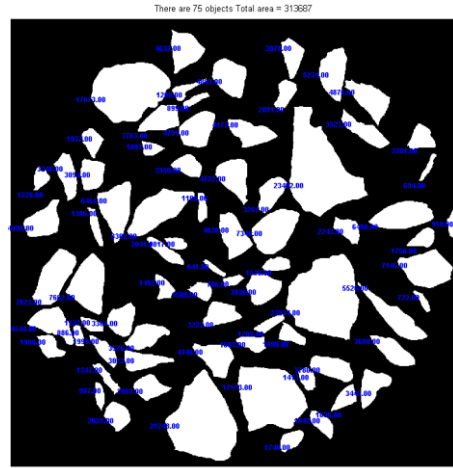


W60S44M1CL10E-A4-2

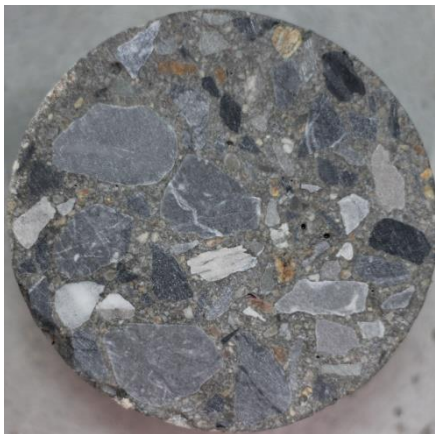
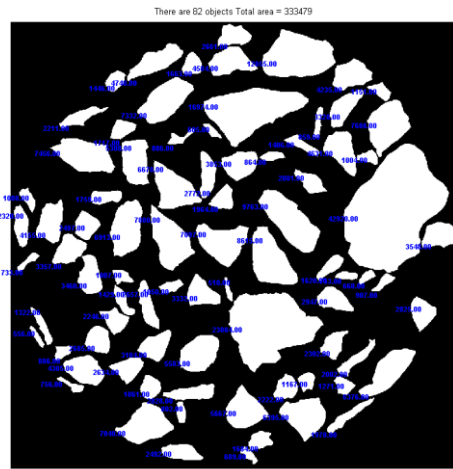




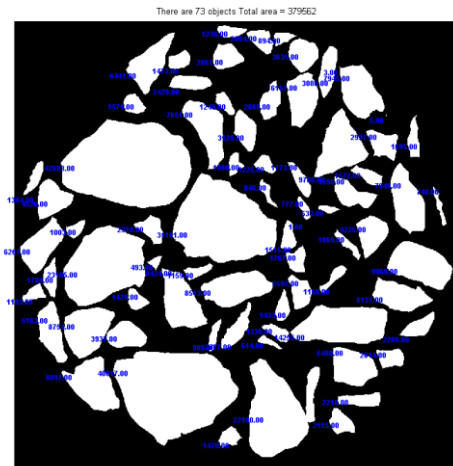
W60S44M1CL10E-A3-2



W60S44M1CL10E-A2-2

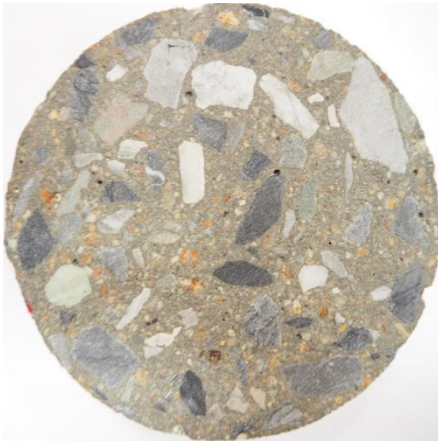
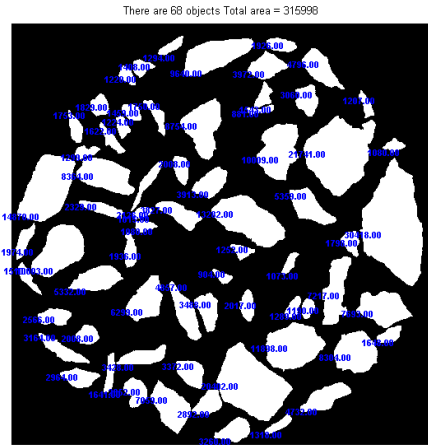


W60S44M1CL10E-A1-2

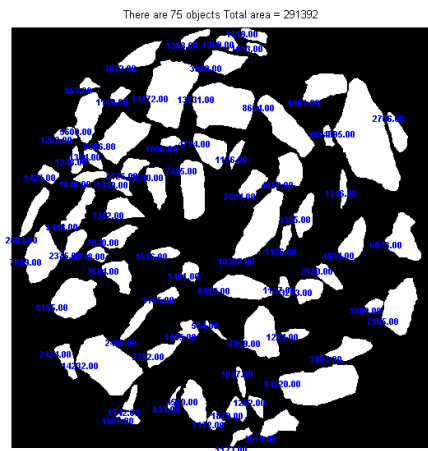




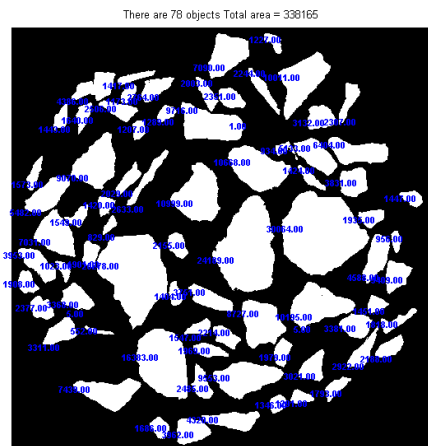
W60S44M1CL10L-A6-1



W60S44M1CL10L-A5-1

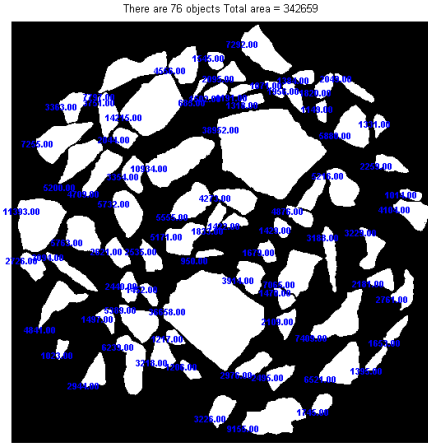


W60S44M1CL10L-A4-1

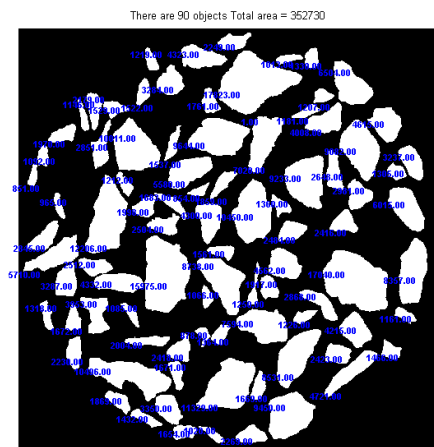




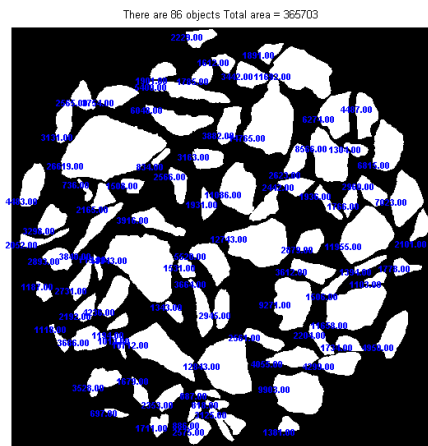
W60S44M1CL10L-A3-1



W60S44M1CL10L-A2-1

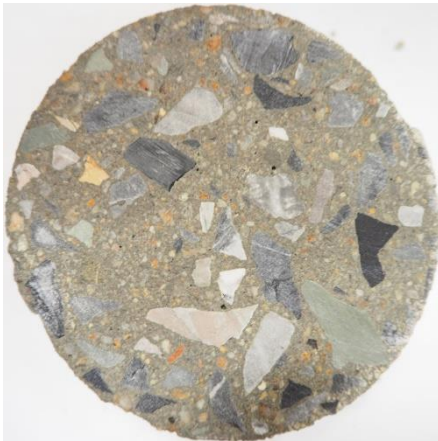
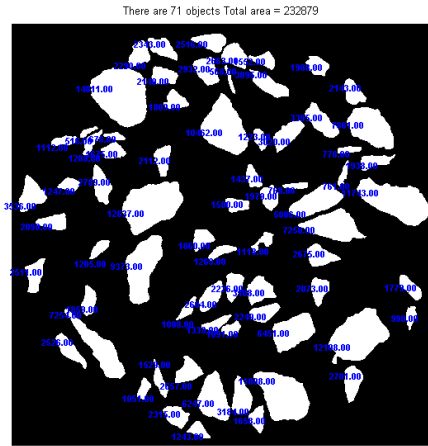


W60S44M1CL10L-A1-1

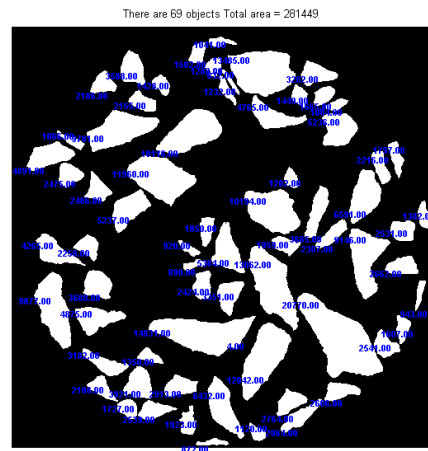




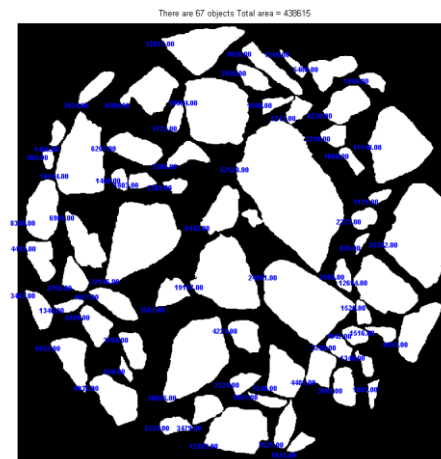
W60S44M1CL10L-A6-2



W60S44M1CL10L-A5-2

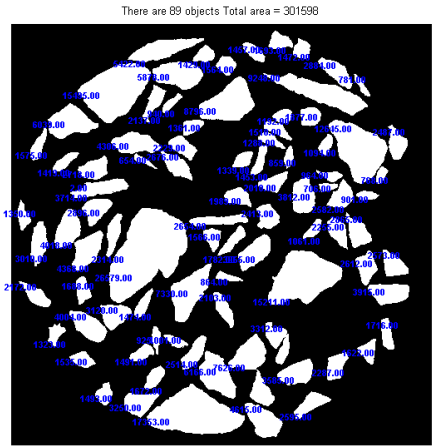


W60S44M1CL10L-A4-2

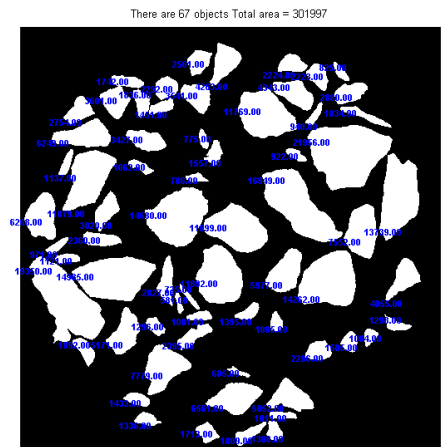




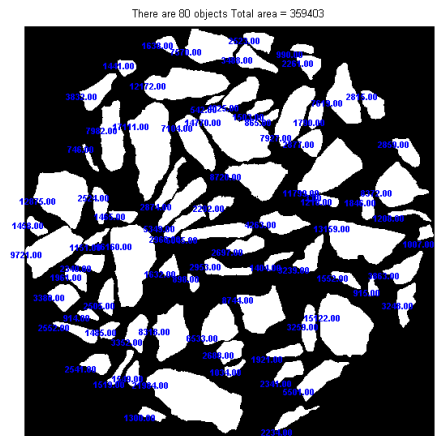
W60S44M1CL10L-A3-2



W60S44M1CL10L-A2-2

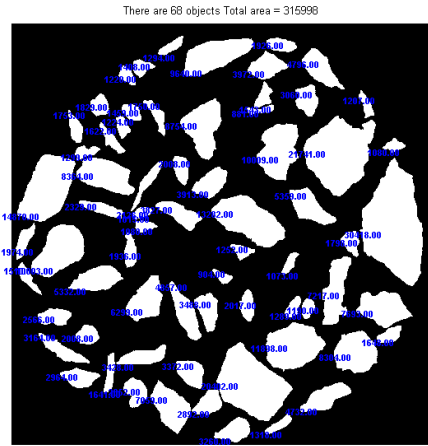


W60S44M1CL10L-A1-2

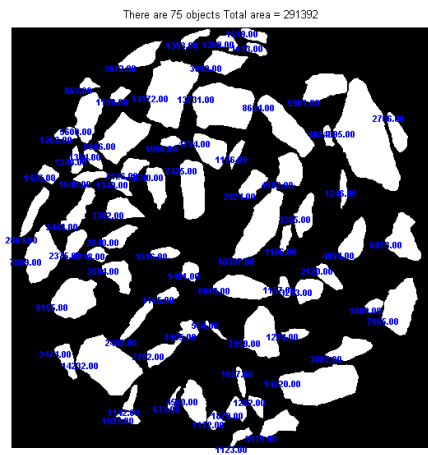




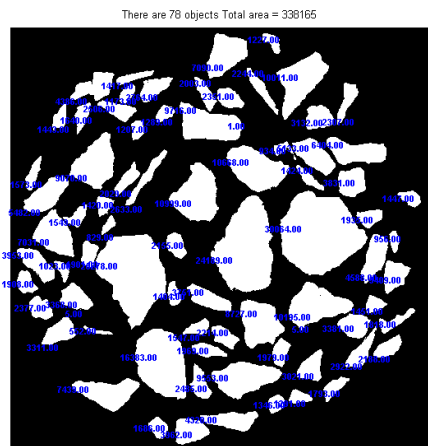
W40S44M2CL10L-A6-1



W40S44M2CL10L-A5-1

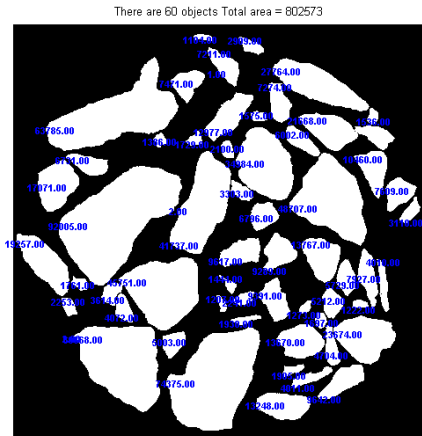


W40S44M2CL10L-A4-1

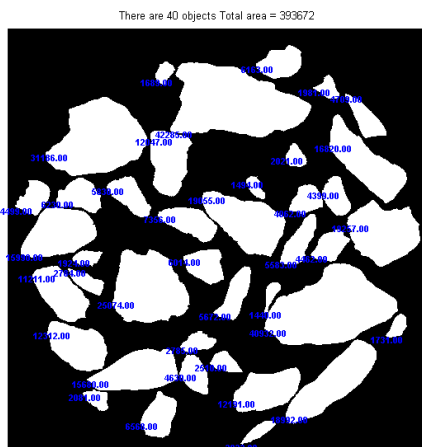




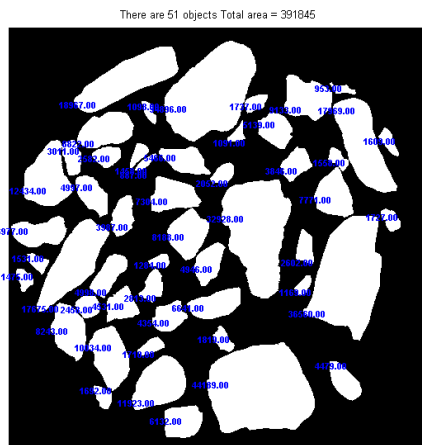
W40S44M2CL10L-A3-1



W40S44M2CL10L-A2-1

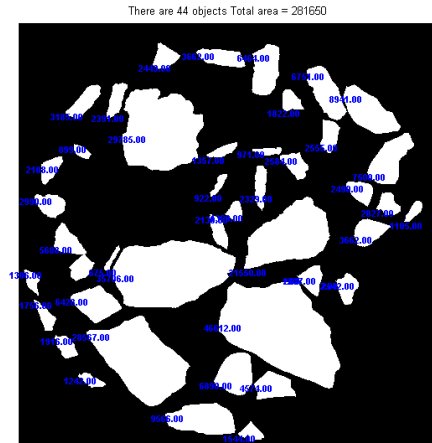


W40S44M2CL10L-A1-1

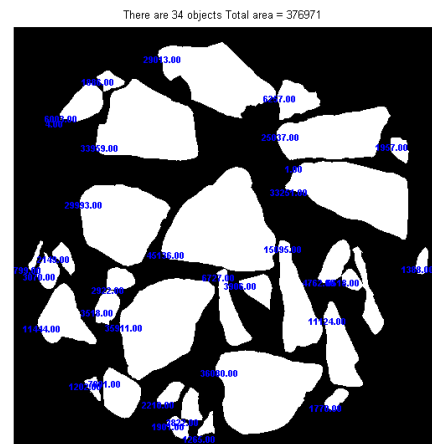




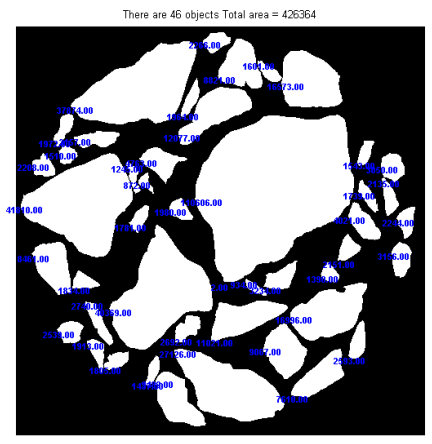
W40S44M2CL10L-A6-2

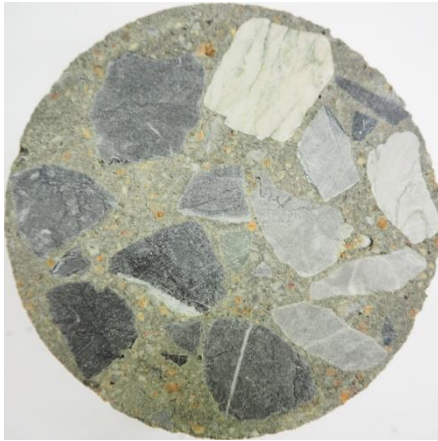


W40S44M2CL10L-A5-2

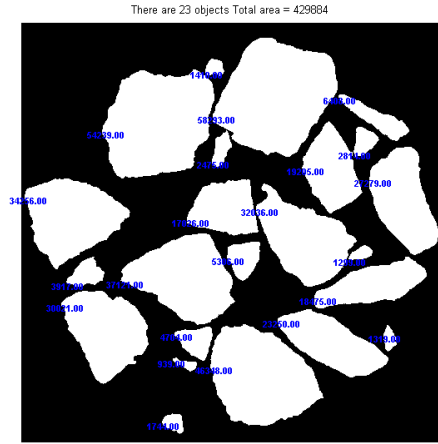


W40S44M2CL10L-A4-2





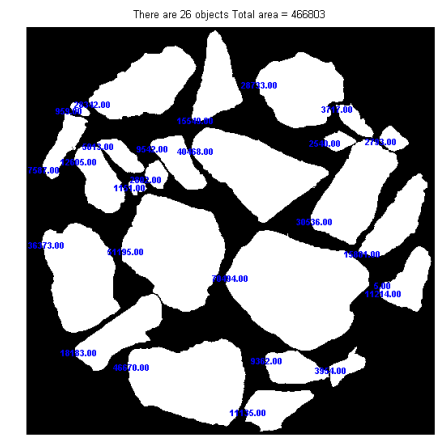
W60S44M2CL10L-A6-2



W60S44M2CL10L-A5-2

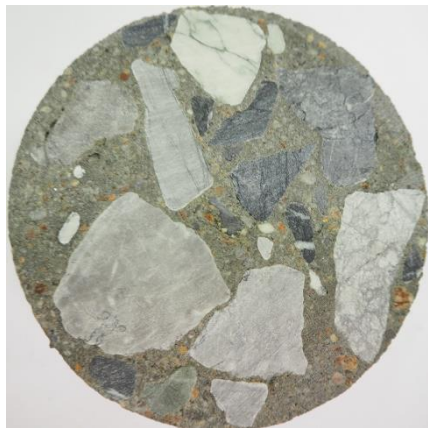
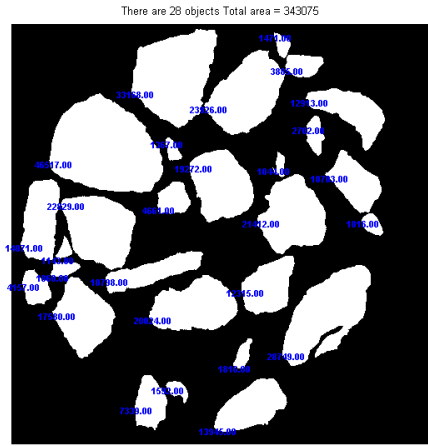


W60S44M2CL10L-A4-2

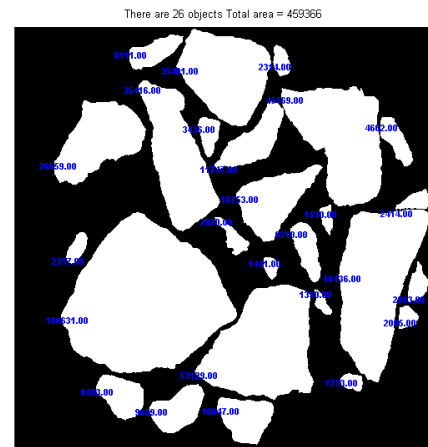




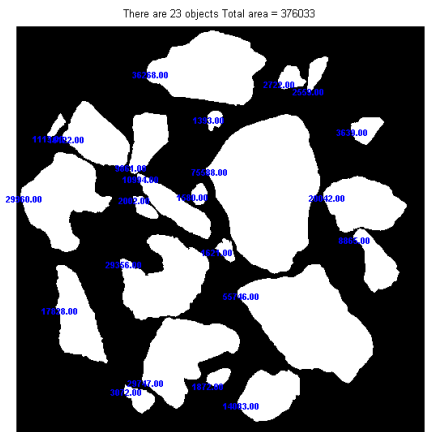
W60S44M2CL10L-A3-2

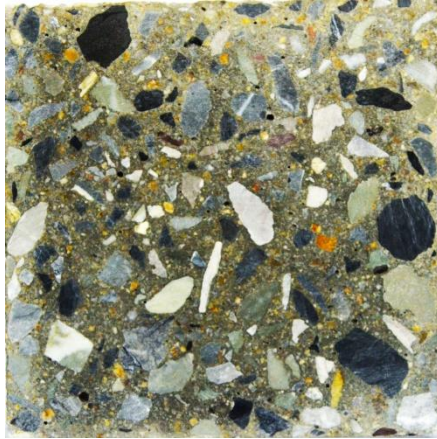


W60S44M2CL10L-A2-2

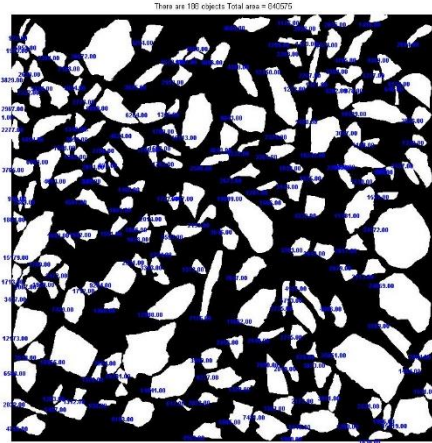


W60S44M2CL10L-A1-2

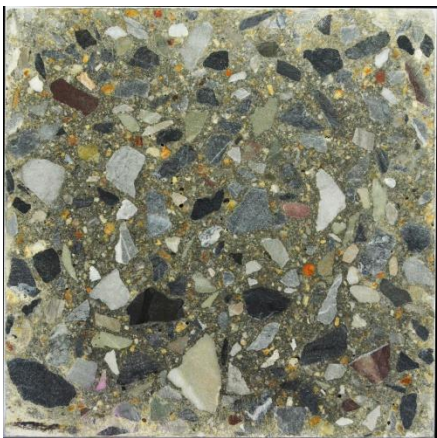
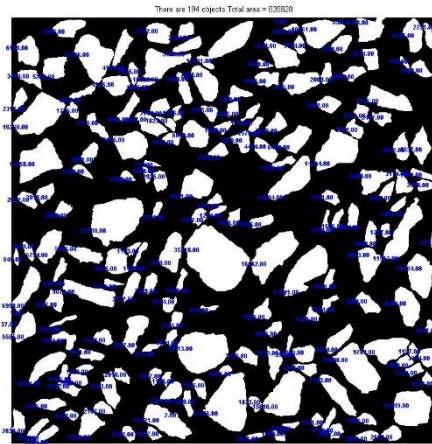




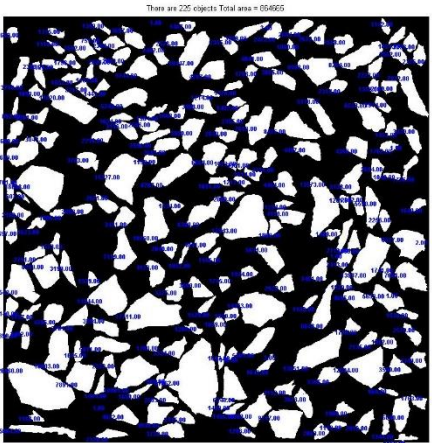
W40S44M1CU15L-A4-1

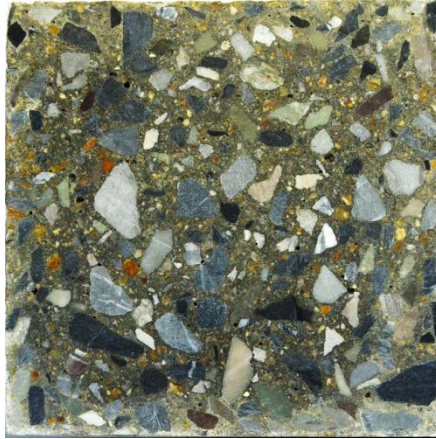


W40S44M1CU15L-A3-1

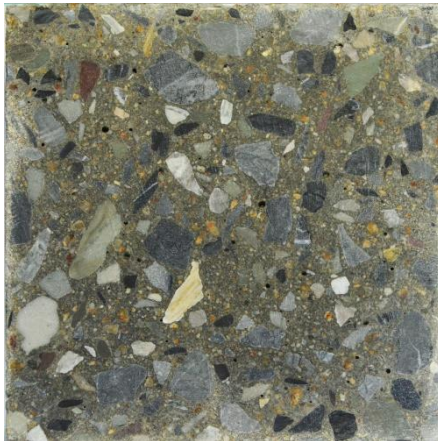
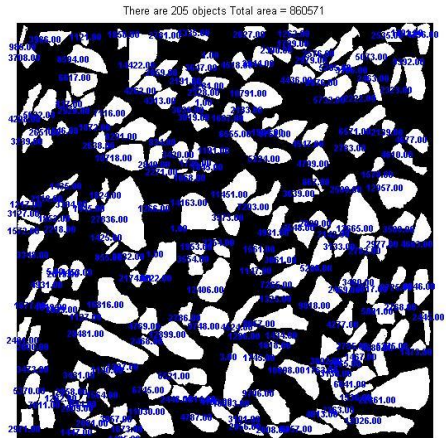


W40S44M1CU15L-A2-1

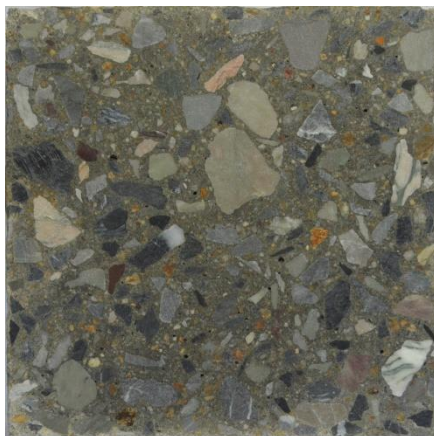
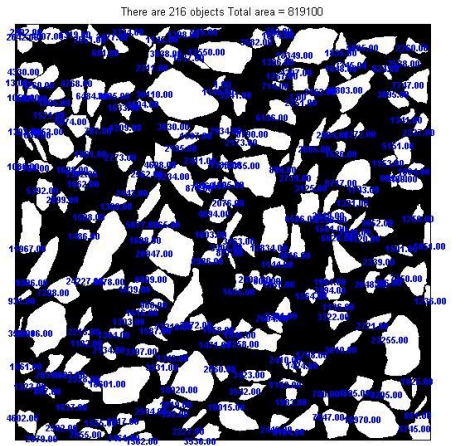




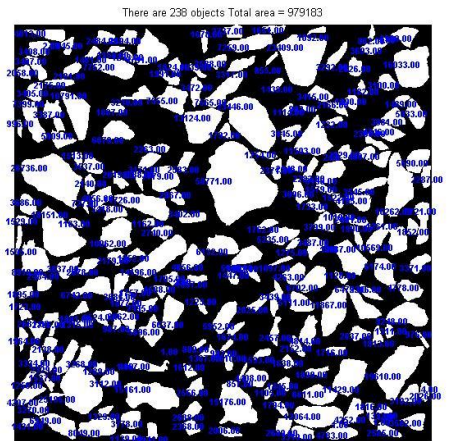
W40S44M1CU15L-A1-1

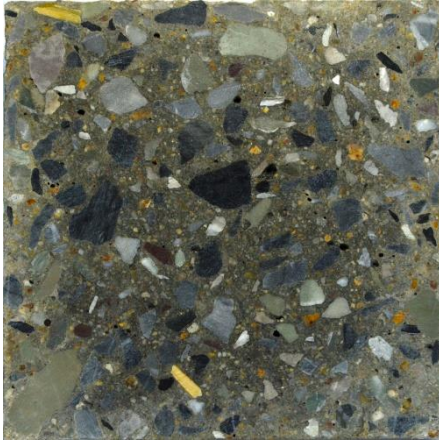


W40S44M1CU15L-A4-2

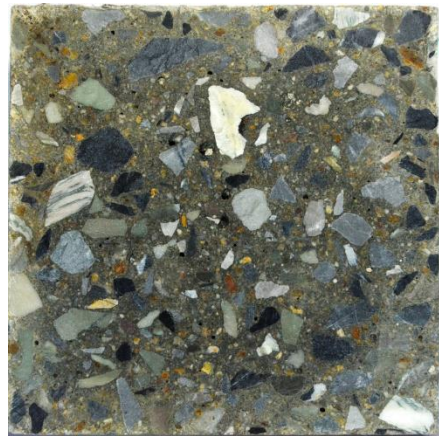
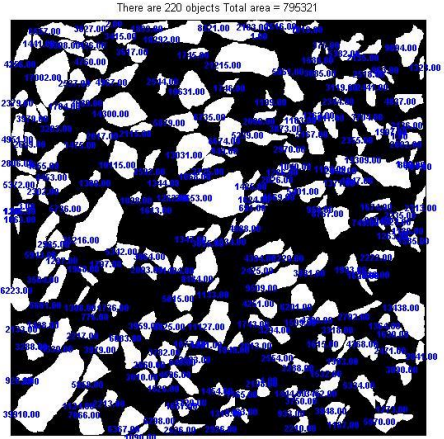


W40S44M1CU15L-A3-2

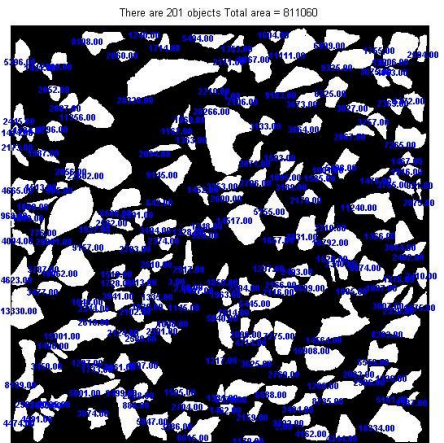


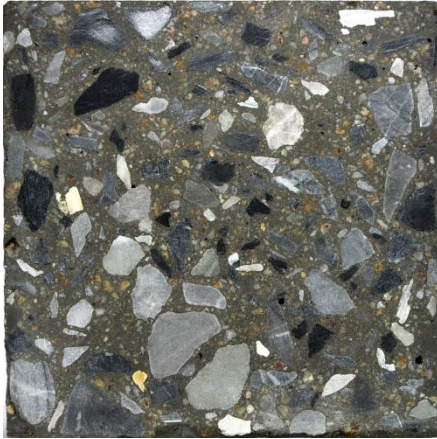


W40S44M1CU15L-A2-2

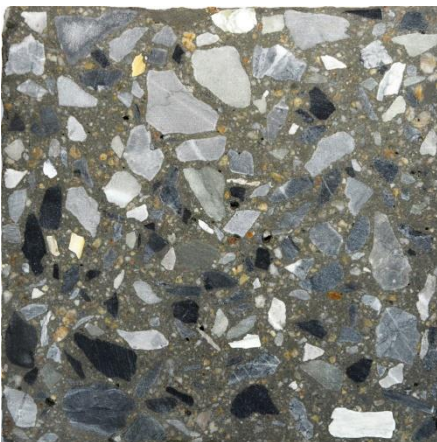
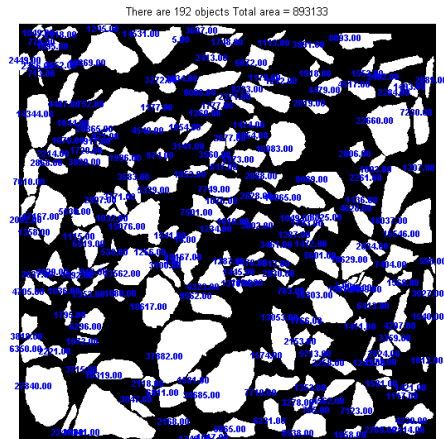


W40S44M1CU15L-A1-2

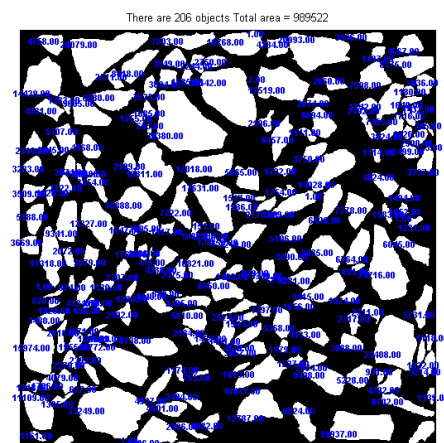




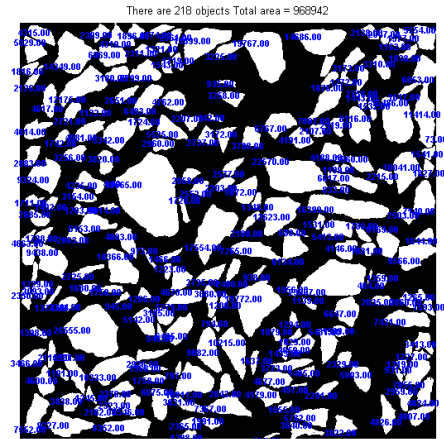
W60S44M1CU15L-A4-1



W60S44M1CU15L-A3-1

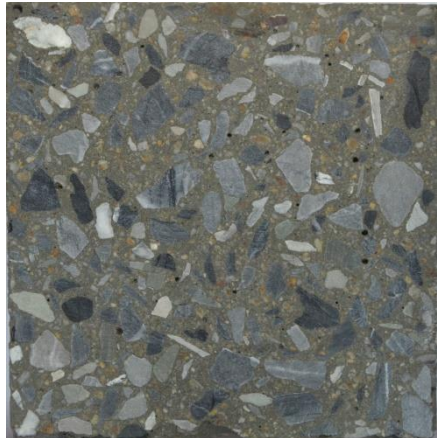
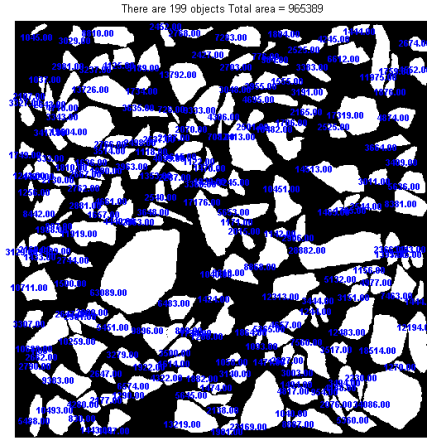


W60S44M1CU15L-A2-1

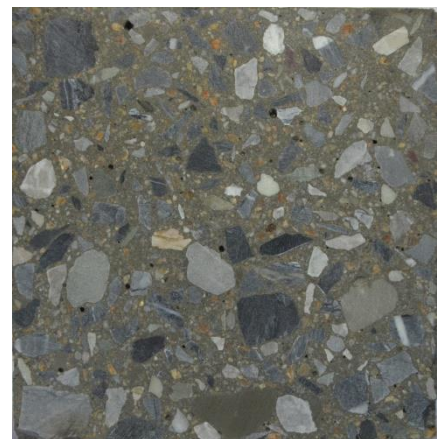
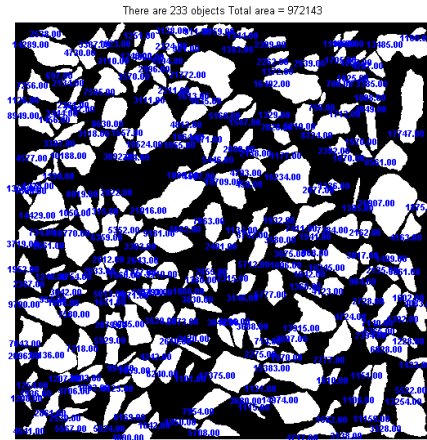




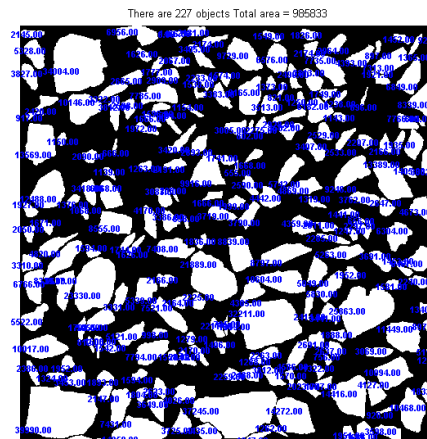
W60S44M1CU15L-A1-1

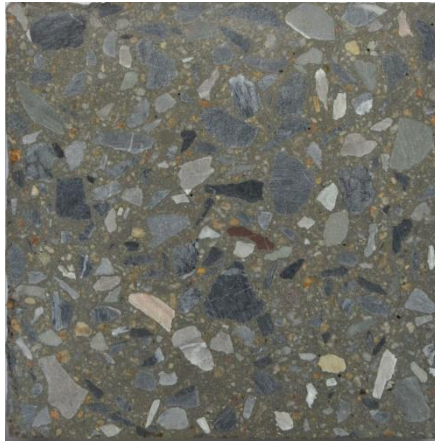


W60S44M1CU15L-A4-2

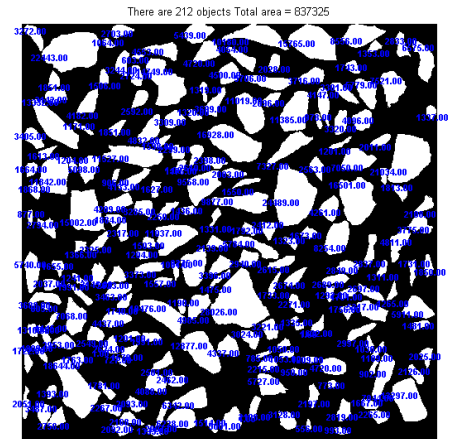


W60S44M1CU15L-A3-2





W60S44M1CU15L-A2-2



ภาคผนวก ข
ผลการคำนวณและความคลาดเคลื่อน
ของปริมาณมวลรวมหยาบ

ตารางที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างแต่ละหน้าตัด

| ตัวอย่าง | หน้าตัด | ปริมาณมวลรวมหยาบ (กก./ลบ.ม) | | ค่าความคลาดเคลื่อน (%) |
|---------------|---------|--------------------------------|-----------|---------------------------|
| | | ออกแบบ | วิเคราะห์ | |
| W40S44M1CL10E | A6-1 | 994.8 | 962.1 | -3.28 |
| | A5-1 | 994.8 | 901.1 | -9.41 |
| | A4-1 | 994.8 | 1142.1 | 14.81 |
| | A3-1 | 994.8 | 1054.2 | 5.97 |
| | A2-1 | 994.8 | 911.0 | -8.41 |
| | A1-1 | 994.8 | 979.1 | -1.57 |
| | A6-2 | 994.8 | 1125.1 | 13.09 |
| | A5-2 | 994.8 | 847.1 | -14.84 |
| | A4-2 | 994.8 | 1041.5 | 4.69 |
| | A3-2 | 994.8 | 1140.4 | 14.63 |
| | A2-2 | 994.8 | 836.5 | -15.90 |
| | A1-2 | 994.8 | 979.5 | -1.52 |
| W40S44M1CL10L | A6-1 | 994.8 | 1183.5 | 18.97 |
| | A5-1 | 994.8 | 1013.2 | 1.85 |
| | A4-1 | 994.8 | 1066.6 | 7.22 |
| | A3-1 | 994.8 | 968.2 | -2.67 |
| | A2-1 | 994.8 | 866.4 | -12.90 |
| | A1-1 | 994.8 | 902.9 | -9.22 |
| | A6-2 | 994.8 | 944.4 | -5.06 |
| | A5-2 | 994.8 | 890.0 | -10.52 |
| | A4-2 | 994.8 | 820.0 | -17.56 |
| | A3-2 | 994.8 | 832.7 | -16.28 |
| | A2-2 | 994.8 | 1203.3 | 20.96 |
| | A1-2 | 994.8 | 1196.4 | 20.27 |

หมายเหตุ : (-) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ

(+) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าสูงกว่าค่าที่ออกแบบ

| ตัวอย่าง | หน้าตัด | ปริมาณมวลรวมหยาบ (กก./ลบ.ม) | | ค่าความคลาดเคลื่อน (%) |
|---------------|---------|--------------------------------|-----------|---------------------------|
| | | ออกแบบ | วิเคราะห์ | |
| W50S30M1CL10L | A6-1 | 1243.5 | 1165.6 | -6.26 |
| | A5-1 | 1243.5 | 1198.6 | -3.61 |
| | A4-1 | 1243.5 | 1332.5 | 7.16 |
| | A3-1 | 1243.5 | 1177.5 | -5.31 |
| | A2-1 | 1243.5 | 1149.1 | -7.59 |
| | A1-1 | 1243.5 | 1302.1 | 4.71 |
| | A6-2 | 1243.5 | 1293.2 | 3.99 |
| | A5-2 | 1243.5 | 1284.8 | 3.32 |
| | A4-2 | 1243.5 | 1285.5 | 3.38 |
| | A3-2 | 1243.5 | 1266.3 | 1.83 |
| | A2-2 | 1243.5 | 1328.2 | 6.81 |
| | A1-2 | 1243.5 | 1324.4 | 6.50 |
| W50S44M1CL10E | A6-1 | 994.8 | 912.4 | -8.28 |
| | A5-1 | 994.8 | 1078.1 | 8.37 |
| | A4-1 | 994.8 | 951.2 | -4.39 |
| | A3-1 | 994.8 | 924.7 | -7.05 |
| | A2-1 | 994.8 | 1034.4 | 3.98 |
| | A1-1 | 994.8 | 1008.8 | 1.40 |
| | A6-2 | 994.8 | 924.0 | -7.12 |
| | A5-2 | 994.8 | 1066.8 | 7.24 |
| | A4-2 | 994.8 | 1057.4 | 6.29 |
| | A3-2 | 994.8 | 907.4 | -8.78 |
| | A2-2 | 994.8 | 868.5 | -12.70 |
| | A1-2 | 994.8 | 1025.4 | 3.07 |

หมายเหตุ : (-) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ

(+) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าสูงกว่าค่าที่ออกแบบ

| ตัวอย่าง | หน้าตัด | ปริมาณมวลรวมหยาบ (กก./ลบ.ม) | | ค่าความคลาดเคลื่อน (%) |
|---------------|---------|--------------------------------|-----------|---------------------------|
| | | ออกแบบ | วิเคราะห์ | |
| W50S44M1CL10L | A6-1 | 994.8 | 918.6 | -7.66 |
| | A5-1 | 994.8 | 910.9 | -8.44 |
| | A4-1 | 994.8 | 879.0 | -11.64 |
| | A3-1 | 994.8 | 908.8 | -8.64 |
| | A2-1 | 994.8 | 978.4 | -1.65 |
| | A1-1 | 994.8 | 940.8 | -5.43 |
| | A6-2 | 994.8 | 926.0 | -6.92 |
| | A5-2 | 994.8 | 896.9 | -9.84 |
| | A4-2 | 994.8 | 914.1 | -8.11 |
| | A3-2 | 994.8 | 1117.7 | 12.35 |
| | A2-2 | 994.8 | 934.5 | -6.06 |
| | A1-2 | 994.8 | 997.2 | 0.24 |
| W50S60M1CL10L | A6-1 | 710.5 | 792.3 | 11.51 |
| | A5-1 | 710.5 | 773.2 | 8.83 |
| | A4-1 | 710.5 | 831.6 | 17.04 |
| | A3-1 | 710.5 | 647.9 | -8.81 |
| | A2-1 | 710.5 | 678.6 | -4.49 |
| | A1-1 | 710.5 | 878.9 | 23.70 |
| | A6-2 | 710.5 | 913.4 | 28.56 |
| | A5-2 | 710.5 | 677.9 | -4.58 |
| | A4-2 | 710.5 | 535.9 | -24.57 |
| | A3-2 | 710.5 | 887.5 | 24.91 |
| | A2-2 | 710.5 | 613.5 | -13.65 |
| | A1-2 | 710.5 | 526.6 | -25.88 |

หมายเหตุ : (-) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ

(+) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าสูงกว่าค่าที่ออกแบบ

| ตัวอย่าง | หน้าตัด | ปริมาณมวลรวมหยาบ (กก./ลบ.ม) | | ค่าความคลาดเคลื่อน (%) |
|---------------|---------|--------------------------------|-----------|---------------------------|
| | | ออกแบบ | วิเคราะห์ | |
| W50S44M2CL10L | A6-1 | 994.8 | 1415.1 | 42.25 |
| | A5-1 | 994.8 | 1497.5 | 50.53 |
| | A4-1 | 994.8 | 1364.6 | 37.17 |
| | A3-1 | 994.8 | 1451.8 | 45.94 |
| | A2-1 | 994.8 | 1460.6 | 46.82 |
| | A1-1 | 994.8 | 1553.6 | 56.17 |
| | A6-2 | 994.8 | 1403.9 | 41.13 |
| | A5-2 | 994.8 | 1468.4 | 47.61 |
| | A4-2 | 994.8 | 1318.6 | 32.55 |
| | A3-2 | 994.8 | 1504.0 | 51.18 |
| | A2-2 | 994.8 | 1554.2 | 56.23 |
| | A1-2 | 994.8 | 1385.3 | 39.25 |
| W40S44M2CL10L | A6-1 | 994.8 | 1296.1 | 30.29 |
| | A5-1 | 994.8 | 987.5 | -0.73 |
| | A4-1 | 994.8 | 1240.9 | 24.74 |
| | A3-1 | 994.8 | 2568.3 | 158.17 |
| | A2-1 | 994.8 | 1259.8 | 26.64 |
| | A1-1 | 994.8 | 1253.9 | 26.05 |
| | A6-2 | 994.8 | 935.8 | -5.93 |
| | A5-2 | 994.8 | 1252.5 | 25.91 |
| | A4-2 | 994.8 | 1416.6 | 42.40 |
| | A3-2 | 994.8 | 965.4 | -2.96 |
| | A2-2 | 994.8 | 1188.9 | 19.51 |
| | A1-2 | 994.8 | 1230.0 | 23.64 |

หมายเหตุ : (-) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ

(+) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าสูงกว่าค่าที่ออกแบบ

| ตัวอย่าง | หน้าตัด | ปริมาณมวลรวมหยาบ (กก./ลบ.ม) | | ค่าความคลาดเคลื่อน (%) |
|---------------|---------|--------------------------------|-----------|---------------------------|
| | | ออกแบบ | วิเคราะห์ | |
| W60S44M1CL10E | A6-1 | 994.8 | 745.5 | -25.05 |
| | A5-1 | 994.8 | 785.2 | -21.06 |
| | A4-1 | 994.8 | 1027.3 | 3.26 |
| | A3-1 | 994.8 | 987.9 | -0.68 |
| | A2-1 | 994.8 | 1165.4 | 17.14 |
| | A1-1 | 994.8 | 1240.3 | 24.67 |
| | A6-2 | 994.8 | 973.7 | -2.11 |
| | A5-2 | 994.8 | 1115.3 | 12.12 |
| | A4-2 | 994.8 | 1072.3 | 7.79 |
| | A3-2 | 994.8 | 1029.8 | 3.52 |
| | A2-2 | 994.8 | 1094.8 | 10.05 |
| | A1-2 | 994.8 | 1246.1 | 25.26 |
| W60S44M1CL10L | A6-1 | 994.8 | 1003.3 | 0.86 |
| | A5-1 | 994.8 | 925.2 | -7.00 |
| | A4-1 | 994.8 | 1073.7 | 7.93 |
| | A3-1 | 994.8 | 1088.0 | 9.37 |
| | A2-1 | 994.8 | 1120.0 | 12.58 |
| | A1-1 | 994.8 | 1161.2 | 16.72 |
| | A6-2 | 994.8 | 743.8 | -25.23 |
| | A5-2 | 994.8 | 898.9 | -9.64 |
| | A4-2 | 994.8 | 1400.9 | 40.82 |
| | A3-2 | 994.80 | 982.4 | -1.25 |
| | A2-2 | 994.80 | 983.7 | -1.12 |
| | A1-2 | 994.80 | 1170.7 | 17.68 |

หมายเหตุ : (-) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ

(+) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าสูงกว่าค่าที่ออกแบบ

| ตัวอย่าง | หน้าตัด | ปริมาณมวลรวมหยาบ (กก./ลบ.ม) | | ค่าความคลาดเคลื่อน (%) |
|---------------|---------|--------------------------------|-----------|---------------------------|
| | | ออกแบบ | วิเคราะห์ | |
| W60S44M2CL10L | A6-1 | 994.8 | 1266.9 | 27.35 |
| | A5-1 | 994.8 | 1248.0 | 25.45 |
| | A4-1 | 994.8 | 1566.7 | 57.49 |
| | A3-1 | 994.8 | 1575.2 | 58.35 |
| | A2-1 | 994.8 | 1484.7 | 49.25 |
| | A1-1 | 994.8 | 1434.2 | 44.17 |
| | A6-2 | 994.8 | 1408.6 | 41.59 |
| | A5-2 | 994.8 | 1427.3 | 43.47 |
| | A4-2 | 994.8 | 1529.6 | 53.75 |
| | A3-2 | 994.8 | 1126.4 | 13.23 |
| | A2-2 | 994.8 | 1508.2 | 51.60 |
| | A1-2 | 994.8 | 1234.6 | 24.10 |

หมายเหตุ : (-) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ

(+) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าสูงกว่าค่าที่ออกแบบ

| ตัวอย่าง | หน้าตัด | ปริมาณมวลรวมหยาบ (กก./ลบ.ม) | | ค่าความคลาดเคลื่อน (%) |
|---------------|---------|--------------------------------|-----------|---------------------------|
| | | ออกแบบ | วิเคราะห์ | |
| W40S44M1CU15L | A4-1 | 994.8 | 964.6 | -3.04 |
| | A3-2 | 994.8 | 951.1 | -4.39 |
| | A2-1 | 994.8 | 992.2 | -0.26 |
| | A1-1 | 994.8 | 987.5 | -0.73 |
| | A4-2 | 994.8 | 946.2 | -4.88 |
| | A3-2 | 994.8 | 1131.1 | 13.70 |
| | A2-2 | 994.8 | 910.3 | -8.50 |
| | A1-2 | 994.8 | 928.3 | -6.69 |
| W50S44M1CU15L | A4-1 | 994.8 | 935.9 | -5.92 |
| | A3-2 | 994.8 | 972.1 | -2.28 |
| | A2-1 | 994.8 | 899.4 | -9.59 |
| | A1-1 | 994.8 | 1040.3 | 4.58 |
| | A4-2 | 994.8 | 986.4 | -0.84 |
| | A3-2 | 994.8 | 1026.7 | 3.20 |
| | A2-2 | 994.8 | 909.6 | -8.57 |
| | A1-2 | 994.8 | 1046.6 | 5.20 |
| W60S44M1CU15L | A4-1 | 994.8 | 1029.0 | 3.44 |
| | A3-2 | 994.8 | 1140.1 | 14.60 |
| | A2-1 | 994.8 | 1116.3 | 12.22 |
| | A1-1 | 994.8 | 1112.2 | 11.81 |
| | A4-2 | 994.8 | 1088.0 | 9.37 |
| | A3-2 | 994.8 | 1103.4 | 10.91 |
| | A2-2 | 994.8 | 966.0 | -2.90 |
| | A1-2 | 994.8 | 1162.5 | 16.86 |

หมายเหตุ : (-) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ

(+) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าสูงกว่าค่าที่ออกแบบ

| ตัวอย่าง | หน้าตัด | ปริมาณมวลรวมหยาบ (กก./ลบ.ม) | | ค่าความคลาดเคลื่อน (%) |
|---------------|---------|--------------------------------|-----------|---------------------------|
| | | ออกแบบ | วิเคราะห์ | |
| W50S44M2CU15L | A4-1 | 994.8 | 862.4 | -13.31 |
| | A3-2 | 994.8 | 1299.9 | 30.66 |
| | A2-1 | 994.8 | 1004.4 | 0.96 |
| | A1-1 | 994.8 | 1264.3 | 27.09 |
| | A4-2 | 994.8 | 1142.6 | 14.86 |
| | A3-2 | 994.8 | 1216.9 | 22.33 |
| | A2-2 | 994.8 | 945.2 | -4.99 |
| | A1-2 | 994.8 | 1280.5 | 28.72 |

หมายเหตุ : (-) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ
 (+) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าสูงกว่าค่าที่ออกแบบ