

การศึกษามุมการกองของหินโรยทางที่ผสมเศษยางรถยนต์: การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างหินโรยทางใหม่ และหินโรยทางใช้งานแล้ว

A study on the angle of repose of railway ballast mixed with rubber tyre fragments:

A comparative analysis between new and used railway ballast

ชัยณรงค์ ทรงศิริวงศ์¹ เฉษฐา สีตะวัน² ภาวิณี ธรรมอักษร³ จิรภัทร ปัญญาวิชา⁴ ปาลินี สุมิตสารศรี^{5,*} ธเนศ ทองเดชศรี⁶ และ สุริยาวัธ ประอ้าย⁷

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

^{5,6,7} หน่วยวิจัย RS2GH คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: palinee.su@up.ac.th

บทคัดย่อ

หินโรยทางเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบทางรถไฟที่มีข้อดีด้านต้นทุนต่ำ ระยะเวลาก่อสร้างสั้น และประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือน อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของความเร็วรถไฟในปัจจุบันส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของหินโรยทางเร็วขึ้น ซึ่งนำไปสู่ปัญหาด้านเสถียรภาพและความปลอดภัย การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาด้วยการนำเศษยางรถยนต์มาเป็นวัสดุผสมในหินโรยทาง เพื่อยืดอายุการใช้งานและเพิ่มประสิทธิภาพ โดยการทดสอบมุมการกองของหินโรยทางซึ่งสะท้อนถึงมุมแรงเสียดทานภายใน (angle of repose) เป็นตัวบ่งชี้สำคัญที่แสดงถึงความสามารถในการต้านแรงเฉือนของหินโรยทาง บทความนี้จึงนำเสนอการศึกษามุมการกองของหินโรยทางที่ผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนและรูปทรงที่แตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบระหว่างหินโรยทางใหม่และหินโรยทางที่ผ่านการใช้งานแล้ว ซึ่งผ่านการทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอ (Los Angeles Abrasion Test) ที่ 500 และ 1,000 รอบ เศษยางรถยนต์ถูกจัดเตรียมใน 3 รูปแบบ ได้แก่ ทรงลูกบาศก์ (cube) ทรงแท่ง (rod) และทรงแผ่น (disk) การทดสอบมุมการกองดำเนินการโดยใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 ซม. และความสูง 90 ซม. ท่อดังกล่าวถูกยกขึ้นด้วยเครน และสแกนกองหิน โดยใช้เครื่องสแกน FARO Focus 3D ผลการศึกษพบว่า มุมการกองของหินโรยทางใหม่มีค่ามากกว่าหินโรยทางที่ใช้แล้ว นอกจากนี้ เศษยางรถยนต์ทรงลูกบาศก์ส่งผลให้มุมลาดเอียงมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือทรงแท่ง และทรงแผ่นตามลำดับ และเมื่ออัตราส่วนผสมของยางมากกว่า 15% มุมการกองของหินโรยทางจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด

คำสำคัญ: มุมการกอง, เศษยางรถยนต์, หินโรยทางที่ใช้แล้ว

Abstract

Ballast is an important component of railway system with the advantages of low cost, short construction period and

vibration reduction efficiency. However, the current increase in train speed has resulted in the accelerated deterioration of ballast, which leads to stability and safety problems. This study focuses on solving this problem by using scrap tires as a composite material in ballast to extend its service life and improve its efficiency. The ballast angle of repose test, which reflects the angle of internal friction, is an important indicator of the ballast's shear resistance. This paper presents a study on the angle of repose of ballast mixed with scrap tires in different proportions and shapes, comparing them with fresh ballast and used ballast, which were subjected to abrasion resistance tests (Los Angeles Abrasion Test) at 500 and 1,000 cycles. The scrap tires were prepared in three shapes: cube, rod, and disk. The pile angle test was carried out using PVC pipes with an inner diameter of 30 cm and a height of 90 cm. The pipes were lifted by a crane and the piles were scanned using a FARO Focus 3D scanner. The results showed that: The angle of repose of fresh ballast is higher than that of used ballast. In addition, the cube shape of scrap tires results in the highest slope angle, followed by the rod shape and the disk shape respectively. When the rubber ratio is more than 15%, the angle of repose of ballast is significantly reduced.

Keywords: Angle of Repose, Scrap Tires, Used Ballast

1. ที่มาและความสำคัญ

รางรถไฟที่มีหินโรยทางถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีต้นทุนการก่อสร้างต่ำ ระยะเวลาก่อสร้างสั้น บำรุงรักษาสะดวกและรวดเร็ว อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือน ความสามารถในการระบายน้ำที่

ดี และความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ [1] อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของความเร็วรถไฟเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของระบบการขนส่งสมัยใหม่ ส่งผลให้โครงสร้างทางรถไฟต้องรองรับแรงกระทำที่สูงขึ้น ซึ่งอาจเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพของชั้นหินโรยทาง (ballast degradation) และลดอายุการใช้งานของรางรถไฟ การเสื่อมสภาพดังกล่าวอาจนำไปสู่ปัญหาด้านเสถียรภาพของราง และหากไม่ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม อาจเพิ่มความเสี่ยงต่อการ出轨 (derailment) ของรถไฟ

เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว ระบบรางรถไฟจึงต้องได้รับการบำรุงรักษาเป็นประจำ ซึ่งส่งผลให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูงและกระทบต่อการเดินรถ ตัวอย่างเช่น งบประมาณสำหรับการบำรุงรักษาชั้นหินโรยทางเพียงอย่างเดียวคิดเป็นประมาณ 15-20% ของงบประมาณการบำรุงรักษาทางรถไฟทั้งหมดในแต่ละปี นอกจากนี้ ความต้องการหินโรยทางมาตรฐานยังเพิ่มสูงขึ้นจากโครงการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านระบบขนส่งทางราง ส่งผลให้แหล่งผลิตหินโรยทางในปัจจุบันไม่สามารถตอบสนองต่อปริมาณที่ต้องการได้

จากการศึกษาที่ผ่านมา นักวิจัยได้พยายามหาแนวทางในการยืดอายุการใช้งานของชั้นหินโรยทาง [2-5] โดยใช้วัสดุต่าง ๆ เช่น แผ่นรองใต้ราง (under sleeper pad, USP) แผ่นโพลีเอทิลีน และโพลียูรีเทน โดยเฉพาะ USP ที่ได้รับความนิยมสูงสุด เนื่องจากช่วยลดการเสื่อมสภาพของหินโรยทางโดยทำให้การเชื่อมต่อระหว่างหมอนรองกับหินโรยทางมีความยืดหยุ่นมากขึ้น เพิ่มพื้นที่สัมผัสและช่วยกระจายน้ำหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าวัสดุเหล่านี้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่ก็ยังมีข้อจำกัดด้านต้นทุนที่สูงขึ้นเช่นกัน

ดังนั้น แนวทางการใช้วัสดุทางเลือกที่มีต้นทุนต่ำกว่า เช่น การผสมเศษยางรถยนต์ลงในชั้นหินโรยทางจึงเป็นแนวคิดที่น่าสนใจ โดยเฉพาะยางสามารถช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น ลดแรงกระแทก และลดการแตกหักของหินโรยทาง นอกจากนี้ยังเป็นการนำของเสียจากอุตสาหกรรมยานยนต์กลับมาใช้ใหม่ ซึ่งช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ผลกระทบของเศษยางต่อคุณสมบัติของหินโรยทาง โดยเฉพาะพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของวัสดุ จากการทดสอบมุมการกองของหินโรยทางซึ่งสะท้อนถึงมุมแรงเสียดทานภายใน [6-8] เป็นตัวบ่งชี้สำคัญที่แสดงถึงความสามารถในการต้านแรงเฉือนของหินโรยทาง (angle of repose) ยังคงเป็นประเด็นที่ต้องศึกษาเพิ่มเติม การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ผลกระทบของรูปร่างและอัตราส่วนผสมของเศษยางที่แตกต่างกันต่อมุมการกองของหินโรยทาง โดยเปรียบเทียบระหว่างหินโรยทางใหม่และหินโรยทางที่ผ่านการใช้งานแล้ว ซึ่งผ่านการทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอ (Los Angeles Abrasion Test) โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการสแกนสามมิติ เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับพฤติกรรมของวัสดุที่ผสมเศษยาง ซึ่งจะช่วยเป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงการนำเศษยางมาใช้ในงานวิศวกรรมทางรถไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ

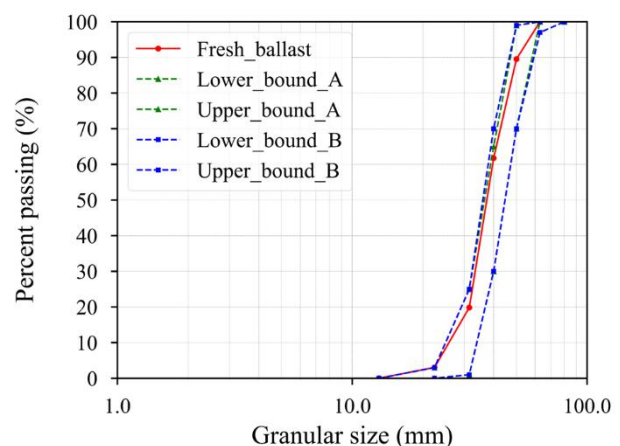
2. วิธีการวิจัย

2.1 หินโรยทางรถไฟ

หินโรยทาง (ballast) เป็นโครงสร้างที่สำคัญของทางรถไฟ มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของทางรถไฟ วัสดุที่ใช้เป็นหินแข็ง เช่น หินแกรนิต หินบะซอลต์ หินปูน เศษหินและกรวด มีเหลี่ยมมุม มีการกระจายของขนาดสม่ำเสมอ (uniform grade) มีช่องว่างระหว่างอนุภาคหิน และมีความต้านทานต่อการขัดสี คุณลักษณะเฉพาะของหินโรยทางจำเป็นจะต้องเป็นไปตามเกณฑ์ คือ

- 1) ขนาดการกระจายและปราศจากการปนเปื้อนของเม็ดดินขนาดเล็กเพื่อให้มั่นใจว่ามีความเสถียรเชิงกลที่ดีและมีการระบายน้ำที่เหมาะสมของรางรถไฟ
- 2) เหลี่ยมมุมของหินที่คมจะทำให้เกิดความต้านทานแรงเฉือนที่ดีของชั้นหินโรยทาง
- 3) มีความต้านทานเชิงกลสูงต่อการสึกหรอเพื่อรักษามุมและลดการเกิดช่องอนุภาคเม็ดละเอียด
- 4) ความสม่ำเสมอของรูปร่าง ไม่ยาวหรือแบนเกินไป

สำหรับประเทศไทยขนาดของหินโรยทางถูกกำหนดด้วยขนาดของตะแกรงร่อนคู่ซึ่งมีขนาดช่องเปิดมีหน่วยวัดขนาดเป็นมิลลิเมตร หินโรยทางรถไฟที่นำมาทดสอบต้องสามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาดใหญ่สุดและค้างอยู่บนตะแกรงขนาดเล็กสุด ให้ขนาดใหญ่สุดของหินโรยทางรถไฟเป็น 63.5 มม. หรือ 50 มม. และขนาดเล็กสุดเป็น 31.5 มม. (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2561) การทดสอบการกระจายขนาดของหินโรยทางรถไฟดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 136 แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขนาดกระจายของหินโรยทางเทียบกับมาตรฐาน (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2561)

2.2 การจำแนกขนาดของเศษยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งาน

การจำแนกขนาดของเศษยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานแปรรูปมีความสำคัญอย่างมากในบริบททางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานในโครงการก่อสร้าง [9] วิศวกรรมธรณีเทคนิคมักใช้ยางล้อ

ที่ผ่านการแปรรูปเพื่อทดแทนวัสดุแบบดั้งเดิมที่ยั่งยืนและคุ้มค่า การจำแนกขนาดที่ถูกต้องของเศษยางเหล่านี้ถือเป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณาความเหมาะสมสำหรับการใช้งานเฉพาะด้าน [10-12] การจำแนกประเภทอนุภาคของเศษยางรถยนต์เหล่านี้สามารถอ้างอิงได้จากมาตรฐานต่าง ๆ เช่น ASTM D6270-08 (2012) [13] และ ETRA (2013) ซึ่งมาตรฐานเหล่านี้จะระบุช่วงขนาดเฉพาะสำหรับอนุภาคของเศษยางที่ได้มาจากวิธีการตัด โดยใช้การแยกหรือการจัดแถบโลหะหรือส่วนประกอบใด ๆ ออกจากยางรถยนต์ ตารางที่ 1 แสดงการจำแนกขนาดของยางแปรรูปตามที่กำหนดโดย ETRA (2013) และ ASTM D6270-08 (2012)

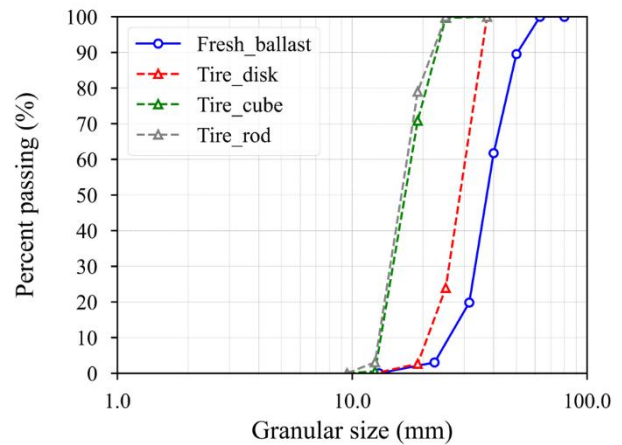
รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างยางที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ มีลักษณะของอนุภาคยางที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปทรงแผ่น รูปทรงแท่ง และรูปทรงลูกบาศก์ โดยมีขนาดประมาณ 3-4, 6-7 และ 2-3 ซม. ตามลำดับ มีการกระจายขนาดคละของเศษยางรถยนต์ในแต่ละรูปแบบโดยจะเทียบกับการกระจายขนาดคละของหินโรยทางตัวอย่าง แสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 1 เกณฑ์การจำแนกขนาดของยางแปรรูปตามที่กำหนดโดย ETRA (2013) และ ASTM D6270-08 (2012)

ASTM D6270-08 (2012)		ETRA (2013)	
Name	Size	Name	Size
Powdered Rubber	< 425 μm	Fine powders	< 500 μm
Ground Rubber	425 μm - 2 mm	Powders	< 1 mm
Granulated Rubber	425 μm - 12 mm	Granulated rubber	1 mm - 10 mm
Rough Shred	50x50x50-762x50x50	Rubber chips	10 mm - 50 mm
Tyre Chips	12 mm - 50 mm	Rubber shreds	50 mm - 300 mm
Tyre Shreds	50 mm - 305 mm		



รูปที่ 2 ลักษณะรูปร่างของเศษยางทั้ง 3 รูปแบบ



รูปที่ 3 แผนภูมิการกระจายขนาดคละของเศษยาง

2.3 เทนเซอร์ในแนวพื้นผิว (surface orientation tensor, SOT)

สำหรับการอธิบายรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ดโดยการกำหนดลักษณะของวัสดุแต่ละก้อนนั้นไม่ว่าจะเป็นความเป็นทรงกลม การยืดออก และความแบนเรียบ Orosz et al. (2021) [14] ได้อธิบายรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ดด้วยเทนเซอร์ในแนวพื้นผิว (surface orientation tensor, SOT) โดยพิจารณาพื้นผิวหน้าเรียบของอนุภาคหลายเหลี่ยมที่มีทั้งความนูน (convex) หรือเว้า (concave) ซึ่งสามารถแสดงในรูปของที่มีเวกเตอร์พุ่งออกจากพื้นที่ผิวแต่ละด้านและถ่วงด้วยพื้นที่ผิวหน้าที่เวกเตอร์ ดังนั้น SOT จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ

$$f_{ij} = \frac{1}{\sum_{(k)} A^{(k)}} \sum_{(k)} \left(A^{(k)} n_i^{(k)} n_j^{(k)} \right) \quad (1)$$

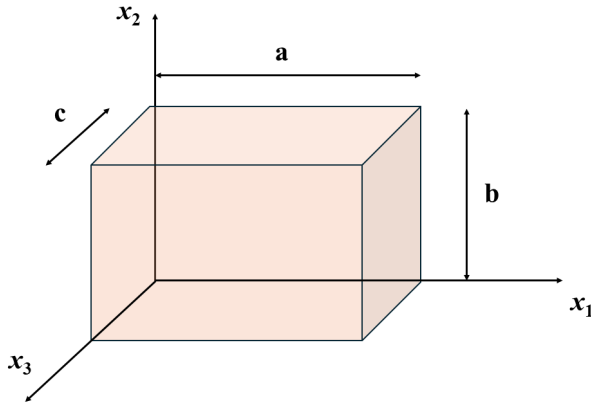
โดยที่ k คือจำนวนผิวหน้าของอนุภาค ในขณะที่ $A^{(1)}, A^{(1)} \dots A^{(k)}$ คือพื้นที่ของผิวหน้า และ $n^{(1)}, n^{(1)} \dots n^{(k)}$ คือเวกเตอร์ตั้งฉากในแต่ละผิวหน้า และกำหนดให้ค่าลักษณะเฉพาะ (eigenvalue) $f_1 \geq f_2 \geq f_3$ โดยที่ค่าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (eigenvector) [15] ตัวแรก f_1 สะท้อนถึงการวางแนวที่อนุภาคส่วนใหญ่จะสัมผัสกับอนุภาคที่อยู่ใกล้กัน กรณีอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นแผ่นแบน เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะตัวแรก f_1 คือการวางแนวของเวกเตอร์ปกติของผิวด้านใหญ่ทั้งสองด้าน สำหรับรูปหลายเหลี่ยมปกติ (เช่น ลูกบาศก์) ค่าลักษณะเฉพาะทั้งสามค่าจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่อนุภาคที่มีรูปร่างเป็นแท่งยาวและบางมาก ๆ ค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุด f_3 จะมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ และจากค่าลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถนำไปใช้สำหรับการกำหนดลักษณะของรูปแบบอนุภาคแต่ละขนาดได้ดังนี้

$$\text{ค่าความเป็นลูกบาศก์หรือทรงกลม (Compactness: C)} \quad \frac{f_3}{f_1} \quad (2)$$

$$\text{ค่าความแบนเรียบ (Flakiness: F)} \quad \frac{f_1 - f_2}{f_1} \quad (3)$$

ค่าความแบนเรียบ (Flakiness: F)
$$\frac{f_2 - f_3}{f_1} \quad (4)$$

เพื่อให้่ายต่อความเข้าใจ รูปที่ 4 จะแสดงอนุภาคในรูปของปริซึม ลูกบาศก์และมีขนาดของระยะที่ต่างกันตามแนวแกน โดยที่ระยะ ลักษณะเฉพาะของพื้นผิวทั้งหกด้านสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4 ลูกบาศก์ที่มีขนาดของด้านแตกต่างกันตามแนวแกน

พื้นผิวด้านซ้ายและขวา;

$$A_{right} = b \cdot c; \quad n_{right} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad A_{left} = b \cdot c; \quad n_{left} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

พื้นผิวด้านบนและล่าง;

$$A_{top} = a \cdot c; \quad n_{top} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad A_{bottom} = a \cdot c; \quad n_{bottom} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

พื้นผิวด้านหน้าและหลัง;

$$A_{front} = a \cdot b; \quad n_{front} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad A_{back} = a \cdot b; \quad n_{back} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

จากข้อมูลข้างต้น เทนเซอร์ในแนวพื้นผิวจะสามารถแสดงในรูป

$$f = \frac{1}{a \cdot b + a \cdot c + b \cdot c} \begin{bmatrix} b \cdot c & 0 & 0 \\ 0 & a \cdot c & 0 \\ 0 & 0 & a \cdot b \end{bmatrix} \quad (8)$$

และจากสมการ (2) - (4) ตัวบ่งชี้ลักษณะของรูปแบบอนุภาคจะสามารถเขียนในรูปของ

ค่าความเป็นลูกบาศก์หรือทรงกลม (Compactness: C)
$$\frac{c}{a} \quad (9)$$

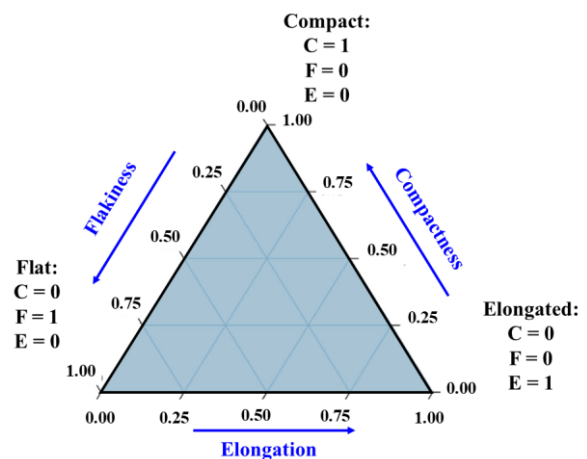
ค่าความแบนเรียบ (Flakiness: F)
$$1 - \frac{c}{b} \quad (10)$$

ค่าความยาว (Elongation: E)
$$\frac{c}{b} - \frac{c}{a} \quad (11)$$

ตารางที่ 2 แสดงลักษณะตัวอย่างขอบเขตรูปแบบของอนุภาคในแต่ละรูปแบบ ยกตัวอย่าง กรณีที่ปริซึมมีการยืดตัวในทิศทางของแกน x_1 โดยที่ $a \gg b = c$ ค่าความเป็นลูกบาศก์หรือทรงกลม (C) $c/a \approx 0$ ส่วนค่าความแบนเรียบ (F) จะมีค่าเท่ากับ $1 - (c/b) = 0$ และค่าความยาว E มีค่าเท่ากับ $(c/b) - (c/a) = 1$ ซึ่งลักษณะรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ดสามารถแสดงได้จากตำแหน่งบนแผนภาพสามแกน (ternary) โดยใช้พิกัดของค่า C, F และ E ที่คำนวณได้ ดังแสดงในรูปที่ 5

ตารางที่ 2 ขอบเขตรูปแบบอนุภาค

Geometry	Dimensions	Compactness (C)	Flakiness (F)	Elongation (E)
	$a \gg b = c$	0	0	1
	$a = b \gg c$	0	1	0
	$a = b = c$	1	0	0



รูปที่ 5 แผนภาพสามแกน (ternary) สำหรับอธิบายรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ด

2.4 กล้อง 3D Laser scanner FARO Focus

กล้อง 3D laser scanner เป็นอุปกรณ์ รุ่น FARO Focus M70 ที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองสามมิติ (3D) ของวัตถุหรือพื้นที่ด้วยความแม่นยำสูง แสดงดังรูปที่ 6 โดยใช้เทคโนโลยีการสแกนด้วยแสงเลเซอร์ ซึ่งกระบวนการทำงานของกล้องนี้อาศัยหลักการสะท้อนกลับของแสงเลเซอร์ที่ถูกส่งไปยังวัตถุแล้วสะท้อนกลับมาส่องเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งบนกล้อง การวัดระยะเวลาที่แสงเลเซอร์ใช้ในการเดินทางไปกลับ ทำให้กล้องสามารถคำนวณระยะทางได้อย่างแม่นยำในระดับมิลลิเมตร ในส่วนของการทำงาน กล้องจะปล่อยแสงเลเซอร์ออกไปยังวัตถุและรับข้อมูลที่สะท้อนกลับมาจากข้อมูลเหล่านี้จะถูกแปลงเป็นชุดของจุดข้อมูลทีเรียกว่า “point cloud” ซึ่งเป็นชุดของจุดจำนวนมากที่แสดงตำแหน่งเชิงพิกัดในระบบสามมิติ ข้อมูลนี้จะถูกนำมาประมวลผลเพื่อสร้างภาพโครงร่างของวัตถุที่สมบูรณ์ ซึ่งสามารถใช้ในการสร้างแบบจำลองสามมิติได้ กล้อง 3D Scan Laser ได้รับความนิยมในหลายสาขา เช่น วิศวกรรม, การสำรวจ, สถาปัตยกรรม และการผลิต เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญหลายประการ ได้แก่ ความแม่นยำในการวัด, ความเร็วในการสแกน และ ความสามารถในการประมวลผลข้อมูลในพื้นที่ขนาดใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานที่ต้องการการวัดรายละเอียดอย่างละเอียด เช่น การสร้างแผนผังอาคาร, การตรวจสอบโครงสร้างทางวิศวกรรม หรือการวิเคราะห์รูปร่างและขนาดของวัตถุที่มีความซับซ้อน ในเชิงทฤษฎี กล้อง 3D Scan Laser ทำงานโดยอาศัยหลักการ “Time of Flight” ซึ่งเป็นการวัดเวลาที่แสงเลเซอร์ใช้ในการเดินทางจากกล้องไปยังวัตถุและสะท้อนกลับ มา กล้องจะคำนวณระยะทางของแต่ละจุดจากข้อมูลนี้ และนำมาสร้างภาพสามมิติของวัตถุ ข้อมูลที่ได้จากการสแกนมีความละเอียดสูง ทำให้สามารถนำไปใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำในการประมวลผลเชิงพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 6 กล้อง 3D Laser scanner FARO Focus

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของกล้อง 3D FARO Focus M70

Property	FARO Focus M70
อัตราการสแกนสูงสุด	488,000 scan/s
มีช่วงระยะการสแกน	0.6 – 70 m
ความคลาดเคลื่อน	+/- 3 mm
มุมมองในการสแกน	แนวราบ 360 ° / แนวตั้ง 300 °
ภาพ HDR ความละเอียดสูงสุด	165 mp
น้ำหนักตัวเครื่อง	4.2 kg

2.5 การทดสอบมุมการกอง

ตามทฤษฎีการทดสอบแบบเม็ด [16] ระบุการทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ซม. (4–5 เท่าของขนาดอนุภาคสูงสุด) และความสูง 90 ซม. (3–4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอก) วัสดุที่ใช้คือท่อ PVC พื้นผิวด้านในของกระบอกมีความเรียบ เพื่อลดผลของแรงเสียดทานที่ส่วนต่อการทดสอบ การทดสอบในครั้งนี้ใช้ยางรถยนต์ใน 3 รูปแบบ ได้แก่ ยางทรงแผ่น, ยางทรงแท่ง, และยางทรงลูกบาศก์ โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างหินที่ผ่านการทดสอบ Los Angeles Abrasion (LAA) 500 และ 1,000 รอบ ซึ่งมีการสึกหรอไปบางส่วน และตัวอย่างหินที่ยังไม่ได้ผ่านการทดสอบ ซึ่งยังคงสภาพสมบูรณ์ การทดสอบแต่ละตัวอย่างจะถูกดำเนินการ 3 ครั้ง โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

เริ่มต้นด้วยการเตรียมตัวอย่างหินโรยทาง โดยมีการทดสอบอยู่ 3 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ หินที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ LAA และหินที่ผ่านการทดสอบ LAA ที่จำนวนรอบการหมุน 500 และ 1,000 รอบ ในแต่ละกลุ่มจะทำการผสมเศษยางรถยนต์ที่สัดส่วนและขนาดของรูปร่างต่าง ๆ (0%, 5%, 15% และ 25%) โดยปริมาตร แสดงดังรูปที่ 7a และ ตารางที่ 4 เตรียมตัวอย่างหินโรยทางโดยการล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและสิ่งปนเปื้อน จากนั้นปล่อยให้แห้งสนิทเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการทดสอบในขั้นตอนถัดไป หลังจากนั้นจะทำการเตรียมชุดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยแผ่นรองหิน ท่อ PVC ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ซม. และรอกสำหรับยกท่อ PVC ขึ้น เพื่อใช้ในการทดสอบ

รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างการทดสอบจนถึงการเสร็จสิ้นการสแกน โดยหินโรยทางตัวอย่างจะถูกเติมลงไปบนท่อ PVC ทรงกระบอกจนถึงระยะความสูง 90 ซม. (รูปที่ 7b) จากนั้นจึงทำการทดสอบโดยใช้รอกยกกระบอกของท่อขึ้นสูงแล้วปล่อยให้หินตกอย่างอิสระจนกระทั่งรอกยกสูงอยู่เหนือกองหิน (รูปที่ 7c) ซึ่งในแต่ละรอบของการทดสอบ จะใช้กล้อง 3D laser scan ที่มีความละเอียดสูงในการบันทึกภาพสามมิติ ของกองหิน (รูปที่ 7d) โดยกล้องสามารถจับรายละเอียดของโครงสร้างพื้นผิวและมุมการกองของหินได้อย่างแม่นยำ ข้อมูลที่ได้รับจากการสแกนจะถูกนำไปประมวลผลในโปรแกรม Autodesk Recap และโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณมุมการกองของหินภายใต้สภาวะการทดสอบต่าง ๆ การวิเคราะห์นี้จะช่วยประเมินผลกระทบของเศษยางรถยนต์ต่อพฤติกรรมการกองของหิน และสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของตัวอย่างหินได้



รูปที่ 7 การทดสอบมุลาดเอียง

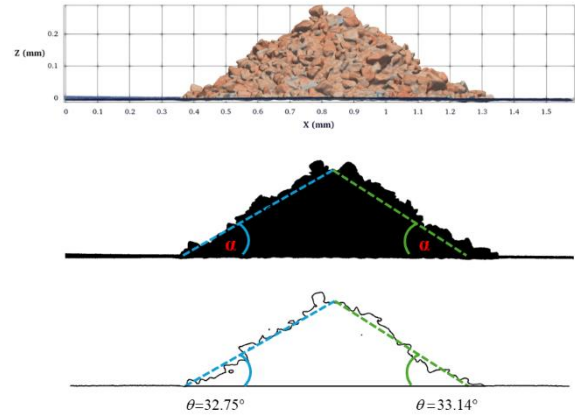
ตารางที่ 4 รายการทดสอบมุลาดเอียงของหินโรยทาง

ตัวอย่าง	ตัวอย่างหินโรยทาง	ร้อยละเศษยาง (%)	รูปแบบเศษยาง
1	หินโรยทางใหม่	0	-
2	หินโรยทางใหม่	5	Cube, Rod, Disk
3	หินโรยทางใหม่	15	Cube, Rod, Disk
4	หินโรยทางใหม่	25	Cube, Rod, Disk
5	หินโรยทาง LAA 500 รอบ	0	-
6	หินโรยทาง LAA 500 รอบ	5	Cube, Rod, Disk
7	หินโรยทาง LAA 500 รอบ	15	Cube, Rod, Disk
8	หินโรยทาง LAA 500 รอบ	25	Cube, Rod, Disk
9	หินโรยทาง LAA 1000 รอบ	0	-
10	หินโรยทาง LAA 1000 รอบ	5	Cube, Rod, Disk
11	หินโรยทาง LAA 1000 รอบ	15	Cube, Rod, Disk
12	หินโรยทาง LAA 1000 รอบ	25	Cube, Rod, Disk

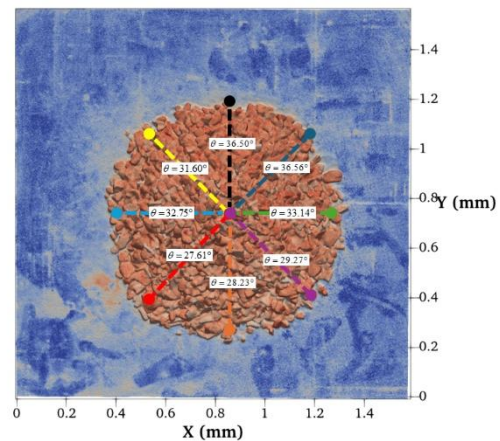
2.6 การวัดมุมการกองด้วยภาพถ่ายสามมิติ

ในการวัดมุมการกองด้วยภาพถ่ายสามมิติ จะทำการคำนวณมุมระหว่างจุดยอดบนสุดของกองวัสดุลงไปยังขอบล่างของกองในแต่ละด้านตามแนวระนาบที่กำหนด ซึ่งเป็นการประเมินจากภาพด้านข้างในมุมมองแบบสองมิติตามที่แสดงในรูปที่ 8 โดยจะดำเนินการวัดมุมทั้งหมด 8 ด้านรอบกองตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 9 และนำค่ามุมที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยให้เป็นค่าตัวแทนของการทดลองแต่ละครั้ง เพื่อให้ได้ค่าที่สะท้อนลักษณะโดยรวมของมุมการกองของวัสดุในแต่ละการทดลองได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากกองวัสดุอาจไม่ได้มีความสมมาตรในทุกทิศทาง การวัดเพียงมุมเดียวอาจไม่เพียงพอในการอธิบายลักษณะทางกายภาพของมุมการกองได้อย่าง

ครบถ้วน การใช้ค่าเฉลี่ยจากหลายทิศทางจึงช่วยลดผลกระทบจากความไม่สม่ำเสมอ และทำให้ผลที่ได้มีความเป็นกลาง มีความน่าเชื่อถือ และสามารถเปรียบเทียบระหว่างการทดลองต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 8 มุมมองด้านข้างสองมิติของการวัดมุม



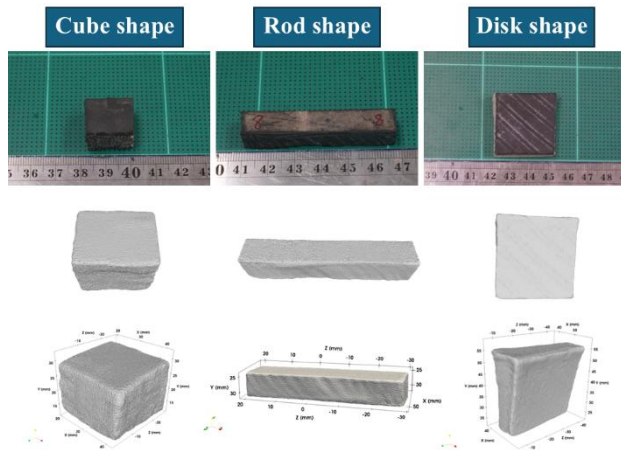
รูปที่ 9 การวัดมุมทั้งแปดด้านในการทดสอบมุมการกอง

3. ผลการศึกษา

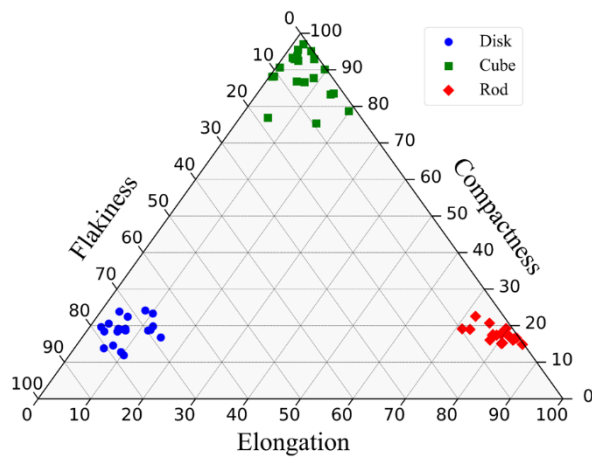
3.1 ลักษณะรูปร่างของเศษยาง

ในการพิจารณารูปร่างของยางทั้ง 3 รูปแบบ (รูปที่ 10) เพื่อระบุลักษณะพื้นฐานวิทยาของยางที่แตกต่างกันชัดเจน โดยใช้เทนเซอร์ในแนวพื้นผิว (surface orientation tensor, SOT) ในการพิจารณารูปร่างเรขาคณิตของอนุภาคจริง รูปที่ 10 แผนภาพ 3 เหลี่ยมแสดงค่าความเป็นลูกบาศก์ ค่าความแบน และค่าความยาวของเศษยางทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าพารามิเตอร์รูปร่างของเศษยางที่ใช้ SOT แตกต่างกันอย่างชัดเจน จะเห็นได้ว่ายางทรงลูกบาศก์จะอยู่มุมบนของกราฟ ส่วนยางทรงแท่งจะอยู่มุมล่างขวาของกราฟ และสุดท้ายยางทรงแผ่นจะอยู่มุมล่างซ้ายของกราฟ 3

เหลี่ยม แสดงให้เห็นว่าทั้ง 3 รูปแบบที่นำมาใช้ทดสอบครั้งนี้มีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน



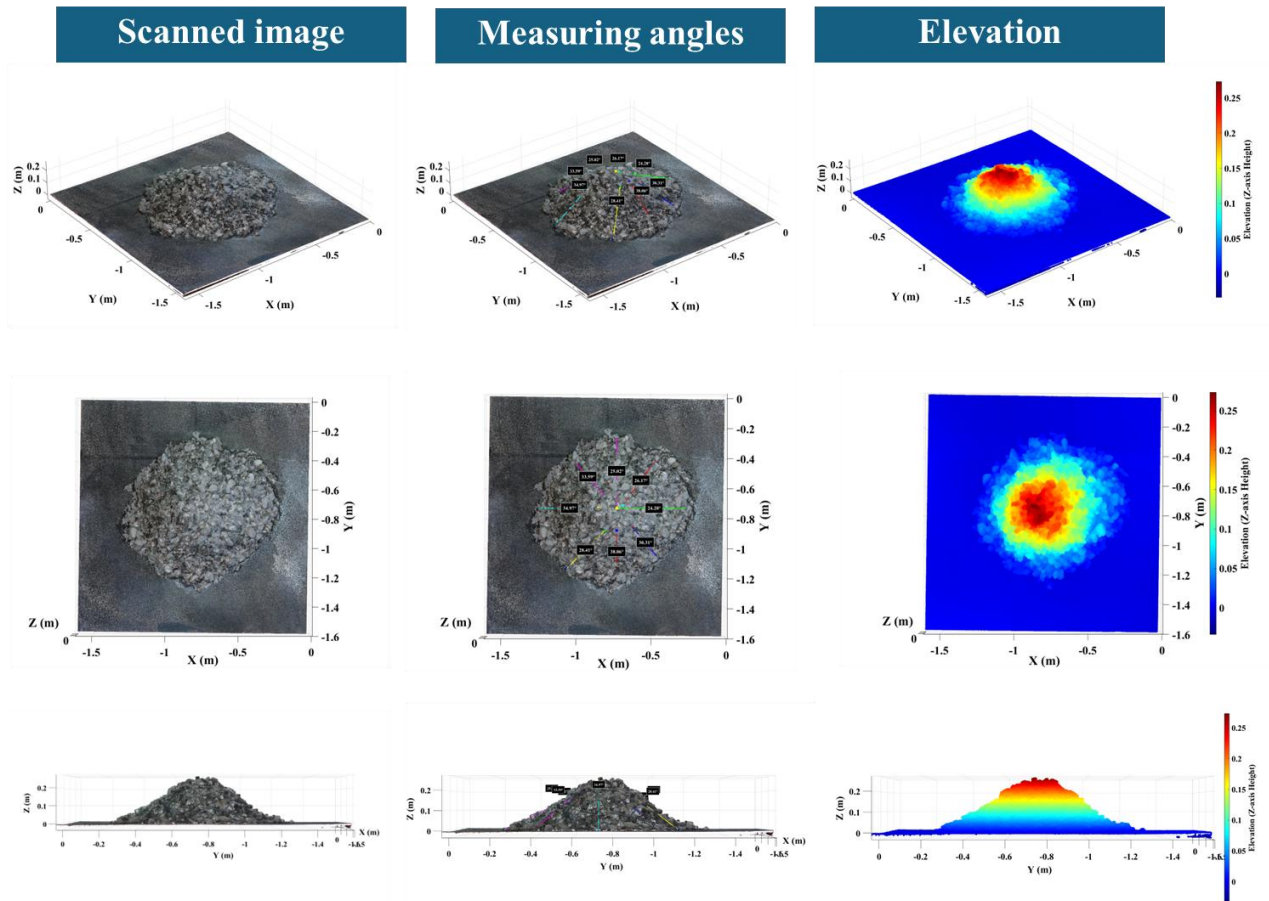
รูปที่ 10 ลักษณะรูปร่างของเศษยางรถยนต์



รูปที่ 11 แผนภาพ 3 เหลี่ยมแสดงรูปร่างของตัวอย่างเศษยางรถยนต์

3.2 ผลการทดสอบมุมลาดเอียงของหินโรยทางกับเปอร์เซ็นต์เศษยางรถยนต์ในสัดส่วนผสมต่าง ๆ

รูปที่ 12 แสดงการวิเคราะห์มุมลาดเอียงของหินโรยทางผ่านกระบวนการสแกน โดยภาพแรกเป็นภาพสแกน 3 มิติที่แสดงรูปร่างและโครงสร้างของกองหิน ภาพที่สองเป็นการวัดมุมลาดเอียง โดยวัดจากมุมบนสุดของกองหินจนถึงขอบมุมล่างสุด ซึ่งทำการวัดมุมทั้งหมด 8 ด้านด้วยกัน แล้วหาค่าเฉลี่ยให้เป็นตัวแทนของการทดลองแต่ละครั้ง ซึ่งช่วยตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลของหินโรยทางและเสถียรภาพของกองหิน นอกจากนี้มีการวิเคราะห์ระดับความสูงโดยใช้เฉดสี แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของระดับความสูงของพื้นผิวกองหิน โดยสีแดงแสดงจุดที่สูงที่สุดและสีน้ำเงินแสดงจุดที่ต่ำที่สุด



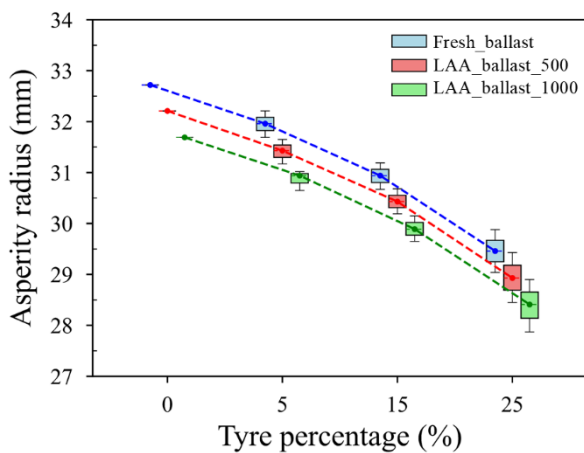
รูปที่ 12 มุมลาดเอียงของหินโรยทางที่ได้จากการประมวลผลด้วยภาพ 3 มิติ

จากผลการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่ามุมการกองของวัสดุมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมของยางเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ตัวอย่างหินโรยทางที่ไม่ผสมเศษยางมีมุมลาดเอียงที่สูงกว่าในทุกการทดสอบ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของยาง จะเห็นได้ว่ามุมของกองหินโรยทางจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการลดลงของแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคทำให้วัสดุไหลตัวได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของมุมการกองที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยาง จะพบว่าอัตราส่วนผสมของยางที่มากกว่า 15% มุมลาดเอียงของหินโรยทางจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด

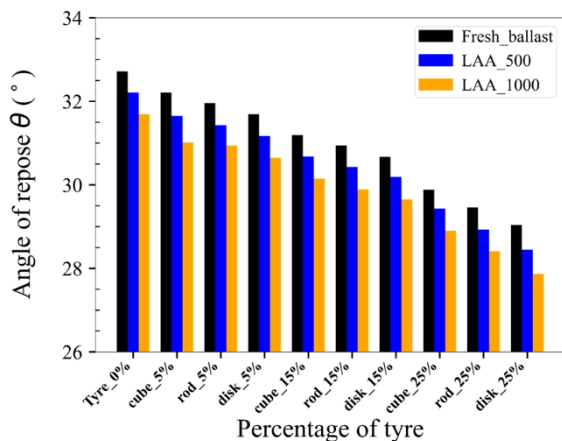
เมื่อทดสอบมุมลาดเอียงของตัวอย่างหินโรยทางที่ผ่านการทดสอบด้วยเครื่อง LAA ที่ 500 และ 1,000 รอบ พบว่ามุมลาดเอียงจะลดลงเมื่อรอบการหมุนเพิ่มขึ้นและจะลดลงเรื่อย ๆ ตามอัตราส่วนผสมของเปอร์เซ็นต์เศษยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มจาก 500 เป็น 1,000 ซึ่งอาจเป็นผลจากอนุภาคถูกแรงกระแทกและการขัดสีระหว่างการทดสอบ LAA ทำให้ขอบคมของอนุภาคลดลง และพื้นผิวของวัสดุเรียบขึ้น การลดลงของขอบคมและความขรุขระของพื้นผิวส่งผลโดยตรงต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค เนื่องจากอนุภาคที่มีขอบคมและพื้นผิวขรุขระมักจะสามารสรสร้างแรงเสียดทานและแรงสอดประสานระหว่างกันได้สูงกว่า เมื่อพื้นผิวของอนุภาคเรียบขึ้น แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคลดลง ทำให้วัสดุสูญเสีย

ความสามารถในการล็อกตัวกัน ส่งผลให้โครงสร้างของกองวัสดุหลวมขึ้นและมีแนวโน้มที่จะไหลตัวได้ง่ายขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของรูปร่างของยางแสดงดังรูปที่ 14 พบว่ายางรูปทรงลูกบาศก์มีค่ามุมการกองสูงที่สุดในทุกกรณี รองลงมา คือ ยางรูปทรงแท่ง และต่ำสุด คือ ยางรูปทรงแผ่น ซึ่งบ่งชี้ว่ายางที่มีลักษณะเป็นทรงเหลี่ยม ลักษณะที่ใกล้เคียงกับหินโรยทางมากที่สุด สามารถสร้างแรงต้านทานการไหลตัวของวัสดุได้ดีกว่า ทำให้สามารถล็อกตัวกันได้ดี ลดการเลื่อนตัวของอนุภาค ในทางกลับกัน ยางรูปทรงแผ่นมีมุมการกองต่ำที่สุด เนื่องจากมีพื้นผิวแบนราบ ทำให้เกิดการเรียงตัวแบบซ้อนทับกัน ลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค ส่งผลให้วัสดุไหลตัวได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 13 การกระจายของมุมลาดเอียงของหินโรยทางกับเปอร์เซ็นต์ยางรถยนต์ใน
สัดส่วนผสมต่างๆ



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการกองของหินโรยทางกับปริมาณยางรถยนต์ใน
สัดส่วนผสมต่าง ๆ

4. บทสรุป

จากการศึกษาผลกระทบของเศษยางรถยนต์ต่อมุมการกองของหินโรยทางที่ผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนและรูปทรงที่แตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบระหว่างหินโรยทางใหม่และหินโรยทางที่ผ่านการใช้งานแล้ว ซึ่งผ่านการทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอ (Los Angeles Abrasion Test) จากการศึกษาพบว่า รูปทรงของเศษยางมีผลกระทบโดยตรงต่อมุมการกองของวัสดุ โดยยางทรงลูกบาศก์ให้มุมการกองสูงสุด เนื่องจากมีลักษณะใกล้เคียงกับหินโรยทางมากที่สุด ทำให้สามารถล็อกตัวกันได้ดีและลดการไหลตัวของวัสดุ รองลงมาคือยางทรงแท่ง ซึ่งยังคงมีความสามารถในการต้านทานการไหลตัวในระดับหนึ่ง ส่วนยางทรงแผ่นให้มุมการกองต่ำที่สุด เนื่องจากมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ ส่งผลให้วัสดุจัดเรียงตัวแบบซ้อนทับกันและลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค ทำให้วัสดุไหลตัวได้ง่ายขึ้น

ในด้านอัตราส่วนผสมของเศษยาง พบว่า การเพิ่มสัดส่วนยางส่งผลให้มุมการกองลดลง ซึ่งสะท้อนถึงการลดลงของแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค

โดยเฉพาะเมื่อสัดส่วนยางเกิน 15% มุมการกองลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าวัสดุเริ่มสูญเสียความสามารถในการล็อกตัวกัน

ดังนั้น อัตราส่วนผสมของเศษยางที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 15% โดยเลือกใช้เศษยางรูปทรงลูกบาศก์ เนื่องจากสามารถช่วยเสริมแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคได้ดีที่สุด ลดการไหลตัวของวัสดุ และยังคงรักษาเสถียรภาพของกองหินได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ สัญญาเลขที่ N41A661185 และมหาวิทยาลัยพะเยาที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย (FF5022/2567) ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยาที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ เครื่องมือ และทรัพยากรที่จำเป็นต่อการดำเนินงาน รวมถึง บริษัท บัญชากิจ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสนับสนุนหินโรยทางสำหรับการศึกษาในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Esveld, C. (2001). Modern railway track (2nd ed.). Delft University of Technology.
- [2] Biabani, M. M., Indraratna, B., and Nimbalkar, S. (2016). Assessment of interface shear behaviour of sub-ballast with geosynthetics by large-scale direct shear test. Procedia Engineering, 143, 1007–1015.
- [3] Biabani, M. M., Indraratna, B., and Ngo, N. T. (2016). Modelling of geocell-reinforced subballast subjected to cyclic loading. Geotextiles and Geomembranes, 44, 489–503. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.02.001>
- [4] Ngo, T., and Indraratna, B. (2020). Mitigating ballast degradation with under-sleeper rubber pads: Experimental and numerical perspectives. Computers and Geotechnics, 122, 103540. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103540>
- [5] Xiao, M., Bowen, J., Graham, M., and Larralde, J. (2012). Comparison of Seismic Responses of Geosynthetically Reinforced Walls with Tire-Derived Aggregates and Granular Backfills. Journal of Materials in Civil Engineering, 24(11), 1368–1377.
- [6] Xiao, J., Liu, G., Liu, J., Dai, J., Liu, H., and Wang, P. (2019). Parameters of a discrete element ballasted bed model based on a response surface method. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics and Engineering), 20(9), 685–700. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1900133>

- [7] Klanfar, M., Korman, T., Domitrović, D., & Herceg, V. (2021). Testing the novel method for angle of repose measurement based on area-weighted average slope of a triangular mesh. *Powder Technology*, 387, 396–405. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.051>
- [8] Fu, J.-J., Chen, C., Ferrellec, J.-F., and Yang, J. (2020). Effect of particle shape on repose angle based on hopper flow test and discrete element method. *Advances in Civil Engineering*, 2020, Article ID 8811063, 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2020/8811063>
- [9] Tsang, H.-H. (2008). Seismic isolation by rubber–soil mixtures for developing countries. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37(3), 283–303. <https://doi.org/10.1002/eqe.756>
- [10] Akbarimehr, D., and Fakharian, K. (2021). Dynamic shear modulus and damping ratio of clay mixed with waste rubber using cyclic triaxial apparatus. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 140, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106435>
- [11] Tasalloti, A., Chiaro, G., Banasiak, L., and Palermo, A. (2021). Experimental investigation of the mechanical behaviour of gravel-granulated tyre rubber mixtures. *Construction and Building Materials*, 273, 121749. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121749>
- [12] Mohajerani, A., Burnett, L., Smith, J. V., Markovski, S., Rodwell, G., Rahman, M. T., Kurmus, H., Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., and Maghool, F. (2020). Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104679. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>
- [13] ASTM International. (2012). ASTM D6270–08: Standard practice for use of scrap tires in civil engineering applications. ASTM International
- [14] Orosz, Á., Angelidakis, V., and Bagi, K. (2021). Surface orientation tensor to predict preferred contact orientation and characterise the form of individual particles. *Powder Technology*, 394, 312–325. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.054>
- [15] Bagi, K., and Orosz, Á. (2020). A new variable for characterising irregular element geometries in experiments and DEM simulations. In M. Steglich, C. Mueller, G. Neumann, and M. Walther (Eds.), *ECMS 2020 Proceedings* (pp. 256–260). <https://doi.org/10.7148/2020-0256>
- [16] Wu, A. X., Sun, Y. Z., and Liu, X. P. (2002). *Granular dynamic theory and its applications*. Metallurgical Industry Press. (In Chinese).