

การเพิ่มความแม่นยำด้วยจำนวนภาพตัดที่ใช้ ในการประมวลผลหา ขนาดคละมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีต

Increasing Accuracy by Number of Sectional Images used in Processing the Aggregate Gradation in Asphalt Concrete

กฤษฎา แสนสมบูรณ์ บุญชัย แสงเพชรงาม ศิวารักษ์ อุ่นศิริไฉย
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการใช้เทคนิคการประมวลผลภาพวิเคราะห์ด้วยวิธีการกัดกร่อนภาพหลายขนาด (Size-based multiple erosion) ซึ่งปรับปรุงมาจากเทคนิค watershed transform ในการหาสัดส่วนขนาดคละของมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ผู้วิจัยได้ใช้วิธีที่ปรับปรุงขึ้นมาวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การค้าง(%retained)ของมวลรวมจากภาพสแกนหน้าตัดชิ้นงานแอสฟัลต์คอนกรีต แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์การค้างด้วยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงในห้องปฏิบัติการ ที่ได้บันทึกไว้ก่อนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ผลทางสถิติชี้ให้เห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์การค้างที่ได้จากการประมวลผลภาพไม่มีความแตกต่างกับค่าเปอร์เซ็นต์การค้างด้วยวิธีการร่อนตะแกรง นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้วิเคราะห์อิทธิพลของขนาดพื้นที่ภาพหน้าตัดและจำนวนภาพหน้าตัดที่ใช้ในการวิเคราะห์ และพบว่าการใช้ขนาดพื้นที่ภาพหน้าตัดและจำนวนภาพหน้าตัดที่มากขึ้น จะช่วยเพิ่มความถูกต้องแม่นยำของผลลัพธ์ค่าเปอร์เซ็นต์การค้างของมวลรวมได้ดีมากขึ้น

คำสำคัญ : แอสฟัลต์คอนกรีต การประมวลผลภาพ ขนาดคละ

Abstract

This paper presents the application of image processing (IP) technique using size-based multiple erosion method which is derived from the watershed transform method to determine the percent retained of aggregates in asphalt concrete. The method uses scanned cross-sectional images of asphalt concrete specimens as the input and yields the percent retained on standard aggregate sizes as the results. The statistical analysis reveals that the percent retained results obtained by the IP method are not different from those obtained by sieving method in laboratory. Moreover, the statistical analysis shows that the bigger image area and the more number of sectional images can reduce the deviation of the percent retained results in reference to the sieving method.

Keywords : Asphalt concrete, image processing, aggregate gradation, sieve analysis

1. บทนำ

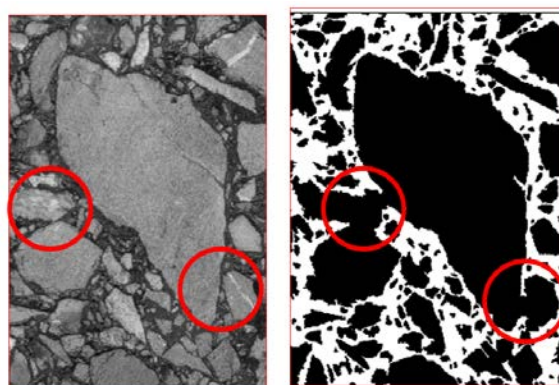
การกระจายตัวของหินขนาดต่างๆ หรือที่เรียกว่าขนาดคลณะนั้นเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในงานวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะงานวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อนที่ใช้ปูผิวถนนลาดยาง เพราะขนาดคลณะแต่ละแบบสามารถรับน้ำหนักได้แตกต่างกัน ขนาดคลณะที่ดีจะสามารถรับแรงได้ดีกว่าซึ่งจะช่วยให้ถนนทนทานมากขึ้น [1]

การหาขนาดคลณะของวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อน จึงมักถูกใช้ในการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างผิวทาง ซึ่งวิธีทดสอบปกติต้องนำวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อนมาสกัดแอสฟัลต์ออกจากมวลรวมก่อนแล้วจึงนำมวลรวมไปทดสอบวิเคราะห์ขนาดคลณะด้วยการคัดแยกด้วยตะแกรง [2,3] ทว่าข้อจำกัดในการทดสอบคือขั้นตอนทั้งหมดใช้เวลารวมนานหลายวัน ดังนั้นที่ผ่านมาได้มีหลายงานวิจัยริเริ่มใช้การประมวลผลภาพ (image processing) มาช่วยหาขนาดคลณะของมวลรวม เพื่อลดระยะเวลาให้เหลือน้อยลงด้วยการประมวลผลภาพสองมิติ [4-10] และการประมวลผลภาพสามมิติ [11-16] การประมวลผลภาพสามมิติ สามารถให้ผลลัพธ์มิติขนาดรูปทรงของเม็ดหินในวัสดุที่ครบทั้งความกว้าง ความยาว ความหนา ทว่าต้องการเครื่องมือพิเศษเช่น X-Ray Computerized Tomography ในการสแกนชิ้นงานวัสดุ ส่วนการประมวลผลภาพสองมิติ มีความสะดวกมากกว่า เพราะต้องการเพียงภาพถ่ายหรือภาพสแกนหน้าตัดวัสดุ แต่ได้ผลลัพธ์เพียงความกว้างและความยาวของเม็ดหินจากรูปตัดวัสดุ การใช้วิธีประมวลผลภาพสองมิติวิเคราะห์หาขนาดคลณะของมวลรวมจึงอาจไม่ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง

ในงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษาว่า การหาขนาดคลณะมวลรวมด้วยวิธีประมวลผลภาพสองมิติ จะสามารถให้ความถูกต้องแม่นยำของผลลัพธ์ ที่เพียงพอหรือไม่ โดยใช้การทดลองปรับเปลี่ยนจำนวนภาพหน้าตัดที่ใช้วิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์การค้าง(%retained)ที่ได้จากการประมวลผลภาพ มาเปรียบเทียบกับ เปอร์เซ็นต์การค้างบนตะแกรงจากวิธีร่อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการ

2. เทคนิคการกัดกร่อนภาพหลายขนาด

หลักการหาขนาดคลณะด้วยการประมวลผลภาพถ่ายสองมิติ คือการนำภาพหน้าตัดของแอสฟัลต์คอนกรีตมาแยกพิกเซล(pixels)ในภาพออกเป็นสองส่วน โดยกำหนดให้ส่วนหนึ่งเป็นสีขาว และอีกส่วนหนึ่งเป็นสีดำ ส่วนสีดำคือส่วนของมวลรวมละเอียดขนาดเล็กที่ถูกเคลือบด้วยแอสฟัลต์(mastic) และส่วนสีขาวคือหน้าตัดของมวลรวมหยาบขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ แล้วใช้เทคนิค watershed transform (WT) [18] ซึ่งนิยมใช้กำหนดขอบเขตของภาพมวลรวมหยาบ และนำภาพมวลรวมหยาบที่ได้ไปคำนวณหาความกว้าง ความยาว และพื้นที่ของหิน ซึ่งทำให้สามารถคำนวณหาสัดส่วนน้ำหนักของหินขนาดต่างๆ ได้ ทว่าเทคนิค watershed transform ยังให้ผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อนซึ่งเกิดจากการนับภาพก้อนหินหลายๆก้อนที่อยู่ประชิดกันเป็นก้อนเดียวกัน ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 1

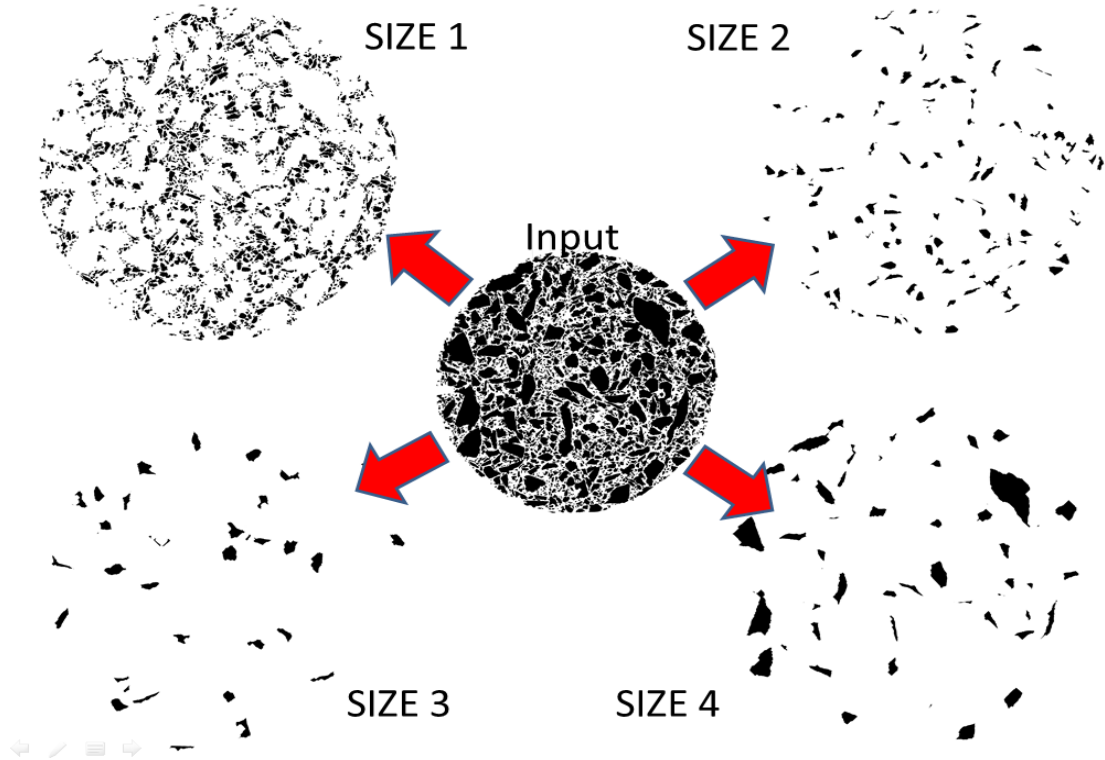


รูปที่ 1 ปัญหาภาพมวลรวมอยู่ติดกัน

ในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว ด้วยการนำเทคนิคการกัดกร่อนภาพหลายขนาด (Size-Based Multiple erosion) [17] เทคนิคนี้นำภาพหลังจากที่ผ่านขั้นตอน watershed transform มาแยกภาพมวลรวมออกเป็น 4 กลุ่มตามขนาด ด้วยฟังก์ชัน shape logic ในโปรแกรม ImageJ [19] ขนาดพื้นที่ของมวลรวมทั้ง 4 ขนาดมีดังนี้ 1-10,000 pixel , 10,001-30,000 pixel , 30,001-50,000 pixel และ 50,001 ขึ้นไป ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 และนำภาพมวลรวมแต่ละขนาดมาผ่านวิธีกัดกร่อน (morphological erosion) ที่ขนาดต่างๆ กัน โดยใช้หลักที่ว่ามวลรวมที่ขนาดใหญ่กว่า จะใช้จำนวน pixels ในการ

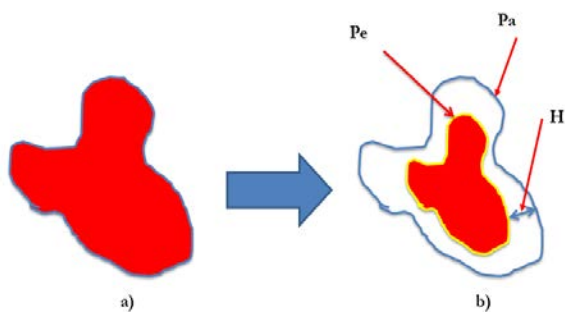
กัลดกร่อนมากกว่า โดยผู้วิจัยได้เลือกค่าของการกัลดกร่อนของมวลรวมแต่ละขนาดไว้ดังนี้ 5 pixels สำหรับมวลรวมที่มีขนาด 1-10,000 pixels 20 pixels สำหรับมวลรวมที่มีขนาด 10,001-30,000 pixels 30 pixels สำหรับมวลรวมที่

ขนาด 30,001-50,000 pixels และ 60 pixels สำหรับมวลรวมที่มีขนาด 50,001 pixels ขึ้นไป และนำภาพที่ผ่านการกัลดกร่อนมาคำนวณวิเคราะห์หาขนาดต่อไปดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การแยกภาพมวลรวมออกเป็นสี่ขนาด แล้วกัลดกร่อนตามขนาดของมวลรวม

แต่ในเทคนิคนี้มีการสูญเสียพื้นที่ของมวลรวมบางส่วนไป ในระหว่างการกัลดกร่อนภาพจึงต้องมีการคำนวณปรับแก้พื้นที่ที่ภาพมวลรวมดังแสดงในรูปที่ 3 โดยคำนวณตามสมการที่ (1) - (4)



รูปที่ 3 การปรับแก้ขนาดขนาดที่ถูกกัลดกร่อน

$$P_c = 2\pi R_c \tag{1}$$

$$R_a = R_c + H \tag{2}$$

$$P_a = 2\pi R_a \tag{3}$$

$$A_a = A_c + P_a H \tag{4}$$

โดยที่

P_c คือเส้นรอบรูปของภาพมวลรวมที่ถูกกัลดกร่อน

R_c คือรัศมีเทียบเท่า (equivalent radius) ของภาพมวลรวมที่ถูกกัลดกร่อน

H คือความหนาที่กัลดกร่อนหรือจำนวน pixels คูณด้วยค่า mm/pixel

R_a คือรัศมีเทียบเท่าปรับแก้ของภาพมวลรวม

P_a คือเส้นรอบรูปปรับแก้ของภาพมวลรวม

A_c คือพื้นที่ที่ภาพมวลรวมที่ถูกกัลดกร่อน

A_a คือพื้นที่ที่ภาพมวลรวมที่ปรับแก้

3. การทดลองเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การค้ำบน

ตะแกรง

ในขั้นตอนการทดลองตามวัตถุประสงค์การศึกษา ผู้วิจัย ได้ผลิตชิ้นงานแอสฟัลต์คอนกรีตทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร

จำนวน 3 ก่อนตัวอย่าง ด้วยเครื่องบดอัดโรตารีเพื่อควบคุมความหนาแน่นให้เท่ากัน แล้วนำชิ้นงานมาตัดด้วยใบเลื่อยและสแกนภาพรอยตัดจำนวน 8 ภาพต่อก้อนตัวอย่าง ขนาดคละมวลรวมและปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้ผลิตชิ้นงานได้ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดการออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาเซลมาแล้วในงานวิจัยที่ผ่านมา[20] ซึ่งมีขนาดคละแบบ dense graded ตามกราฟขนาดคละในรูปที่ 4 และใช้แอสฟัลต์ 5.5% โดยน้ำหนักของส่วนผสม

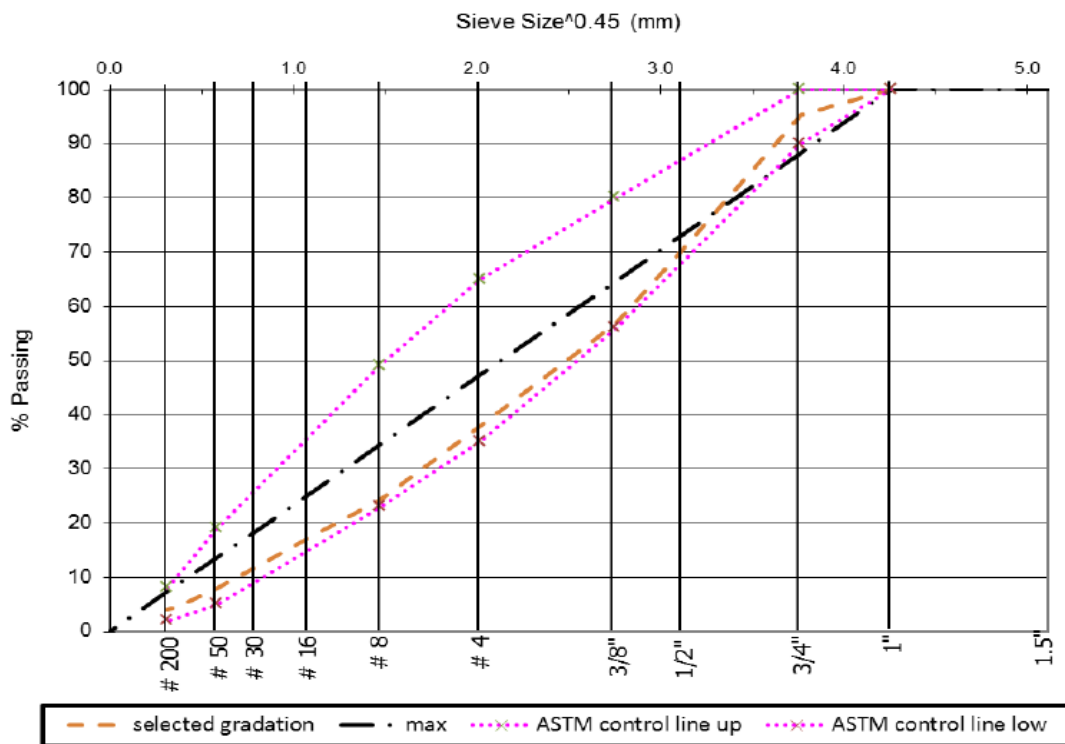
ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุมวลรวมที่ใช้ผลิตชิ้นงาน ผู้วิจัยเตรียมมวลรวมตามขนาดคละที่กำหนดโดยผ่านการวิเคราะห์ขนาดคละด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงจำนวน 3 ชุด เพื่อนำผลขนาดคละด้วยวิธีร่อนตะแกรงจริงมาเปรียบเทียบกับสถิติกับผลขนาดคละจากวิธีประมวลผลภาพ จากนั้นนำภาพตัดมาประมวลผลภาพสองมิติด้วยวิธีการกักร่อนภาพตามขนาด และคำนวณข้อมูลค้ำมิติ

ขนาดของภาพมวลรวมที่อยู่ในหนึ่งภาพตัดชิ้นงาน อันได้แก่ จำนวนก้อน เส้นรอบรูป ความกว้าง ความยาว และพื้นที่ของภาพมวลรวมแต่ละก้อน [17]

การคำนวณขนาดคละ ใช้ความกว้างของภาพมวลรวมระบุขนาดตะแกรงที่ค้ำ และคำนวณเปอร์เซ็นต์การค้ำ (%Retained) ของขนาดตะแกรงที่ค้ำ โดยใช้พื้นที่ภาพมวลรวมมาคำนวณตามสมการที่ (5)

$$\% \text{Retained by area} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{A_{\text{total}}} \times 100 \quad (5)$$

โดยที่ a_i คือพื้นที่ภาพมวลรวมก้อนที่ i ที่ค้ำบนขนาดตะแกรง $\sum_{i=1}^n a_i$ คือผลรวมของพื้นที่มวลรวมทุกก้อนที่ค้ำบนขนาดตะแกรง A_{total} คือพื้นที่ภาพตัดชิ้นงาน



รูปที่ 4 กราฟแสดงขนาดคละของก้อนตัวอย่างมวลรวมแอสฟัลต์คอนกรีต[20]

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

สำหรับการวิเคราะห์ผลเปอร์เซ็นต์การค้ำ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ไว้เป็นสามประเด็น คือ

- 1) เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างวิธีประมวลผลภาพกับวิธีการร่อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการ
- 2) วิเคราะห์อิทธิพลของพื้นที่หน้าตัดว่าส่งผลต่อการคำนวณเปอร์เซ็นต์การค้ำ หรือไม่

3) วิเคราะห์อิทธิพลของจำนวนหน้าตัดว่าส่งผลต่อการคำนวณเปอร์เซ็นต์การค้ำหรือไม่

4.1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างวิธีประมวลผล

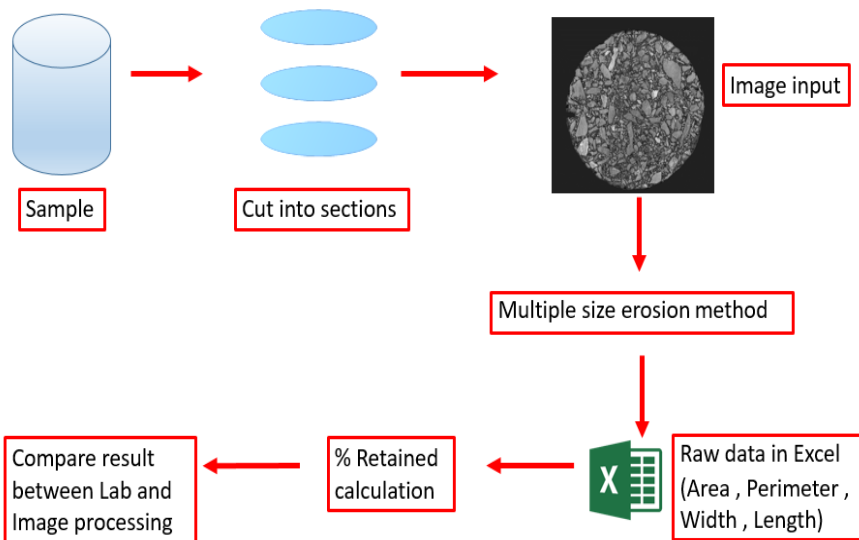
ภาพกับวิธีร่อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการ

ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้นำค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร่อนตะแกรงของก้อนตัวอย่างทั้งสามก้อนจากห้องปฏิบัติการ มาเทียบกับค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การค้ำที่วิเคราะห์จากหน้าตัดของก้อนตัวอย่างทั้งหมดสามก้อน โดยใช้ 8 หน้าตัดในหนึ่งก้อนตัวอย่าง ทำให้ได้ภาพหน้าตัดทั้งหมด 24 หน้าตัด ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำบน

ตะแกรงของก้อนตัวอย่างแต่ละก้อนจากห้องปฏิบัติการ ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปอร์เซนต์การค้ำที่ได้จากการร่อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการของแต่ละก้อนตัวอย่าง

Sieve size	Sample 1	Sample 2	Sample 3
1/2in	7.73	7.66	5.61
3/8in	6.36	8.12	6.89
4#	17.80	17.82	20.50
8#	20.41	18.73	18.38



รูปที่ 5 กระบวนการหาเปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีประมวลผลภาพ

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าของเปอร์เซ็นต์การค้ำบนตะแกรงระหว่างการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการคำนวณด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ โดยใช้ก้อนตัวอย่างสามก้อน โดยมีสมมติฐานว่างในที่นี้คือค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร่อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการมีค่าเท่ากับค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำที่คำนวณด้วยวิธีประมวลผลภาพ

ผลการวิเคราะห์ได้ค่าดังนี้ สำหรับมวลรวมขนาด 1/2 นิ้ว 3/8 นิ้ว เบอร์ 4# และเบอร์ 8# มีค่า p-value มากกว่า

4.2 วิเคราะห์อิทธิพลของขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในการคำนวณ

ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร่อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการกับเปอร์เซ็นต์การค้ำ

0.05 ทำให้ยอมรับสมมติฐานว่าง ซึ่งหมายความว่าค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร่อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการไม่มีความแตกต่างกันกับค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำที่คำนวณด้วยวิธีประมวลผลภาพในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากผลการวิเคราะห์ในส่วนนี้จึงสรุปได้ว่าเปอร์เซ็นต์การค้ำที่วิเคราะห์จากการประมวลผลภาพหน้าตัดไม่มีความแตกต่างกับเปอร์เซ็นต์การค้ำตะแกรงที่คำนวณได้จากสามก้อนตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

ที่คำนวณจากการประมวลผลภาพ โดยใช้ภาพหน้าตัดขนาด 60x60 mm ที่มีพื้นที่ 3,600 mm² กับภาพหน้าตัดวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm คิดเป็นพื้นที่ 7,854 mm² ทำให้ผลต่างจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการน้อยที่สุด ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าหน้า

ตัดขนาด 60x60 mm ให้ผลของค่าความแตกต่างกำลังสองเป็น 152 ส่วนหน้าตัดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm ให้ผลของค่าความแตกต่างกำลังสอง

เป็น 30 จึงสรุปได้ว่า การใช้พื้นที่ขนาดใหญ่กว่าในการคำนวณให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับวิธีร้อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการได้ดีกว่า

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างสำหรับ 4 ขนาดตะแกรง ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยการร้อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการและ เปอร์เซ็นต์การค้ำที่คำนวณด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ

1/2 inch			3/8 inch			#4			#8		
	LAB	IMAGE		LAB	IMAGE		LAB	IMAGE		LAB	IMAGE
Mean	7.00	7.88	Mean	7.12	5.87	Mean	18.7	16.39	Mean	19.17	17.97
Variance	1.45	37.09	Variance	0.82	7.05	Variance	2.39	14.93	Variance	1.18	6.45
Observations	3	24	Observations	3	24	Observations	3	24	Observations	3	24
Hypothesized Mean	0		Hypothesized Mean	0		Hypothesized Mean	0		Hypothesized Mean	0	
df	19		df	8		df	6		df	5	
t Stat	-0.62		t Stat	1.66		t Stat	1.94		t Stat	1.47	
P(T<=t) one-tail	0.27		P(T<=t) one-tail	0.07		P(T<=t) one-tail	0.05		P(T<=t) one-tail	0.1	
t Critical one-tail	1.73		t Critical one-tail	1.86		t Critical one-tail	1.94		t Critical one-tail	2.02	
P(T<=t) two-tail	0.54		P(T<=t) two-tail	0.14		P(T<=t) two-tail	0.1		P(T<=t) two-tail	0.2	
t Critical two-tail	2.09		t Critical two-tail	2.31		t Critical two-tail	2.45		t Critical two-tail	2.57	

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร้อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการและวิธีประมวลผลภาพที่ใช้ภาพสองขนาดหน้าตัด

Sieve size	60x60 mm ²			Diameter 100 mm			
	IMAGE	LAB	ERROR ²	IMAGE	LAB	ERROR ²	
1/2in	4.80	7.73	8.50	4.10	7.73	12.90	
3/8in	0.40	6.36	35.60	5.00	6.36	2.00	
#4	9.60	17.8	67.20	13.90	17.8	15.10	
#8	14.00	20.41	41.30	19.60	20.41	0.60	
SUM SQUARE ERROR			152.6	SUM SQUARE ERROR			30.5

60x60 mm² หมายถึง พื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด 60mm x 60 mm

Diameter 100 mm หมายถึง ภาพหน้าตัดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm

IMAGE หมายถึง เปอร์เซ็นต์การค้ำเฉลี่ยที่คำนวณได้จากการประมวลผลภาพ

LAB หมายถึง เปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร้อนตะแกรงจากตัวอย่างก้อนที่ 1

4.3 วิเคราะห์อิทธิพลของจำนวนหน้าตัดที่ใช้ในการประมวลผลภาพ

สำหรับการวิเคราะห์อิทธิพลของจำนวนพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในการประมวลผลภาพ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยการประมวลผลภาพโดยใช้ภาพสองหน้าตัด สี่หน้าตัด และหกหน้าตัด เปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร้อนตะแกรงโดยใช้ค่าความแตกต่างกำลังสองของค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำ (Square Error) เป็นตัวเปรียบเทียบ ผลการ

เปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 4 พบว่าการใช้ภาพจำนวนสองหน้าตัดมีค่า Sum Square Error เท่ากับ 54 จำนวนสี่หน้าตัดมีค่าเท่ากับ 18 และจำนวนหกหน้าตัดมีค่าเท่ากับ 15 จึงกล่าวได้ว่าการใช้ภาพหน้าตัดจำนวนมากขึ้นในการประมวลผลภาพทำให้ได้ผลค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำใกล้เคียงกับวิธีร้อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการมากขึ้น

5.สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์หาขนาดคละของมวลรวมในวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตโดยใช้วิธีประมวลผลภาพหน้าตัดสองมิติของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยเทคนิคการกัดกร่อนภาพหลายขนาด ซึ่งสามารถให้ผลลัพธ์เป็นค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำตามขนาดเบอร์ตะแกรงมาตรฐาน ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร่อนตะแกรงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นวิธีหาขนาดคละดั้งเดิมพบว่า เทคนิคการประมวลผลภาพที่ใช้ในงานวิจัยสามารถให้ค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำของมวลรวมได้ไม่แตกต่างจากการหาค่าเปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร่อนตะแกรง นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบว่าขนาดพื้นที่ภาพหน้าตัด และจำนวนภาพหน้าตัดที่ใช้ประมวลผลภาพ ยังส่งผลต่อความแม่นยำของผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การค้ำ โดยขนาดพื้นที่ภาพหน้าตัดที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีความแม่นยำที่ดีกว่า และจำนวน

ภาพหน้าตัดที่มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การค้ำที่แม่นยำมากขึ้น ดังนั้นจึงน่าจะมีความเป็นไปได้ที่จะนำเทคนิคการประมวลผลภาพมาใช้หาขนาดคละของมวลรวมต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณในการสนับสนุนทุนวิจัยจาก “ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ “ทุนโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม(พวอ.)” สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) และขอขอบคุณ คุณสมพงษ์ ขำแจ้ง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในงานห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบค่าผลต่างกำลังสองของเปอร์เซ็นต์การค้ำตะแกรงแบบสองหน้าตัดสี่หน้าตัดและหกหน้าตัด

SIZE	2sect	4sect	6sect	LAB	2sect_error ²	4sect_error ²	6sect_error ²
1/2in	8.30	6.50	6.00	5.61	7.20	0.80	0.20
3/8in	7.40	7.10	6.40	6.89	0.20	0.10	0.20
#4	13.80	16.40	16.70	20.50	44.90	16.80	14.70
#8	16.90	17.90	18.00	18.38	2.30	0.30	0.10
SUM SQUARE ERROR					54.60	18.00	15.20

SIZE	หมายถึง	ขนาดตะแกรงที่พิจารณา
2sect	หมายถึง	เปอร์เซ็นต์การค้ำจากการวิเคราะห์ด้วยภาพจำนวนสองหน้าตัด
4sect	หมายถึง	เปอร์เซ็นต์การค้ำจากการวิเคราะห์ด้วยภาพจำนวนสี่หน้าตัด
6sect	หมายถึง	เปอร์เซ็นต์การค้ำจากการวิเคราะห์ด้วยภาพจำนวนหกหน้าตัด
LAB	หมายถึง	เปอร์เซ็นต์การค้ำด้วยวิธีร่อนตะแกรงจากตัวอย่างอย่างก่อนที่ 3
2sect_error ²	หมายถึง	ผลต่างกำลังสองของเปอร์เซ็นต์การค้ำตะแกรงที่ได้จากสองหน้าตัดและห้องปฏิบัติการ
4sect_error ²	หมายถึง	ผลต่างกำลังสองของเปอร์เซ็นต์การค้ำตะแกรงที่ได้จากสี่หน้าตัดและห้องปฏิบัติการ
6sect_error	หมายถึง	ผลต่างกำลังสองของเปอร์เซ็นต์การค้ำตะแกรงที่ได้จากหกหน้าตัดและห้องปฏิบัติการ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] F.L. Roberts, P.S. Kandhal, E.R. Brown, D.Y. Lee, and T.W. Kennedy, “Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction, 2nd ed.” National Asphalt Pavement Association Education Foundation. Lanham, MD., 1996, pp. 121-172.
- [2] ASTM D2172 / D2172M-11, “Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixtures”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [3] ASTM C136 / C136M-14, “Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [4] A.K.H. Kwan, C.F. Mora and H.C. Chan, “Particle shape analysis of coarse aggregate using digital

- image processing,” *Cement and Concrete Research*, pp. 1403–1410, May, 1999.
- [5] K. Chen, J. Zaniewski, and P. Zhao. "2D Image based sieving for particle aggregate gradation." *Journal of Electronics (China)* 25.2 (2008): 277-282.
- [6] L. Bruno, G. Parla and . Celauro, “Image analysis for detecting aggregate gradation in asphalt mixture from planar images,” Elsevier, Italy, pp. 21-30 Abbrev. October, 2011.
- [7] F.S. Barbosa, M.C.R. Farage a, A.-L. Beaucour and S. Ortola, “Evaluation of aggregate gradation in lightweight concrete via image processing,” *Construction and Building Materials*, Elsevier, Brazil, pp. 7-11, November, 2011.
- [8] I. S. Bessa,. C. Branco and J. B. Soares, “Evaluation of different digital image processing software for aggregates and hot mix asphalt characterizations,” *Construction and Building Materials*, pp. 370-378, September, 2012.
- [9] M. Vadood, M. S. Johari and A. R. Rahaei, “Introducing a simple method to determine aggregate gradation of hot mix asphalt using image processing,” *International Journal of Pavement Engineering*, Iran, vol. 15, no. 2, pp. 142–150, 2013
- [10] K. H. Moon, A. C. Falchetto, M. P. Wistuba and J. H. Jeong, “Analyzing Aggregate Size Distribution of Asphalt Mixtures Using Simple 2D Digital Image Processing Techniques,” *Arab J Sci Eng*, February, 2015.
- [11] D. L. Sahagian and A. A. Proussevitch, “3D particle size distributions from 2D observations: stereology for natural applications,” *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, pp. 173–196, April, 1998.
- [12] J. C. Russ, “Practical Stereology 2nd Edition, Plenum Press, New York, NY, 1999
- [13] N. Chawla, R.S. Sidhu and V.V. Ganesh, “Three-dimensional visualization and microstructure-based modeling of deformation in particle-reinforced composites,” Elsevier, Arizona state university, Tempe, pp. 1541-1548, Abbrev. November, 2005.
- [14] Z. You , S. Adhikari and M. E. Kutay, “Dynamic modulus simulation of the asphalt concrete using the X-ray computed tomography images,” *Materials and Structures*, Elsevier, pp. 617-628, July, 2008.
- [15] A. Bhasin, A. Izadi and S. Bedgaker, “Three dimensional distribution of the mastic in asphalt composites,” *Construction and Building Materials*, Elsevier, May, 2011.
- [16] Q. Guo, Y. Bian, L. Li, Y. Jiao, J. Tao and C. Xiang, “Stereological estimation of aggregate gradation using digital image of asphalt mixture,” *Construction and Building Materials*, Elsevier, China, pp. 458–466, July, 2015.
- [17] K. Seansomboon, “Analysis of Dimensional Properties of Asphalt Concrete Using Image Processing Technique,” M.Eng. thesis, Civil Eng. Dept., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2015.
- [18] H. M. Zelelew, A. T. Papagiannakis, and E. Masad “Application of digital image processing techniques for asphalt concrete mixture images,” In *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, pp. 119-24. , October, 2008.
- [19] M. D. Abràmoff, P. J. Magalhães and S. J. Ram “Image processing with ImageJ,” *Biophotonics international*, pp. 36-42. ,2004.
- [20] S. Unsiwilai, “Influences of Crumb Rubber Size in Aggregate Blend on Deformation Resistance Properties of Hot Mix Asphalt,” M.Eng. thesis, Civil Eng. Dept., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2013.