

การวิเคราะห์ปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีการทางภาพถ่าย

ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์^{1*}thidaporn@eng.buu.ac.th^{1*}¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Received: September 6, 2023 Revised: December 6, 2023 Accepted: February 1, 2024

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีการทางภาพถ่าย เพื่อนำมาช่วยตรวจสอบสัดส่วนผสมของคอนกรีต ขั้นตอนในการศึกษาเริ่มจากการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่แตกต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม., รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. และรูปทรงลูกบาศก์ขนาดกว้าง 15 ซม. ยาว 15 ซม. สูง 15 ซม. โดยใช้มวลรวมหยาบหรือหินคละที่มีขนาดโตสุดของมวลรวม $\frac{3}{4}$ นิ้ว และ $1\frac{1}{2}$ นิ้ว มาผสมคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วนที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.40, 0.50 และ 0.60 โดยน้ำหนัก กำหนดให้อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม (s/a) เท่ากับ 0.44 โดยปริมาตร จากนั้นจึงใช้วิธีการถ่ายภาพหน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีตที่มีขนาดหน้าตัด สัดส่วนผสม และอายุที่แตกต่างกันไป แล้วทำการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบจากภาพถ่าย ผลการวิจัย พบว่า ผลการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งแล้วของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมหยาบขนาดโตสุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ทั้งหน้าตัดทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมมวลรวมหยาบขนาดโตสุด $1\frac{1}{2}$ นิ้ว อย่างมีนัยสำคัญ และขนาดของตัวอย่างหน้าตัดคอนกรีตทรงกระบอกที่แตกต่างกันส่งผลต่อการวิเคราะห์และมีความคลาดเคลื่อนต่างกันเล็กน้อย นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงขึ้นมีแนวโน้มให้ผลความคลาดเคลื่อนที่สูงขึ้นเช่นกัน และตัวอย่างคอนกรีตที่อายุแตกต่างกันให้ผลการวิเคราะห์ที่ไม่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ปริมาณมวลรวมหยาบ วิธีการทางภาพถ่าย

An Analysis of Coarse Aggregate Content of Hardened Concrete using Image Processing

Thidaporn Chuosavasdi^{1*}

thidaporn@eng.buu.ac.th^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

Received: September 6, 2023 Revised: December 6, 2023 Accepted: February 1, 2024

Abstract

The study aims to develop a method for the analysis of coarse aggregate content of hardened concrete using image processing. The developed method was applied to estimate the coarse aggregate content of hardened concrete prepared in the laboratory with a known mix design in order to verify its efficiency. The concrete samples were prepared in three different sizes with two types of cylindrical shapes and one type of cubic shape. Coarse aggregates with maximum sizes of $\frac{3}{4}$ inch and $1\frac{1}{2}$ inches were used in the concrete mixture. The 0.40, 0.50, and 0.60 by weight water-to-cement ratios (w/c), and the 0.44 by volume of fine aggregate-to-aggregate ratio (s/a) were used for mixing. Subsequently, cross-sectional images of the concrete samples with each mix proportion and age were prepared to determine the coarse aggregate content. The analytical result of coarse aggregate content with maximum sizes of $\frac{3}{4}$ inch yields a lower margin of error than $1\frac{1}{2}$ inches. The analytical results indicated that the maximum size of coarse aggregate significantly affects the analysis of the coarse aggregate content of hardened concrete with both cylinder-and cube-shaped of concrete samples. Additionally, the analysis demonstrates that increasing the water-to-cement ratio leads to higher variability in the results indicating that higher water content contributes to increased discrepancies. Moreover, both the age and the different cylindrical size of the concrete sample insignificantly affect analysis of the coarse aggregate concrete of hardened concrete.

Keywords: Hardened concrete, Coarse aggregate content, Image analysis

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความคงทน แข็งแรง มีความสามารถในการต้านทานน้ำและต้านทานไฟที่ดี สามารถก่อสร้างให้มีรูปร่างลักษณะและขนาดได้ตามความต้องการ ราคาไม่สูง จึงนิยมนำมาใช้ในการก่อสร้าง ส่วนผสมของคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งต่อคุณสมบัติของคอนกรีต เมื่อเกิดปัญหาเกี่ยวกับโครงสร้างคอนกรีตจึงอาจจำเป็นต้องทำการพิสูจน์และวิเคราะห์หาสาเหตุซึ่งอาจมาจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพแวดล้อม วัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตไม่ได้คุณภาพ สัดส่วนผสมไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ หรือวิธีการก่อสร้างไม่ได้มาตรฐาน การวิเคราะห์สัดส่วนผสมจึงเป็นหนึ่งข้อมูลสำคัญที่จำเป็นต่อการพิจารณาหาสาเหตุความเสียหายดังกล่าวและสามารถช่วยลดการเกิดความขัดแย้งระหว่างผู้รับเหมากับผู้ผลิตคอนกรีต

มวลรวมหยาบหรือหินเป็นวัสดุหลักชนิดหนึ่ง ที่นำมาใช้ในการทำคอนกรีต ถึงแม้ว่าโดยทั่วไปจะถือว่า หินเป็นวัสดุเฉื่อยไม่มีการทำปฏิกิริยาในคอนกรีตแต่หินก็มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเช่นกัน และมักถูกใช้เป็นส่วนผสมที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักมากที่สุด ในคอนกรีต หินจึงเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญใน สัดส่วนผสมของคอนกรีต ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการ เสนอวิธีการหามวลรวมของคอนกรีตไว้ซึ่งเป็นวิธีการ ทดสอบทางเคมี [1] จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากชนิดของมวลรวมและชนิดของวัสดุประสานที่ใช้ในคอนกรีตมีส่วนประกอบแตกต่างกัน ส่งผลให้การ วิเคราะห์มีความยุ่งยากมากขึ้นหรือเกิดความผิดพลาด ได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อไม่มีข้อมูลของชนิดมวลรวม และวัสดุประสานที่ใช้ หรือบางการศึกษาจะสามารถหา ปริมาณมวลรวมซึ่งประกอบด้วยทั้งมวลรวมหยาบและ มวลรวมละเอียด [2] แต่ไม่ได้แยกหาเฉพาะปริมาณของ มวลรวมละเอียดหรือมวลรวมหยาบ และยังไม่มี งานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับวิธีการหาปริมาณมวล รวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

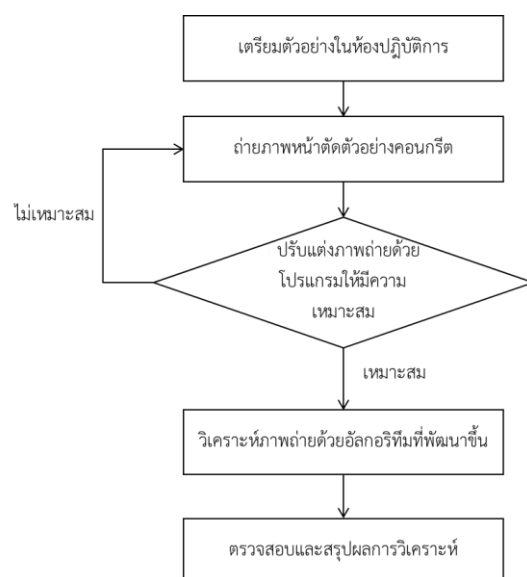
วิธีการวิเคราะห์โดยอาศัยกระบวนการทาง ภาพถ่าย (Image Processing) เป็นวิธีหนึ่งที่นิยม นำมาใช้ในการตรวจสอบเหตุการณ์ต่าง ๆ และมีการ

นำมาใช้ในการตรวจสอบสภาพคอนกรีต เพื่อวิเคราะห์ รอยแตกร้าว [3] ตรวจสอบรอยแตกร้าว [4] ลักษณะ การแตกร้าว [5] การประเมินความเสื่อมสภาพ เนื่องจากการแตกร้าว [6] การประเมินคุณสมบัติของ คอนกรีตทั้งทางด้านกำลัง [7] หรือนำมาใช้ในการ แยกตัวของคอนกรีต [8] และมีการนำไปประยุกต์ เทคนิคนี้ในการศึกษาหรือตรวจสอบคุณสมบัติของมวล รวม เช่น การกระจายตัวของมวลรวม [9] การศึกษา รูปทรงของเม็ดหิน [10] การประมาณปริมาณกองหิน จากภาพ 2 มิติ [11] ประเมินขนาดคละจากภาพถ่าย [12] เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการหาปริมาณมวล รวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีการทาง ภาพถ่าย โดยพิจารณาผลกระทบด้านขนาดใหญ่มากที่สุดของ มวลรวมหยาบ อัตราส่วนน้ำต่อน้ำซีเมนต์ ขนาดหน้า ตัดคอนกรีตที่แตกต่างกัน รูปทรงตัวอย่างที่แตกต่างกัน และที่อายุแตกต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางและพัฒนาไปสู่ การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ต่อไป

2. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาวิธีการหาปริมาณมวลรวมหยาบใน คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว มีแผนการดำเนินการทดสอบดัง แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

2.1 วัสดุและสัดส่วนผสม

วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มวลรวมซึ่งมีขนาดละเอียดอยู่ในช่วงตามมาตรฐาน ASTM C33 [13] โดยมวลรวมละเอียดเป็นทรายหยาบผ่านตะแกรงเบอร์ 4 โมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 2.9 และมวลรวมหยาบเป็นหินปูนขนาดโตสุดแตกต่างกัน 2 ขนาด คือ $\frac{3}{4}$ นิ้ว และ $1\frac{1}{2}$ นิ้ว โมดูลัสความละเอียดเท่า 6.7 และ 7.4 ตามลำดับ อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม (s/a) เท่ากับ 0.44 โดยปริมาตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) คือ 0.40, 0.50 และ 0.60 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบที่ 2 ช่วงอายุ คือ 7 วัน และ 28 วัน สัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

ลำดับ	ตัวอย่าง	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์	ขนาดโตสุดของมวลรวม (นิ้ว)	รูปทรงตัวอย่าง	อายุ (วัน)
1	W40S44M1CL10E	0.40	$\frac{3}{4}$	CL10	7
2	W40S44M1CL15E			CL15	7
3	W40S44M1CL10L			CL10	28
4	W40S44M1CU15L			CU15	28
5	W40S44M2CL10L		$1\frac{1}{2}$	CL10	28
8	W50S44M1CL10E	0.50	$\frac{3}{4}$	CL10	7
9	W50S44M1CL15E			CL15	7
10	W50S44M1CL10L			CL10	28
11	W50S44M1CU15L			CU15	28
12	W50S44M2CL10L		$1\frac{1}{2}$	CL10	28
13	W50S44M2CU15L	0.60	$\frac{3}{4}$	CU15	28
14	W60S44M1CL10E			CL10	7
15	W60S44M1CL15E			CL15	7
16	W60S44M1CL10L			CL10	28
17	W60S44M1CU15L			CU15	28
18	W60S44M2CL10L		$1\frac{1}{2}$	CL10	28

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมตัวอย่างคอนกรีต

ลำดับ	ตัวอย่าง	สัดส่วนผสม (กก/ลบ.ม.)			
		ปูนซีเมนต์	น้ำ	ทราย (SSD)	หิน (SSD)
1	W40S44M1CL10E	436	174	749	995
2	W40S44M1CL15E	436	174	769	1,018
3	W40S44M1CL10L	436	174	749	995

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมตัวอย่างคอนกรีต(ต่อ)

ลำดับ	ตัวอย่าง	สัดส่วนผสม (กก/ลบ.ม.)			
		ปูนซีเมนต์	น้ำ	ทราย (SSD)	หิน (SSD)
4	W40S44M1CU15L	436	174	749	995
5	W40S44M2CL10L	436	174	749	995
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
12	W50S44M2CL10L	382	191	749	995
13	W50S44M2CU15L	382	191	749	995
14	W60S44M1CL10E	340	204	749	995
15	W60S44M1CL15E	340	204	769	1,018
16	W60S44M1CL10L	340	204	749	995
17	W60S44M1CU15L	340	204	749	995
18	W60S44M2CL10L	340	204	749	995

หมายเหตุ : CL10 รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม.

CL15 รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.

CU15 รูปทรงลูกบาศก์ขนาดกว้าง 15 ซม. ยาว 15 ซม. สูง 15 ซม.

M1 ขนาดโตสุดของมวลรวมคือ $\frac{3}{4}$ "

M2 ขนาดโตสุดของมวลรวมคือ $1\frac{1}{2}$ "

S สัดส่วนมวลรวมหยาบต่อมวลรวมทั้งหมด (s/a)

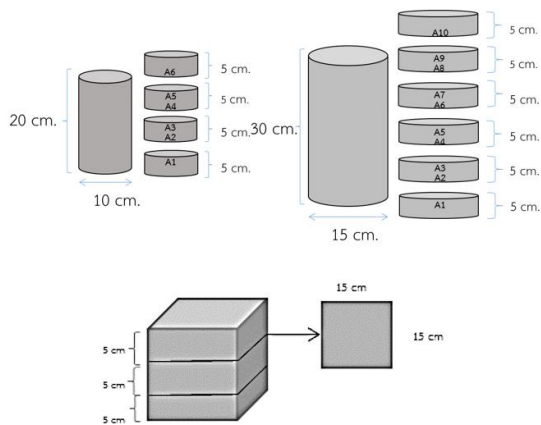
W สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c)

E ตัวอย่างอายุ 7 วัน

L ตัวอย่างอายุ 28 วัน

2.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

ในขั้นตอนนี้เป็นการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่แตกต่างกัน 3 ขนาด ประกอบด้วย 1) ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก (Cylinder) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร 2) ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร และ 3) ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ (Cube) ขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร ทำการบ่มน้ำที่อุณหภูมิห้องจนครบระยะเวลายกกำหนดแล้วจึงนำก้อนตัวอย่างไปตัดให้มีขนาดความหนาประมาณ 5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อนำไปทำการทดสอบวิธีการทางภาพถ่าย (Image Processing) ต่อไป

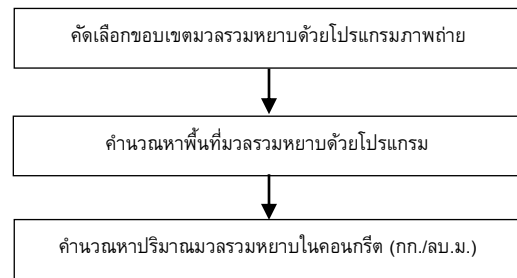


รูปที่ 2 การตัดก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์

เมื่อทำการตัดตัวอย่างคอนกรีตเรียบร้อยแล้ว จึงทำการถ่ายภาพแต่ละหน้าตัดของตัวอย่าง โดยตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร ทำการถ่ายภาพหน้าตัดทั้งหมด 6 รูป ต่อ 1 ก้อนตัวอย่าง และตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร ทำการถ่ายภาพหน้าตัดทั้งหมด 10 รูปภาพต่อ 1 ก้อนตัวอย่าง ส่วนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ทำการถ่ายภาพหน้าตัดทั้งหมด 4 รูปภาพต่อ 1 ก้อนตัวอย่าง ซึ่งหน้าตัดของตัวอย่างที่ผิวด้านล่างสุดและผิวด้านบนสุดไม่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากหน้าตัดตัวอย่างที่ผิวด้านบนและด้านล่างไม่ได้มีการตัดผ่านเม็ดหินที่เรียงกระจายตัวกันในเนื้อคอนกรีต

2.3 การทดสอบด้วยวิธีการทางภาพถ่าย

หลังจากทำการบันทึกภาพถ่ายของหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีตและตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายว่า มีความเหมาะสมแล้ว จึงเข้าสู่กระบวนการทดสอบและคำนวณหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยอัลกอริทึมเทคนิคการประมวลผลภาพถ่ายที่พัฒนาขึ้นไว้แล้ว โดยมีภาพรวมขั้นตอนการคำนวณปริมาณมวลรวมแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบ

ในขั้นตอนการคัดเลือกขอบเขตมวลรวมหยาบด้วยโปรแกรมภาพถ่ายนั้น ภาพที่นำมาใช้ต้องมีความละเอียดและความสว่างของภาพที่เหมาะสม ภาพชัดทั่วทั้งภาพและผิวน้ำตัวอย่างมีความสว่างเสมอกัน เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์กระบวนการทางภาพถ่าย (Image Processing) ในลำดับต่อไป และมีขั้นตอนย่อยดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 นำภาพถ่ายไปปรับแต่งด้วยโปรแกรมทางภาพถ่าย โดยในการปรับแต่งขั้นแรกนั้น ต้องทำการครอบตัดภาพให้มีความกว้างและความยาวเท่ากับก้อนตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4

ขั้นตอนที่ 2 ปรับขนาดของภาพให้มีขนาดสัมพันธ์กับขนาดของก้อนตัวอย่างเพื่อให้สเกลของภาพและก้อนตัวอย่างนั้นตรงกัน

ขั้นตอนที่ 3 ปรับแต่งเพิ่มเติมให้เห็นขอบเขตของหินที่ชัดเจน เพื่อให้ง่ายต่อการเลือกขอบเขตมวลรวมหยาบในก้อนตัวอย่างด้วยโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 5

ขั้นตอนที่ 4 ทำการเลือกขอบเขตมวลรวมหยาบ โดยพิจารณาคัดเลือกอ้างอิงจากขนาดตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ตาม ASTM C33 [13]

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อเลือกมวลรวมหยาบที่ผ่านเกณฑ์ดังกล่าวในภาพจนครบถ้วนแล้ว จะทำการเปลี่ยนรูปภาพเป็นสีขาวดำ ดังแสดงดังรูปที่ 6

ขั้นตอนที่ 6 บันทึกรูปภาพขาวดำเป็นไฟล์รูปภาพสำหรับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณพื้นที่ต่อไป



รูปที่ 4 ภาพถ่ายตัวอย่างก่อนทดสอบ

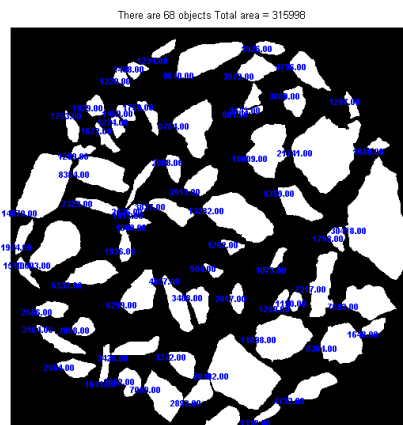


รูปที่ 5 ภาพถ่ายตัวอย่างหลังปรับแต่งเพิ่มเติม



รูปที่ 6 ภาพตัวอย่างขาวดำที่ผ่านการคัดเลือกขอบเขตของมวลรวมหยาบ

ภาพตัวอย่างขาวดำที่ได้ถูกนำมาคำนวณวิเคราะห์หาพื้นที่ของมวลรวมหยาบโดยใช้โปรแกรมที่สามารถคำนวณหาพื้นที่สีขาวจากภาพถ่าย โดยใช้อัลกอริทึมให้ตัวโปรแกรมทำการวิเคราะห์หาพื้นที่พิกเซลเล็ก ๆ สีขาวในภาพถ่ายขาวดำ แล้วจึงแสดงผลลัพธ์ออกมาในรูปของจำนวนพิกเซลของมวลรวมหยาบทั้งหมดในภาพดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ภาพตัวอย่างที่ทำการหาพื้นที่ของมวลรวมหยาบ

การคำนวณหาปริมาณมวลรวมหยาบสามารถคำนวณจากผลสัดส่วนโดยพื้นที่ของมวลรวมหยาบต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบกระบวนการทางภาพถ่าย แล้วจึงทำการแปลงเป็นสัดส่วนโดยปริมาตรของมวลรวมหยาบ โดยวิเคราะห์ตามหลักการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1356 [14] ซึ่งเป็นวิธีการหาปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยวิธีการนับจำนวนจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ (Microscopical Point-count)

หลังจากได้ปริมาตรของมวลรวมหยาบแล้วจึงนำมาคูณด้วยความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบได้เป็นปริมาณมวลรวมหยาบออกมา ผลคำนวณที่ได้แสดงเป็นค่าปริมาณน้ำหนักกิโลกรัมต่อปริมาตรคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$W_G = (A_G/A_C) \times SG_C \times 1000 \quad (1)$$

โดย W_G คือ น้ำหนักมวลรวมหยาบ (kg/m^3)

A_G คือ พื้นที่มวลรวมหยาบบนหน้าตัด (cm^2)

A_C คือ พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างคอนกรีต (cm^2)

SG_G คือ ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ

ในการทดลองนี้ทำการคำนวณทุกภาพหน้าตัดในแต่ละตัวอย่าง จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าการกระจายของข้อมูลทางสถิติด้วยค่ามาตรฐาน (Z-Score) โดยพิจารณาในช่วง ± 1 และตัดข้อมูลที่เกินขอบเขต

±1 ออก ต่อมาจึงนำผลที่พิจารณามาเฉลี่ยได้เป็นผลการคำนวณหาปริมาณมวลรวมหยาบที่ได้จากการวิเคราะห์ และคำนวณร้อยละความคลาดเคลื่อนเทียบกับปริมาณมวลรวมหยาบที่ออกแบบผสมจริง ดังสมการที่ (2)

$$Err\% = (W_{GT} - W_{GD}) \times 100 / W_{GD} \quad (2)$$

โดย W_{GT} คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณมวลรวมหยาบจากการวิเคราะห์ (kg/m^3)

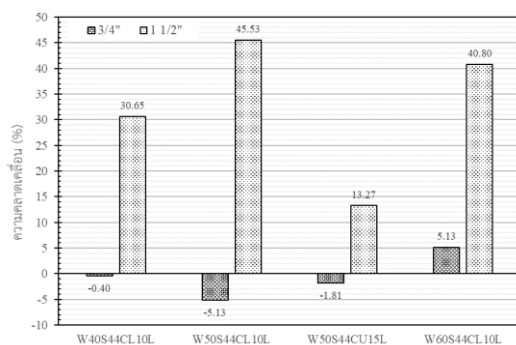
W_{GD} คือ ปริมาณมวลรวมหยาบผสมจริง (kg/m^3)

$Err\%$ คือ ร้อยละความคลาดเคลื่อน

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลกระทบของขนาดใหญ่มากที่สุดของมวลรวมหยาบ

จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบที่ได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันแต่ใช้ขนาดมวลรวมหยาบที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีมวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุด ¾ นิ้วอยู่ในช่วง -5.13% ถึง +5.13% และความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีมวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุด 1½ นิ้วอยู่ในช่วง +13.27% ถึง +45.53%

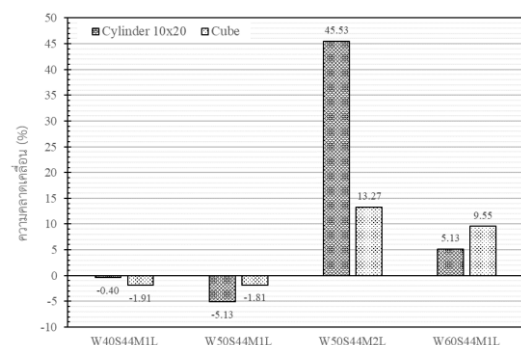


รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่มากที่สุดต่างกัน

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุด ¾ นิ้ว ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อนค่อนข้างต่ำ ส่วนตัวอย่างที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุด 1½ นิ้ว ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อนสูงกว่าในทุกส่วนผสม อาจเป็นผลจากการเตรียมตัวอย่างทดสอบโดยการตัดแบ่งเป็นช่วง ๆ ละ 5 เซนติเมตร ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงขนาดของมวลรวมใหญ่สุด 1½ นิ้ว มากกว่า อีกทั้ง มวลรวมขนาดใหญ่อาจมีผลให้มวลรวมจมสู่ด้านล่างได้ จึงทำให้ภาพหน้าตัดตัวอย่างที่ได้มีแนวโน้มสัดส่วนพื้นที่มวลรวมหยาบมากขึ้น เนื่องจากพื้นที่ของอนุภาคมวลรวมหยาบอาจเกิดพื้นที่ที่ซ้ำซ้อนกัน ดังนั้น ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบมีผลกระทบต่อการหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายน้อยยั้งเห็นได้ชัดและอย่างมีนัยสำคัญ

3.2 ผลกระทบของรูปทรงหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีต

จากรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบที่ได้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันแต่ตัวอย่างมีรูปทรงหน้าตัดที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีรูปทรงหน้าตัดกลมอยู่ในช่วง -5.13% ถึง +45.53% และความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีรูปทรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมอยู่ในช่วง -1.91% ถึง +13.27%

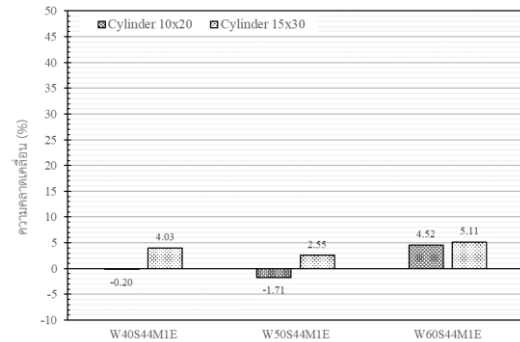


รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่มีรูปทรงหน้าตัดตัวอย่างต่างกัน

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตทั้งแบบรูปทรงหน้าตัดทรงกลมและรูปทรงหน้าตัดทรงสี่เหลี่ยมที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่สุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงไม่เกิน $\pm 10\%$ ส่วนผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่สุด $1\frac{1}{2}$ นิ้ว ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อน $+13.27\%$ และ $+45.53\%$ แสดงให้เห็นว่าเกิดค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่า อาจเนื่องจากผลกระทบของขนาดของมวลรวมใหญ่สุด นอกจากนี้ตัวอย่างหน้าตัดทรงกลมที่ถูกตัดแบ่งเป็นก้อนทดสอบโดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 10x20 เซนติเมตร ทำให้มีจำนวนหน้าตัดตัวอย่างมากกว่าตัวอย่างหน้าตัดทรงสี่เหลี่ยมที่ถูกตัดแบ่งเป็นก้อนทดสอบโดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15 เซนติเมตร จึงอาจทำให้แนวโน้มสัดส่วนพื้นที่มวลรวมหยาบคลาดเคลื่อนสะสมมากขึ้น อย่างไรก็ตาม แนวโน้มความคลาดเคลื่อนของตัวอย่างแบบรูปทรงหน้าตัดกลมและรูปทรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมมีผลความคลาดเคลื่อนที่ไม่สัมพันธ์กันอย่างชัดเจนและอย่างมีนัยสำคัญว่ารูปทรงหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีตมีผลกระทบต่อการหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายนี้

3.3 ผลกระทบของขนาดหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีต

จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบที่ได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันแต่ตัวอย่างมีขนาดหน้าตัดที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีขนาดหน้าตัดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 เซนติเมตร อยู่ในช่วง -1.71% ถึง $+4.52\%$ และความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีขนาดหน้าตัดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 เซนติเมตร อยู่ในช่วง $+2.55\%$ ถึง $+5.11\%$

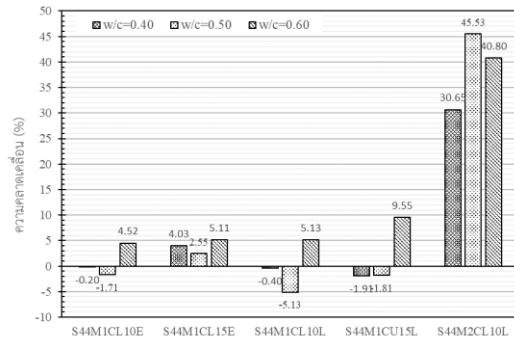


รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่มีขนาดหน้าตัดตัวอย่างต่างกัน

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่มีขนาดหน้าตัดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 เซนติเมตร ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มต่ำกว่าตัวอย่างที่มีขนาดหน้าตัดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 เซนติเมตร ในทุกส่วนผสม ผลการศึกษาในเบื้องต้นพบว่า ขนาดหน้าตัดมีผลกระทบต่อการหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายนี้เพียงเล็กน้อย

3.4 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

จากรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบที่ได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์แตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.50 และ 0.60 อยู่ในช่วง -1.91% ถึง $+30.65\%$, -5.13% ถึง $+45.53\%$ และ $+4.52\%$ ถึง $+40.80\%$ ตามลำดับ

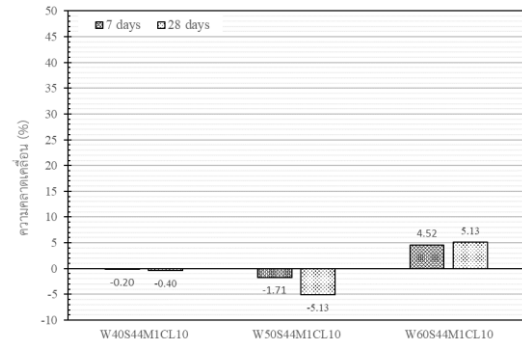


รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่างกัน

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.40 มีผลการคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดเกือบทุกส่วนผสม ในทางกลับกันจะเห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.60 มีผลความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดเกือบทุกส่วนผสม อาจเนื่องจากมีปริมาณน้ำในส่วนผสมสูงคอนกรีตจึงมีความชื้นเหลวมากกว่าทำให้มวลรวมหยาบเกิดการจมตัวลงสู่ด้านล่างได้ง่าย จึงทำให้มีความหนาแน่นของพื้นที่มวลรวมหยาบของชิ้นตัวอย่างส่วนล่างสูง สอดคล้องกับภาพถ่ายหน้าตัดตัวอย่างที่พบว่า บริเวณหน้าตัดด้านล่างจะมีสัดส่วนพื้นที่มวลรวมหยาบมากกว่าด้านบน ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น ดังนั้น อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีผลกระทบต่อ การหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายนี้ อย่างมีนัยสำคัญ

3.5 ผลกระทบของอายุคอนกรีต

จากภาพที่ 12 แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบที่ได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างคอนกรีตที่มีอายุแตกต่างกัน ผลการทดสอบปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณมวลรวมหยาบของตัวอย่างที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน อยู่ในช่วง -1.71% ถึง +4.52% และ -5.13% ถึง +5.13% ตามลำดับ



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่มีอายุต่างกัน

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 7 วัน ได้ผลการทดสอบที่เกิดความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มใกล้เคียงกันกับตัวอย่างที่อายุ 28 วัน ในทุกส่วนผสม เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางภาพถ่ายเป็นการวิเคราะห์ทางกายภาพ โดยคำนวณจากพื้นที่ของหินซึ่งยังคงเดิมเมื่ออายุจะเปลี่ยนไป

4. สรุปผล

จากการศึกษาการหาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีการทางภาพถ่ายสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. การศึกษาผลกระทบของขนาดที่ใหญ่ที่สุดของมวลรวมหยาบที่มีขนาดแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าขนาดที่ใหญ่ที่สุดของมวลรวมหยาบมีผลกระทบต่อ การทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลการศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า การทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีทางภาพถ่ายนี้ เหมาะสำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว

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

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

4. การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่ายนี้อาจเป็นผลมาจากความชื้นเหลือในมวลคอนกรีต โดยผลการศึกษาในงานวิจัยนี้อาจสรุปได้เบื้องต้นว่าการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีทางภาพถ่ายนี้ หากอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์สูงขึ้น จะทำให้ปริมาณมวลรวมหยาบที่หาได้จากวิธีการทางภาพถ่ายนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

5. การศึกษาผลกระทบของอายุของคอนกรีตที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าอายุของคอนกรีตที่ต่างกัน ไม่มีผลกระทบต่อการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธีการทางภาพถ่าย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางการเป็นไปได้ในเบื้องต้นถึงการนำวิธีการทางภาพถ่ายมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว อาจจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมทั้งปัจจัยที่ได้ศึกษาไว้เบื้องต้นนี้และผลกระทบด้านอื่นเพิ่มเติม เช่น ขนาดของหิน ชนิดของหิน สีของหิน เป็นต้น เพื่อให้ครอบคลุมมากขึ้น รวมทั้งพัฒนาให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงาน คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผ่านมหาวิทยาลัยบูรพา งบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2561 สัญญาเลขที่ 131/2561 งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือของผู้ร่วมวิจัยและผู้ช่วยวิจัย นายปิธิพัฒน์ ล้วนธนเศรษฐ์ และนายพันธุ์คุปต์ เปรียบปาน และขอขอบคุณภาคีวิชาชีพวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับทำงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] British standards institution. BS1881:Part24 Methods for analysis of hardened concrete. BSI. 1988.
- [2] Jung MS, Shin MC and Ann KY. Fingerprinting of a concrete mix proportion using the acid neutralisation capacity of concrete matrices. Construction and building materials. 2012; 26(1):65-71.
- [3] Ringot E and Bascoul A. About the analysis of microcracking in concrete. Cement and concrete composites. 2001;23(2-3):261-6.
- [4] Ammouche A, Riss J, Breyse D, and Marchand J. Image analysis for the automated study of microcracks in concrete. Cement and concrete composites. 2001;23(2-3):267-78.
- [5] Valenca J, Dias-da-Costa D, and Julio ENBS. Characterization of concrete cracking during laboratorial tests using image processing. Construction and building materials. 2012; 28(1):607-15.
- [6] Alida M, Saveria M and Stella Eleonora P. Evaluation of the early-age-shrinkage of fiber reinforced concrete (FRC) using image analysis methods. Construction and building materials. 2015;101:596-601.
- [7] Celalettin B, Bekir C, Semsettin K, and Serkan Ismail U. Assessment of concrete compressive strength by image processing technique. Construction and building materials. 2012;37:526-32.
- [8] Barbosa FS, Beaucour AL, Farage MCR and Ortola S. Image processing to the analysis of segregation in lightweight aggregate concretes. Construction and building materials. 2011;25 (8):3375-81.

- [9] Mora CF, Kwan AKH and Chan HC. Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing. *Cement and concrete research*. 1998;28(6):921-32.
- [10] Kwan AKH, Mora CF, and Chan HC. Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing. *Cement and concrete research*. 1999;29(9):1403-10.
- [11] Larry B, Ken C, and John Z. Estimation of limestone particle mass from 2 D images. *Power technology*. 2003;132(2-3):184-9.
- [12] Barbosa FS, Farage MCR, Beaucour AL, and Ortola S. Evaluation of aggregate gradation in lightweight concrete via image analysis. *Construction and building materials*. 2012;29:7-11.
- [13] American Society for Testing and Materials. ASTM C33. Standard specification for concrete aggregates. ASTM International. 2003.
- [14] American Society for Testing and Materials. ASTM C1356 Standard test method for determination of phases in portland cement clinker by microscopical point-count procedure. ASTM International. 1996.