

การวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของส่วนผสมหินโรยทางรถไฟและเศษยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งาน โดยเครื่องมือ Los Angeles Abrasion test และ ภาพถ่ายแบบสามมิติ Waste tire-derived aggregates-ballast mixture degradation analysis by Los Angeles Abrasion test and 3D image analysis method

ชัยณรงค์ ทรงศิริวงศ์¹ ปาลินี สุमितสุวรรณ^{2,*} ธนศ ทองเดชศรี³ สุริยาวิธ ประอ้าย⁴ และ กรกฎ นุสิทธิ์⁵

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

^{2,3,4} หน่วยวิจัย RS2GH คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

⁵ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จ.พิษณุโลก

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

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันระบบการขนส่งทางรางเริ่มมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาระบบคมนาคมขนส่งในประเทศไทย หินโรยทางรถไฟเป็นองค์ประกอบสำคัญของโครงสร้างทางรถไฟ เมื่อผ่านการใช้งานช่วงเวลาหนึ่ง หินโรยทางรถไฟ (ballast track) จะเสื่อมสภาพ ส่งผลต่อการกระจายตัว การทรุดตัว และการปนเปื้อนของวัสดุอนุภาคเล็ก งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวัสดุต่างๆ เพื่อยืดอายุการใช้งานของหินโรยทาง แต่ยังไม่มีข้อจำกัดเรื่องต้นทุนที่สูงขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการศึกษาการเสื่อมสภาพของหินโรยทางที่ผสมเศษยางรถยนต์ โดยวิเคราะห์ความทนทานต่อการสึกหรอในสัดส่วนและขนาดยางที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะแห้ง และการวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาระดับพื้นผิวจากภาพการสแกนสามมิติ การทดลองใช้เศษยางรถยนต์ 3 รูปแบบ ได้แก่ ยางทรงลูกบาศก์ ทรงแท่ง และทรงแผ่น ตัวอย่างหินจะถูกสแกนด้วยเครื่องมือสแกนสามมิติ และทดสอบความทนทานต่อการสึกหรอในรอบการหมุน 100, 500 และ 1,000 รอบ โดยผสมเศษยางในสัดส่วน 5%, 15% และ 25% โดยปริมาตร ในแต่ละรอบการหมุนจะใช้ตัวอย่างเดิมในการทดสอบสลับกับการสแกนหลังการทดสอบการสึกหรอ (Los Angeles Abrasion Test, LAA) จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มสัดส่วนของเศษยางช่วยลดการสึกหรอของหินโรยทางได้ โดยเศษยางทรงลูกบาศก์มีผลในการลดการสึกหรอได้ดีที่สุด รองลงมาคือทรงแท่ง และทรงแผ่น เมื่อเพิ่มสัดส่วนเศษยางมากกว่า 15% การลดลงของความลึกการสึกหรอกลับไม่แตกต่างกันนัก การศึกษาด้านพื้นฐานวิทยาด้วยฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical Harmonics Function, SHF) พบว่ารูปร่างของเศษยางมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางกายภาพของอนุภาคหินอย่างชัดเจน โดยเฉพาะดัชนีความเป็นมุม (AI3D) และดัชนีพื้นผิว (MT3D) ซึ่งเศษยางทรงลูกบาศก์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทรงอื่นๆ นอกจากนี้ รัศมีความขรุขระของเศษยางทรงลูกบาศก์ก็มีค่าต่ำที่สุดในทุกอัตราส่วนผสม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเศษยางสามารถลดการสึกหรอของหินได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเมื่อใช้เศษยางในอัตราส่วน 15% ที่ส่งผลให้อัตราการสึกหรอลดลงน้อยที่สุด

คำสำคัญ: หินโรยทาง, เศษยางรถยนต์, พื้นฐานวิทยา, ระดับจุลภาค

Abstract

At present, the railway transportation system has become an important role in the development of transportation systems in Thailand. Ballast is an important component of the

railway structure. After a period of use, ballast track will deteriorate, affecting its distribution, subsidence, and contamination of small particle materials. Previous research has studied various materials to extend the service life of ballast, but there are still limitations due to higher costs. This research presents a study of the deterioration of ballast mixed with scrap tires by analyzing the wear resistance in different proportions and sizes of tires under dry conditions and analyzing the surface morphology from 3D scan images. The experiment used 3 types of scrap tires: cubes, rods, and disks. The rock samples were scanned with a 3D scanner and tested for wear resistance at 100, 500, and 1,000 rotations, mixed with scrap tires in proportions of 5%, 15%, and 25% by volume. In each rotation, the same sample was used for testing, alternating with scanning after the LAA test. The study found that increasing the proportion of scrap tires reduced ballast wear, with the cube-shaped scrap tires having the best effect on reducing wear. The rod and disk shapes were followed by the slab shapes. When the proportion of scrap tires increased to more than 15%, the decrease in wear depth was not significantly different. The morphology study with SHF showed that the shape of the scrap tires had a significant effect on the change in the physical characteristics of the stone particles, especially the angularity index (AI3D) and the surface texture index (MT3D), where the cube rubber scraps had the least change compared to the other shapes. In addition, the roughness radius of the cubic rubber scraps had the lowest value in all mixing ratios, indicating that the rubber scraps could effectively reduce the wear of the stones, especially when the rubber scraps ratio was 15%, which resulted in the least reduction in wear rate.

Keywords: Ballast, Scrap Tires, Morphology, Micro Scale

1. ที่มาและความสำคัญ

ระบบขนส่งทางรางในประเทศไทยได้รับการออกแบบให้มีอายุการใช้งานยาวนาน ทำให้การก่อสร้างและบำรุงรักษาต้องคำนึงถึงต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (life cycle cost) โดยเฉพาะชั้นหินโรยทาง (ballast) ซึ่งทำหน้าที่ถ่ายแรงและดูดซับพลังงานจากรถไฟลงสู่โครงสร้างทางรถไฟ ด้านทานแรงกระทำทั้งแนวตั้ง ด้านข้าง และแรงกระทำแนวยาว อย่างไรก็ตาม หินโรยทางมีแนวโน้มเสื่อมสภาพจากแรงกระทำซ้ำ ๆ [16,10] ทำให้ต้องมีการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีต้นทุนสูง

ในปัจจุบันมีการศึกษาวัสดุทางเลือก เช่น แผ่นรองใต้ราง (Under sleeper pad, USP) และวัสดุสังเคราะห์ต่าง ๆ เพื่อยืดอายุการใช้งานของหินโรยทาง แต่มีข้อจำกัดด้านต้นทุน ขณะเดียวกันเศษยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโยธาจำนวนมากในรูปแบบของมวลรวมที่ได้มาจากเศษยาง (tire-derived aggregates, TDA) เนื่องจากคุณสมบัติที่ได้เปรียบของ TDA ได้แก่ ความสามารถในการหน่วงพลังงานสูง (Energy damping) น้ำหนักต่อหน่วยต่ำและต้นทุนต่ำ จากการศึกษาที่ผ่านมาทำให้เกิดแนวความคิดในการที่จะนำเศษยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว (end-of-life tires) มาเป็นส่วนผสมเพื่อยืดอายุการใช้งานของหินโรยทาง [1,19,20,21] นอกจากจะช่วยยืดอายุการใช้งานแล้ว ยังเป็นการลดปัญหาขยะและเสนอทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม มีบางประเด็นที่ยังคงเป็นข้อถกเถียง เช่น ผลกระทบจากรูปร่างและขนาดของหินโรยทางที่มีต่อการเสื่อมสภาพและการเสีรูป รวมถึงการหาค่าเปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสมที่สุดของเศษยางรถยนต์

ดังนั้น การศึกษานี้จะนำเสนอรูปแบบของศึกษาการเสื่อมสภาพของหินโรยทางที่ผสมเศษยางรถยนต์ โดยการวิเคราะห์ความทนทานต่อการสึกหรอของหินที่ผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนและขนาดที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะแห้ง โดยใช้เครื่องทดสอบการสึกหรอ (Los Angeles Abrasion, LAA) และการวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาจากภาพสแกนสามมิติ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอนุภาคของหินโรยทางในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความหยาบในระดับพื้นผิว [14] ผลการศึกษานี้จะช่วยให้เข้าใจถึงอิทธิพลของรูปร่าง ขนาด และสัดส่วนของเศษยางรถยนต์ ที่ผสมในหินโรยทางต่อความทนทานต่อการสึกหรอ ซึ่งจะให้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานจริง ทั้งนี้ เพื่อเพิ่มความทนทาน ลดความเสียหายจากการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง ส่งผลให้โครงสร้างทางรางมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้นและมีต้นทุนการดำเนินงานที่คุ้มค่ามากกว่าเดิม

2. ทฤษฎีและวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

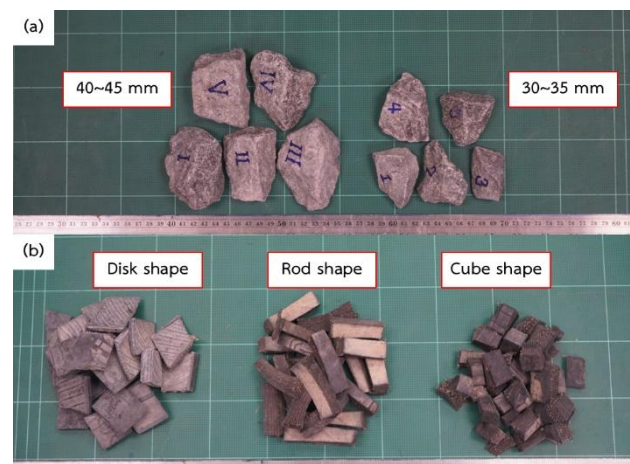
2.1.1 หินโรยทาง

หินโรยทาง (ballast) คือวัสดุหลักในส่วนล่างของโครงสร้างฐานทางรถไฟ ซึ่งอยู่ใต้หมอนรองรางรถไฟ ทำหน้าที่หลักในการถ่ายโอนน้ำหนักจากชั้นโครงสร้างส่วนบน (superstructure) กระจายน้ำหนักจากรางไปยังชั้นโครงสร้างฐานราก ลดแรงกระแทกจากขบวนรถ และเพิ่มเสถียรภาพให้ทางรถไฟ วัสดุที่ใช้เป็นหินแข็ง เช่น หินแกรนิต หินบะซอลต์ หินปูน เศษหิน และกรวด มีเหลี่ยมมุม มีการกระจายของขนาดสม่ำเสมอ (uniform grade) มีช่องว่างระหว่างอนุภาคหิน และมีความต้านทานต่อการขัดสี แต่บางครั้งอาจไม่ใช้หินเสมอไป อาจเป็นวัสดุใด ๆ ที่สามารถยึดหมอนรองรางกับรางไม่ขยับตามแรงกระทำของล้อ เช่น กากโลหะจากการถลุงเหล็ก (slag) ทราย (sand) ซีเมนต์ (cinder) อิฐหัก (crushed brick) กรวด (gravel)

จากรูปที่ 1a แสดงลักษณะอนุภาคของหินโรยทาง ที่ใช้ในการทดสอบเป็นหินโรยทางในโครงการการก่อสร้างทางรถไฟ สายเด่นชัย-เชียงใหม่ของช่วงงาน-เชียงใหม่ โรงโม่บัญชีกิจ อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงใหม่ โดยที่หินโรยทางขนาด 40-45 มม. จะร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 นิ้ว และค้ำตะแกรงขนาด 1.5 นิ้ว ส่วนหินโรยทางขนาด 30-35 มม. จะร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1.5 นิ้ว และค้ำตะแกรงขนาด 1 นิ้ว

2.1.2 เศษยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพ

ยางรถยนต์ส่วนใหญ่ทำมาจากวัสดุหลัก คือ ยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ ซึ่งมีคุณสมบัติยืดหยุ่นและทนทานทนทานต่อการสึกหรอ โดยยางที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้จะเป็นยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานแล้ว ลักษณะรูปร่างของยางรถยนต์ที่ใช้ทดสอบครั้งนี้จะใช้อยู่ 3 รูปทรง ได้แก่ รูปทรงแผ่น (disk) ที่มีขนาดประมาณ 3-4 ซม., รูปทรงแท่ง (rod) ที่มีขนาดประมาณ 6-7 ซม. และรูปทรงลูกบาศก์ (cube) ที่มีขนาดประมาณ 2-3 ซม. โดยจะทำการตัดยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพแล้วให้ได้ดังรูปทรงข้างต้น แสดงดังรูปที่ 1b



รูปที่ 1 อนุภาคหินโรยทางและเศษยาง a) ลักษณะอนุภาคของหินโรยทาง
b) ลักษณะอนุภาคของเศษยาง

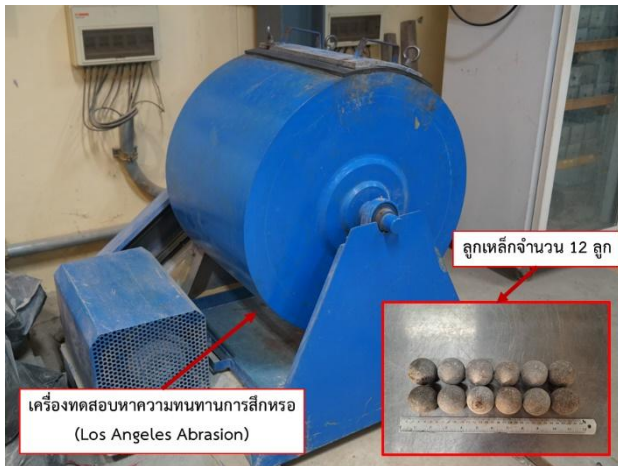
2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

2.2.1 เครื่องมือทดสอบความทนทานการสึกหรอ (Los Angeles Abrasion, LAA)

เครื่องมือที่ใช้ในการเร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทางของการวิจัยครั้งนี้ เป็นเครื่องทดสอบหาความทนทานการสึกหรอ (Los Angeles Abrasion) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยจะอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวงชนบท (Department of Rural Roads) ประเทศไทย (มทข.ท) 501.9-2545) ASTM C131 และ C535 [2,3] ซึ่งประกอบด้วยลูกเหล็กทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 46.8 มม. (1 27/32 นิ้ว) แต่ละลูกหนักระหว่าง 390-445 กรัม โดยจะใช้ลูกเหล็กจำนวน 12 ลูก น้ำหนัก $5,000 \pm 25$ กรัม เครื่องทดสอบหาความสึกหรอ LAA จะหมุนด้วยความเร็ว 30-33 รอบต่อนาที เมื่อพิจารณาความทนทานการสึกหรอสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$Loss(\%) = \frac{W_0 + W_i}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

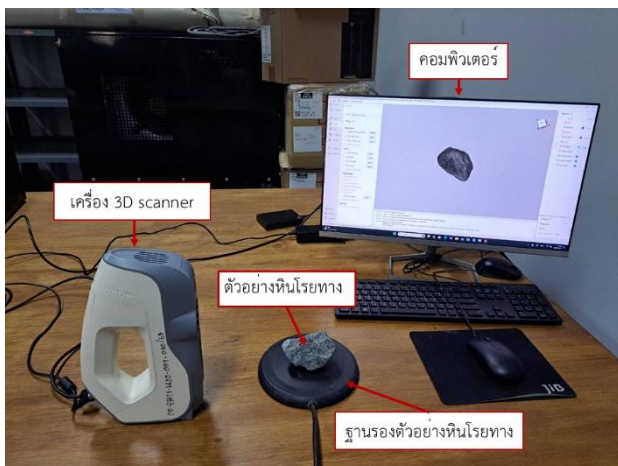
โดยที่ w_0 คือน้ำตัวอย่างทั้งหมด และ w_i คือน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 12



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบหาความทนทานการสึกหรอ (Los Angeles Abrasion)

2.2.2 เครื่องมือ 3D scanner

การศึกษานี้ใช้เครื่องมือ 3D scanner รุ่น Artec Eva แสดงดังรูปที่ 3 เป็นเครื่องสแกน 3D แบบมือถือที่มีความแม่นยำสูง ซึ่งเป็นเครื่องสแกนสามมิติที่สามารถจับภาพที่มีขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ด้วยความแม่นยำของจุด 3D ถึง 0.1 มม. และความละเอียดสูงสุดถึง 0.2 มม. โดยมีระยะการทำงานอยู่ที่ 0.4-1 ม. เป็นที่นิยมในงานสแกนวัตถุหลากหลายประเภท เช่น ชิ้นส่วนทางวิศวกรรม วัตถุโบราณ และแม้กระทั่งการสแกนร่างกายเพื่อการแพทย์ เป็นต้น



รูปที่ 3 เครื่องมือ 3D scanner

2.3 การเร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

ในงานวิจัยครั้งนี้จะใช้การทดสอบหาความทนทานการสึกหรอ (Los Angeles Abrasion, LAA) ร่วมกับการสแกนโดยกระบวนการทางภาพถ่าย 3 มิติ เพื่อการประเมินสันฐานวิทยาจากการสึกหรอของหินโรยทาง [8,6]

การศึกษานี้จะดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบหาความทนทานการสึกหรอ (LAA) เร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง ภายใต้สภาวะแห้ง โดยจะ

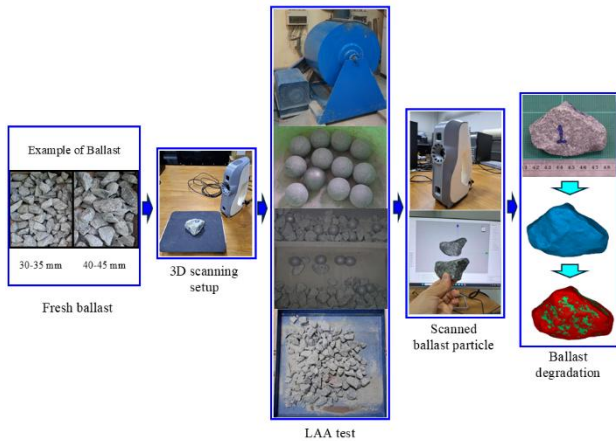
ศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนและขนาดที่ต่างกัน ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดการทดสอบ โดยในแต่ละรอบของการทดสอบจะใช้หินโรยทาง 10,000±75 กรัม ผสมกับรูปแบบเศษยางต่าง ๆ (ไม่ผสมเศษยาง, ทรงแผ่น, ทรงลูกบาศก์, และทรงแท่ง) ในอัตราส่วนร้อยละของเศษยางที่ต่างกัน ได้แก่ 0%, 5%, 15%, และ 25% โดยปริมาตร ซึ่งหนึ่งรอบการทดสอบจะใช้ตัวอย่างเดียวกันในการหาความทนทานการสึกหรอที่จำนวนรอบต่าง ๆ คือ 100, 500 และ 1,000 รอบ เพื่อศึกษาพัฒนาการการสึกหรอของรูปร่างที่เกิดจากกระบวนการเร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

ตาราง 1 รายการทดสอบการเร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

ตัวอย่าง	รูปแบบเศษยาง	ร้อยละของเศษยาง (%)	จำนวนรอบการทดสอบ
1	ไม่ผสมเศษยาง	0	100, 500, 1000
2	ทรงแผ่น	5	100, 500, 1000
3	ทรงแผ่น	15	100, 500, 1000
4	ทรงแผ่น	25	100, 500, 1000
5	ทรงลูกบาศก์	5	100, 500, 1000
6	ทรงลูกบาศก์	15	100, 500, 1000
7	ทรงลูกบาศก์	25	100, 500, 1000
8	ทรงแท่ง	5	100, 500, 1000
9	ทรงแท่ง	15	100, 500, 1000
10	ทรงแท่ง	25	100, 500, 1000

2.3.1 ขั้นตอนการทดสอบการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

ในการเตรียมตัวอย่างการทดสอบเร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง ขั้นตอนแรกเริ่มในการเตรียมวัสดุโดยการล้างตัวอย่างหินโรยทางด้วยน้ำเพื่อชะล้างสิ่งปนเปื้อนและลดฝุ่นที่เกิดขึ้น จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100±10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม. ปริมาณหินโรยทางที่ใช้ทดสอบ 10,000 กรัม โดยจะใช้หินโรยทางสองขนาด ดังนี้ หินขนาด 40-45 มม. ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผ่านตะแกรง 2 นิ้ว ค้างตะแกรง 1.5 นิ้ว และหินขนาด 30-35 มม. ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผ่านตะแกรง 1.5 นิ้ว ค้างตะแกรง 1 นิ้ว โดยจะใช้น้ำหนักขนาดละ 5,000±50 กรัม ก่อนจะเริ่มทำการทดสอบหาความทนทานการสึกหรอ LAA จะต้องทำการสุ่มเลือกหินตัวอย่างจำนวน 10 ก้อน ขนาดละ 5 ก้อน ในที่นี้คือ หินขนาด 40-45 มม. จำนวน 5 ก้อน และขนาด 30-35 มม. จำนวน 5 ก้อน เพื่อเป็นตัวแทนของการทดสอบรอบนั้นโดยจะนำหินตัวอย่างไปสแกนด้วยเครื่อง 3D สแกน ก่อนการทดสอบ หลังจากการสแกนเสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้วนั้น จะทำการพ่นสีให้กับตัวอย่างหินทั้งสองขนาดที่มีต่างกัน เพื่อให้สามารถระบุและแยกตัวอย่างหินหลังจากการทดสอบ LAA ได้ ในการทดสอบนี้จะใช้ลูกเหล็กจำนวน 12 ลูก น้ำหนัก 5,000±25 กรัม โดยเริ่มต้นจะทำการทดสอบ LAA ที่ 100 รอบ จากนั้นจะนำตัวอย่างหินที่สุ่มเลือกก่อนหน้าไปทำการสแกนอีกครั้งหลังจากทำการทดสอบ LAA ที่รอบการหมุน 100 รอบ ซึ่งจะทำให้การทดสอบ LAA สลับกับการสแกนจนครบรอบการทดสอบที่ 500 และ 1,000 รอบ แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ

2.4 การประเมินสัณฐานวิทยาจากการสักรหัสของหินโรยทาง ด้วยกระบวนการทางภาพถ่าย 3 มิติ

2.4.1 ฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical Harmonics Function, SHF)

ฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical Harmonics Function, SHF) คือ ส่วนเชิงมุมของผลเฉลยในระบบพิกัดทรงกลมของสมการ Laplace (Laplace equation) ฟังก์ชันนี้ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในกลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanics) การประมวลผลและวิเคราะห์ภาพโดยใช้คอมพิวเตอร์ (computer graphic) รวมถึงการทำแผนที่ทรงกลม (spherical mapping) การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกทรงกลมเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุชนิดเม็ด [5,17,18] ซึ่งสามารถใช้ในการวัดรูปร่างของอนุภาคแต่ละอนุภาคและวิเคราะห์การกระจายตัวของรูปร่างตัวอย่าง ข้อมูลนี้สามารถใช้เพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมของวัสดุชนิดเม็ดและออกแบบวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น [11,12]

SHF เป็นชุดฟังก์ชันยกตัวอย่างเช่น อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) ซึ่งโดยปกติจะอธิบายรูปร่างของอนุภาคในรูปแบบ 2 มิติ แต่ข้อดีของฟังก์ชันนี้จะอธิบายในรูปแบบ 3 มิติ โดยที่ฟังก์ชันเหล่านี้จะถูกกำหนดโดยฟังก์ชันของรัศมี $r(\theta, \varphi)$ ในพิกัดทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 5 สำหรับ SHF แต่ละฟังก์ชัน อนุภาคในรูปแบบ 3 มิติ สามารถแสดงแสดงรูปร่างทางคณิตศาสตร์โดยใช้พิกัดทรงกลมที่มีขนาดรัศมี $r(\theta, \varphi)$ จากจุดกำเนิดถึงจุดบนพื้นผิวของอนุภาคเป็นฟังก์ชันของมุมทิต (azimuthal angles, θ) และมุมเชิงขั้ว (polar angles, φ) ฟังก์ชันของรัศมี $r(\theta, \varphi)$

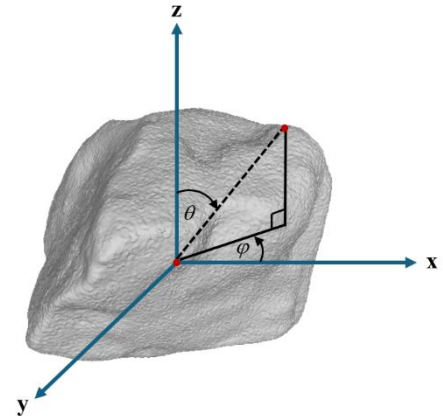
สำหรับการสร้างพื้นผิวของอนุภาคมวลรวมในรูปแบบ 3 มิติ โดย SHF สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2 และ 3 [13,15]

$$\begin{aligned} r(\theta, \varphi) &= \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l A_l^m Y_l^m(\theta, \varphi) \\ &\approx \sum_{l=0}^n \sum_{m=-l}^l a_l^m Y_l^m(\theta, \varphi) \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่ $r(\theta, \varphi)$ คือรัศมีเชิงขั้วของอนุภาค ซึ่งจากการเปลี่ยนระบบพิกัดฉากเป็นทรงกลม $\theta \in [0, \pi]$, $\varphi \in [0, 2\pi]$

$$Y_l^m(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{(2l+1)(l-m)!}{4\pi(l+m)!}} P_l^m(\cos \theta) e^{im\varphi} \quad (3)$$

$Y_l^m(\theta, \varphi)$ คือสัมประสิทธิ์ของ SHF ที่ระดับ l และลำดับ m ของฮาร์มอนิกทรงกลม ความละเอียดและความถูกต้องของการสร้างพื้นผิวของอนุภาคมวลรวมจะขึ้นอยู่กับระดับ l ($l_{\max}$ อยู่ในช่วง 15-30) [4,22,23]



รูปที่ 5 ระยะและมุมในพิกัดทรงกลม

ข้อได้เปรียบของ SHF อีกอย่างหนึ่งนั่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์สามารถนำมาใช้เพื่อคำนวณตัวระบุรูปร่างต่าง ๆ เช่น ดัชนีรูปร่าง 3 มิติ (3D form index) ในระดับมหภาค, ดัชนีความเป็นมุมแบบ 3 มิติ (3D angularity index) ในระดับปานกลาง และดัชนีพื้นผิวแบบ 3 มิติ (3D micro-texture index) ในระดับจุลภาค สำหรับการประยุกต์ใช้ SHF ในการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอนุภาคในระดับต่าง ๆ Masad et al. [13] และ Kutay et al. [11] ได้จำแนกระดับของฮาร์มอนิกทรงกลมเป็นช่วง ๆ โดยแสดงดังนี้

ดัชนีรูปร่าง 3 มิติ (3D form index)

$$FI_{3DN} = \sum_{l=1}^4 \sum_{m=-1}^l \frac{|A_l^m|}{A_0^0} \quad (4)$$

ดัชนีความเป็นมุมแบบ 3 มิติ (3D angularity index)

$$AI_{3DN} = \sum_{l=5}^{25} \sum_{m=-1}^l \frac{|A_l^m|}{A_0^0} \quad (5)$$

ดัชนีพื้นผิวแบบ 3 มิติ (3D micro-texture index)

$$MT_{3DN} = \sum_{l=26}^{30} \sum_{m=-1}^l \frac{|A_l^m|}{A_0^0} \quad (6)$$

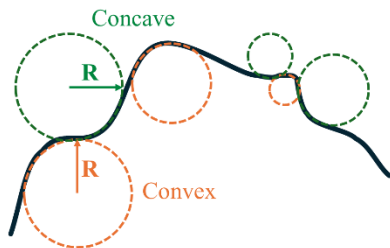
2.4.2 การวิเคราะห์ในระดับความขรุขระ

เพื่อศึกษารูปร่างในระดับความขรุขระ วิวัฒนาการของความโค้งในพื้นที่ (หรือส่วนกลับของรัศมีความขรุขระ) ถูกวิเคราะห์ สำหรับเส้นโค้ง 2D ความ

โค้งที่จุด point cloud ใด ๆ สามารถกำหนดเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นสัมผัส ซึ่งเทียบเท่ากับส่วนกลับของรัศมีของวงกลมที่พอดีที่สุดที่จุด point cloud [7]

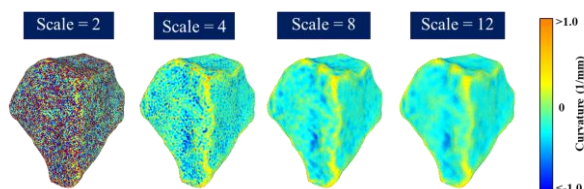
$$K = \frac{1}{R} \quad (7)$$

โดยที่ R คือรัศมีของวงกลม (รูปที่ 7) สำหรับพื้นผิวความโค้งมีความซับซ้อนในการกำหนด เนื่องจากจำเป็นต้องจับอัตราการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวจากระนาบสัมผัส แต่แนวคิดของทรงกลมที่พอดีที่สุด ซึ่งรัศมีคือส่วนกลับของความโค้ง ยังคงสามารถนำไปใช้ในการคำนวณความโค้งเฉลี่ยได้ แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 นิยามของความโค้งเป็นค่าผกผันของรัศมีวงกลม ณ จุดต่าง ๆ ของเส้นโค้ง

วิธีการนี้ถูกใช้โดยฟังก์ชันที่เรียกว่า Algebraic Point Set Surfaces ที่รวมอยู่ในแพ็คเกจ MeshLab มีพารามิเตอร์มาตราส่วน (scale) เป็นตัวปรับการคำนวณข้อมูลพื้นผิวโดยพิจารณาจากบริเวณข้างเคียงของแต่ละจุดบนพื้นผิว point cloud หรือ mesh model กล่าวคือ พารามิเตอร์มาตราส่วนจะกำหนดขนาดของพื้นที่รอบจุดที่ต้องการคำนวณ จากรูปที่ 7 จะแสดงการปรับมาตราส่วนของตัวกรองที่เปลี่ยนการคำนวณความโค้งข้างเคียงรอบตัวอย่างหินโรยทาง เมื่อพิจารณาจากการตรวจสอบด้วยสายตาของผลลัพธ์ของตัวกรองและขนาดของปลายหนูของบัลลาสต์ จึงได้เลือกมาตราส่วนที่ 8 ทั้งนี้เนื่องจากค่ามาตราส่วนในช่วง 6 และ 10 ใกล้เคียงกัน จึงให้ผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ [4]

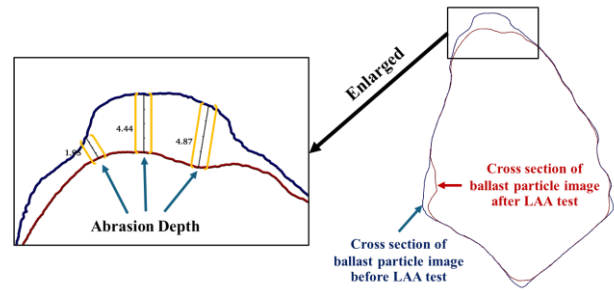


รูปที่ 7 การปรับเปลี่ยนมาตราส่วนตัวกรองของการคำนวณความโค้ง

3. ผลการศึกษา

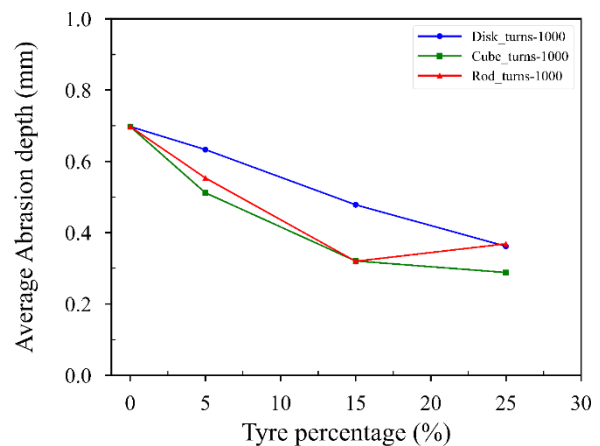
3.1 ผลการประเมินการสึกหรอด้วยภาพ 3 มิติ

ความลึกของการสึกหรอจะคำนวณโดยการเปรียบเทียบภาพทั้งสองภาพก่อนและหลังการทดสอบ LAA เพื่อให้ได้ค่าความแตกต่างที่คำนวณเป็นระยะทาง ซึ่งความแตกต่างของการสึกหรอนี้คำนวณโดยใช้ระยะทาง Hausdorff [9] ซึ่งเป็นหนึ่งในฟังก์ชันของ MeshLab ดังที่แสดงรูปที่ 8



รูปที่ 8 อธิบายการคำนวณความลึกของการสึกหรอ

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการสึกหรอเฉลี่ยกับเปอร์เซ็นต์ของเศษยางรถยนต์ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณเศษยางช่วยลดความลึกของการสึกหรอในหินโรยทางได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วง 0–15% อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของเศษยางเกิน 15% ไปจนถึง 25% อัตราการลดลงของค่าความลึกการสึกหรอกลับไม่แตกต่างกันนัก



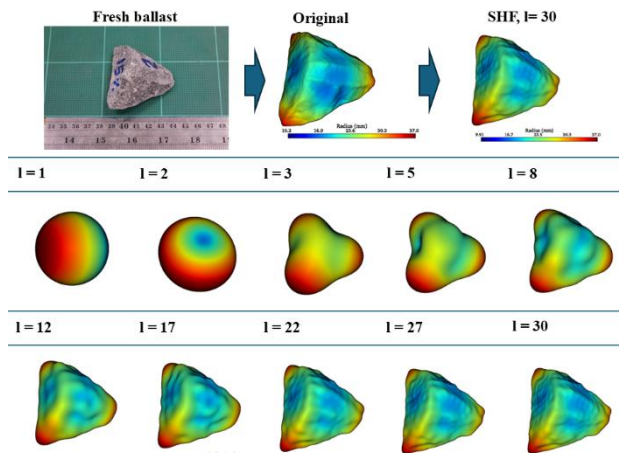
รูปที่ 9 ความลึกการสึกหรอเฉลี่ยของหินโรยทางในการทดสอบ LAA ที่ 1,000 รอบ

3.2 การวิเคราะห์ฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical Harmonics Function, SHF)

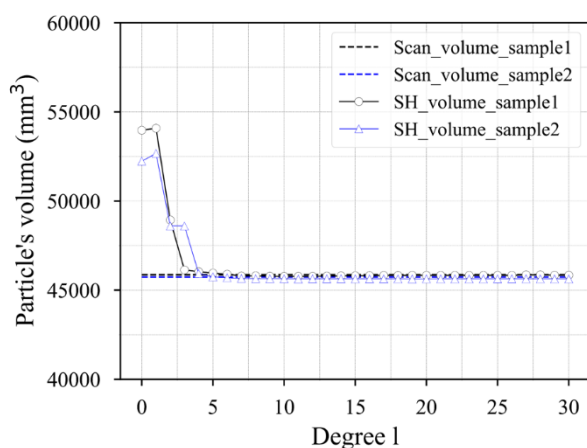
การวิเคราะห์ SHF จะถูกนำมาใช้เพื่อสร้างพื้นผิวของอนุภาคขึ้นใหม่ รูปที่ 10 แสดงตัวอย่างผลของการสะสมระดับ l ของฮาร์มอนิกทรงกลม ตั้งแต่ระดับ l=1 ถึง l=30 จะเห็นได้ว่า เมื่อระดับ l มีค่าน้อย โมเดลที่ได้จะมีลักษณะเป็นทรงกลมหรือรูปร่างที่มีความเรียบง่าย ขณะที่เมื่อค่าของระดับ l เพิ่มขึ้น รายละเอียดของพื้นผิวจะมีความซับซ้อนและใกล้เคียงกับโครงสร้างของอนุภาคต้นแบบมากขึ้น กระบวนการนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถของฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลมในการสร้างแบบจำลองของอนุภาคที่มีลักษณะไม่เป็นระเบียบและมีความซับซ้อนสูง โดยระดับของฟังก์ชันถูกกำหนดโดยพารามิเตอร์ l ซึ่งมีผลต่อความละเอียดและความถูกต้องของโมเดลที่สร้างขึ้น

รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบปริมาตรระหว่างอนุภาคที่ได้จากการสแกนและอนุภาคที่สร้างขึ้นใหม่โดยใช้ SHF ที่ระดับ l เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 30 พบว่า หาก l มีค่ามากกว่า 5 ความแตกต่างของปริมาตรระหว่างอนุภาคสแกนกับอนุภาคที่สร้างขึ้นจะน้อยกว่า 1% มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระดับ l เพิ่มขึ้น ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการเพิ่มค่า l ส่งผลให้อนุภาคที่สร้างขึ้นมีความใกล้เคียงกับอนุภาคต้นแบบมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อแสดง

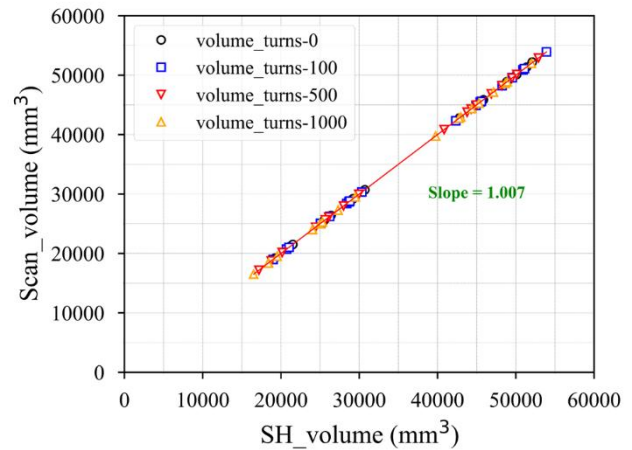
ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ของปริมาตรของอนุภาคสแกนกับอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ SHF แสดงดังรูปที่ 12 พบว่า ค่าความลาดชันของเส้นระหว่างผลลัพธ์ของปริมาตรที่ได้จากการวิเคราะห์ SH และอนุภาคสแกนอยู่ที่ 1.007 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 1 แสดงให้เห็นว่า อนุภาคที่สร้างขึ้นใหม่โดยใช้ SHF สามารถจำลองลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคสแกนได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 10 ตัวอย่างผลของการสะสมระดับ l ของฮาร์มอนิกทรานส์ฟอร์มตั้งแต่ระดับ $l=1$ ถึง $l=30$



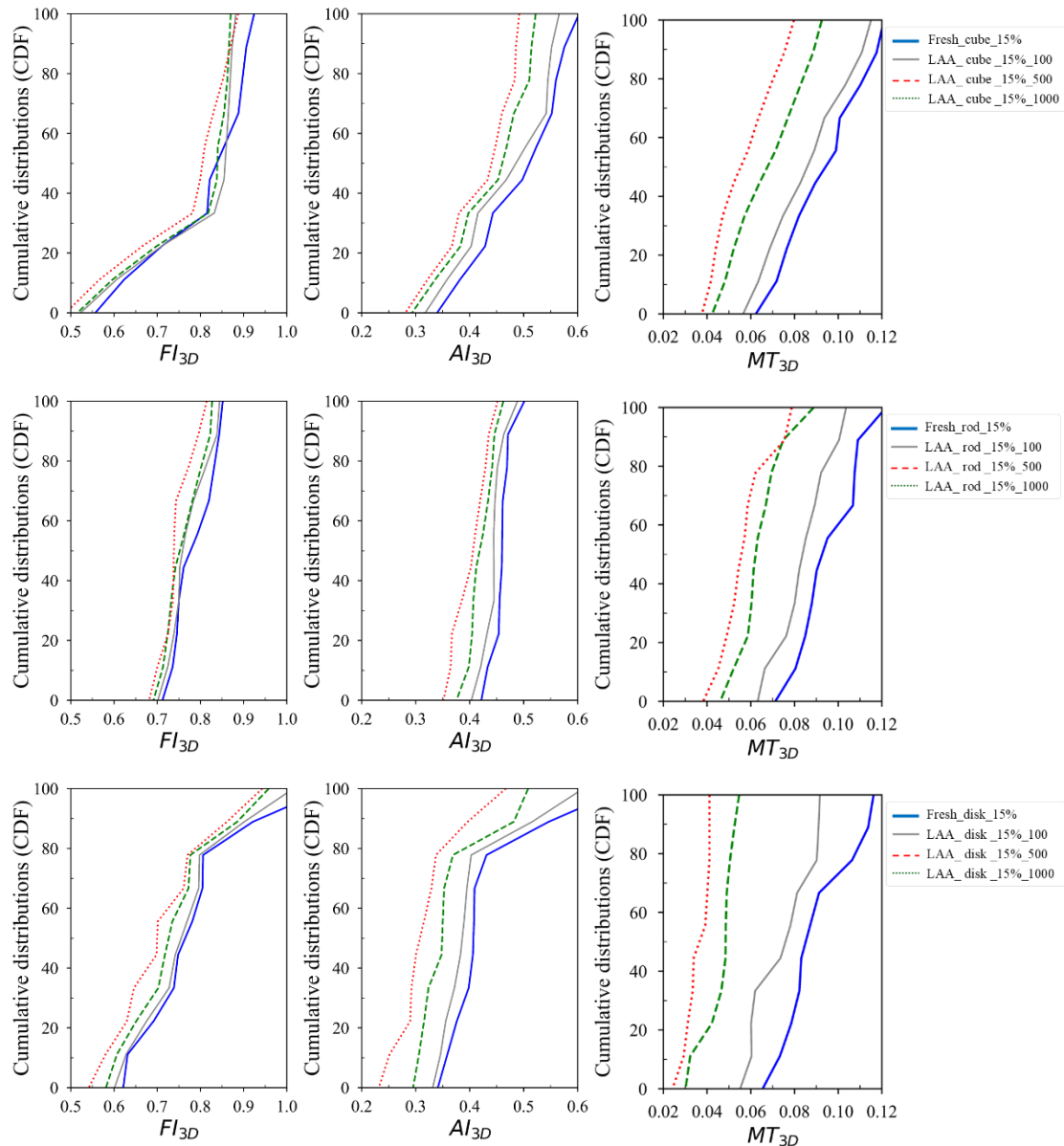
รูปที่ 11 การเปรียบเทียบปริมาตรระหว่างของอนุภาคสแกนและอนุภาคที่สร้างขึ้นใหม่โดย SHF ของระดับ l ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ของปริมาตรของอนุภาคสแกนกับอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ SHF

การสร้างพื้นผิวของอนุภาคหินโรยทางขึ้นใหม่โดย SHF สามารถใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคได้ 3 ระดับ ได้แก่ ดัชนีรูปร่าง 3 มิติ (3D form index: FI) ดัชนีความเป็นมุมแบบ 3 มิติ (3D angularity index: AI) และดัชนีพื้นผิวแบบ 3 มิติ (3D micro-texture index: MT) รูปที่ 13 แสดงการกระจายสะสม (Cumulative Distribution Function, CDF) ของดัชนีรูปร่าง (FI) ดัชนีความเป็นมุมแบบ (AI) และดัชนีพื้นผิวแบบ (MT) ที่คำนวณได้จาก 3 ขั้นตอนของการทดสอบ LAA ได้แก่ 0, 100, 500 และ 1,000 รอบ ของสัดส่วนและขนาดของยางที่แตกต่างกัน สังเกตได้ว่าค่า FI3D จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยสำหรับแต่ละอนุภาคตลอดกระบวนการทดสอบ LAA เนื่องจากรูปร่างโดยรวมของอนุภาคยังคงอยู่ แม้ว่าจะมีการเสียดสีและการสึกกร่อนเกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ แต่โครงสร้างหลักของอนุภาคยังไม่เปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ อนุภาคยังคงมีส่วนทางเรขาคณิตและลักษณะเชิงมิติที่ใกล้เคียงกับสภาพก่อนการทดสอบ อย่างไรก็ตาม ค่า AI3D และ MT3D มีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนรอบของการทดสอบเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคถูกกระแทกและเสียดสีซ้ำ ๆ ทำให้ขอบคมและพื้นผิวขรุขระค่อย ๆ ถูกขัดให้เรียบขึ้น ส่งผลให้รายละเอียดของพื้นผิวและความซับซ้อนของโครงสร้างจุลภาคลดลง เมื่อพื้นผิวของอนุภาคเริ่มสูญเสียความขรุขระและร่องลึกที่เคยมีมาก่อนหน้านี้ ความละเอียดของโครงสร้างก็ลดลงตามไปด้วย แม้ว่าโครงสร้างโดยรวมของอนุภาคจะยังคงอยู่ แต่การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับมุมและขอบจากแรงเสียดสีทำให้ค่าดัชนีเหล่านี้ลดลง เนื่องจากค่าดัชนี AI3D และ MT3D เป็นการคำนวณจากการวิเคราะห์ความเป็นเหลี่ยมมุมในระดับกลางและพื้นผิวในระดับจุลภาคทำให้ค่าที่ได้มีแนวโน้มลดลงตลอดช่วงของการทดสอบ

เมื่อพิจารณารูปร่างของยางทั้ง 3 รูปทรง พบว่า FI3D ที่ระดับรูปร่างของทรงแต่ละรูปทรงไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน และเมื่อพิจารณาที่ระดับความเป็นมุม (AI3D) จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างจากก่อนและหลังการทดสอบที่ชัดเจนขึ้น แต่อย่างไรก็ตามยังไม่เห็นความแตกต่างจะผลกระทบของรูปร่างยางแต่ละรูปแบบ แต่เมื่อพิจารณาถึงระดับพื้นผิว (MT3D) ของอนุภาค จะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างก่อนและหลังการทดสอบ 1,000 รอบ ของยางทรงลูกบาศก์น้อยกว่ายางทรงแท่งและทรงแผ่น ในทุกอัตราส่วนผสม รองลงมาคือ ยางทรงแท่ง และท้ายสุดคือ ยางทรงแผ่น

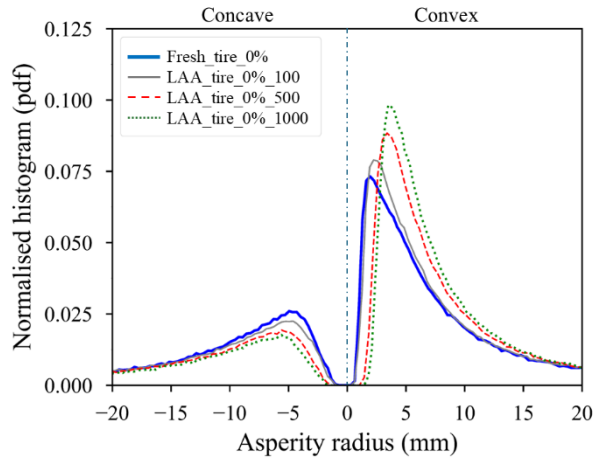


รูปที่ 13 การแจกแจงสะสม (CDF) ของดัชนี FI_{3D} , AI_{3D} และ MT_{3D} ที่ส่วนผสมเศษยาง 15

3.3 การวิเคราะห์การพัฒนาการของความโค้งและรัศมีความขรุขระในอนุภาคของหินโรยทาง

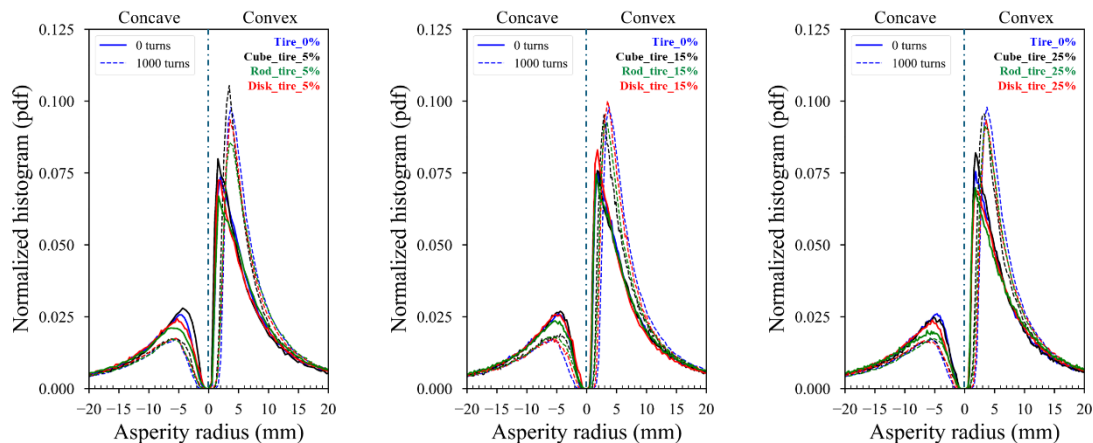
วิธีหนึ่งในการสังเกตการพัฒนาการของรัศมีความขรุขระตลอดการทดสอบคือการเปรียบเทียบแจกแจงความถี่ Normalized histogram (Probability Density Function, PDF) ของรัศมีความขรุขระก่อนและหลังการสึกหรอ โดยค่าลบแสดงถึงความขรุขระเว้า (concave) และค่าบวกแสดงถึงความขรุขระนูน (convex) รูปที่ 14 แสดงการเปลี่ยนแปลงของการแจกแจงความถี่ที่ปรับมาตรฐาน (Normalized histogram, PDF) ของรัศมีความขรุขระ ก่อนการทดสอบ (0 รอบ) และหลังการทดสอบ LAA ที่รอบการหมุน 100, 500 และ 1,000 รอบ ซึ่งสะท้อนถึงพัฒนาการของพื้นผิวหินโรยทางภายใต้กระบวนการสึกหรอ จากกราฟพบว่า ความถี่ของรัศมีความขรุขระเว้า (Concave asperity radii) มีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นผิวที่มีลักษณะเว้าจำเป็นต้องล้อมรอบด้วยลักษณะของความนูน เมื่อพื้นผิวโดยรอบเกิดการสึกหรอ ความเว้าก็จะลดลงโดย

อัตโนมัติ ส่งผลให้โครงสร้างของหินเปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่จำนวนรัศมีและค่ารัศมีความขรุขระนูนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดการทดสอบ เนื่องจากส่วนที่นูนของหินเป็นบริเวณที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมมากที่สุด ทำให้เกิดการกระแทกและขัดสีอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม บริเวณที่นูนเหล่านี้นักเป็นจุดอ่อนของหินโรยทาง เนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดเล็กและรับแรงกระทำโดยตรง เมื่อจำนวนรอบของการหมุนเพิ่มขึ้น ทำให้บริเวณโดยรอบได้รับการสัมผัสมากขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากการสึกหรอขยายกว้างมากขึ้น

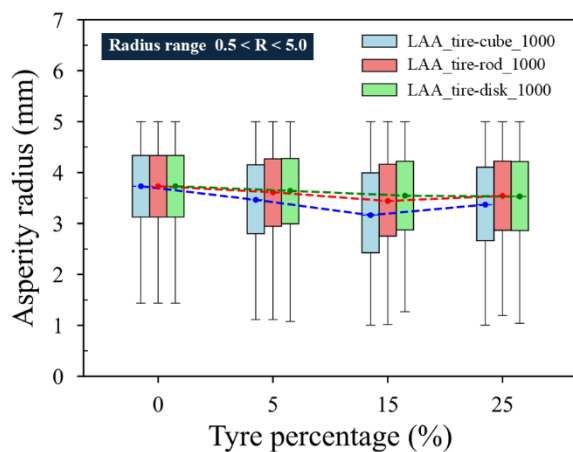


รูปที่ 14 รัศมีความขรุขระตัวอย่างหินโรยทางที่ไม่ผสมเศษยางสำหรับการทดสอบ LAA ที่ 0 100 500 และ 1,000 รอบการหมุน

รูปที่ 15 แสดงการเปลี่ยนแปลงของการแจกแจงความถี่ที่ปรับมาตรฐาน (Normalized histogram, PDF) ของรัศมีความขรุขระเทียบระหว่างยางทั้ง 3 รูปแบบ ที่ก่อนการทดสอบ และหลังการทดสอบ 1,000 รอบ จะเห็นได้ว่า



รูปที่ 15 การเปลี่ยนแปลงของการแจกแจงความถี่ที่ปรับมาตรฐานของรัศมีความขรุขระเทียบระหว่างยางทั้ง 3 รูปแบบ ที่ 0 และ 1,000 รอบ

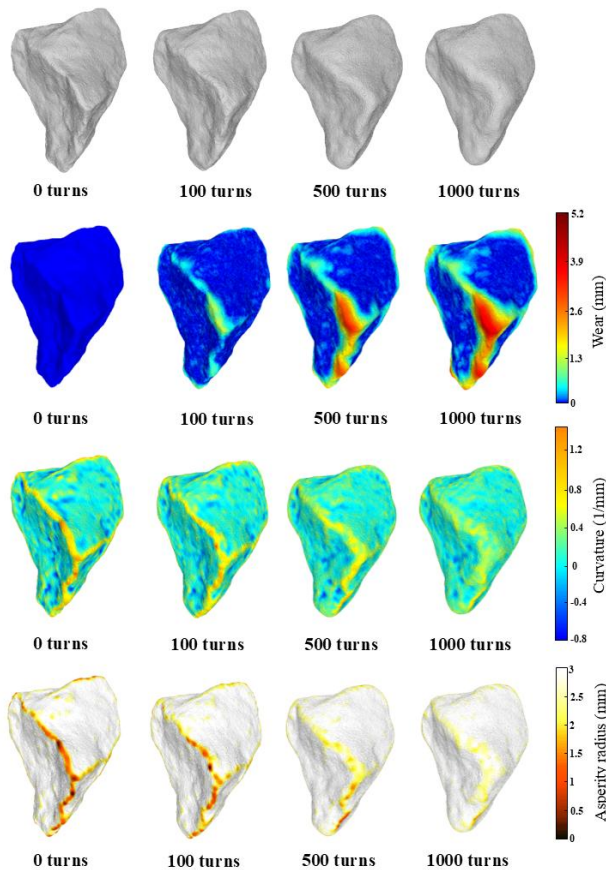


รูปที่ 16 การกระจายของรัศมีความขรุขระในช่วง 0.5 ถึง 5.0 มม. หลังจากการทดสอบ LAA ที่ 1,000 รอบ ที่สัดส่วนผสมของยางทั้ง 3 รูปแบบ

ความขรุขระบนที่รอบการหมุน LAA 1,000 รอบ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับค่าก่อนการทดสอบ LAA ทุกส่วนผสมของยาง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลรูปร่างของเศษยางทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าการทดสอบที่ผสมเศษยาง 5% รัศมีความขรุขระของการทดสอบ 1,000 รอบใกล้เคียงกับการทดสอบที่ไม่ผสมเศษยาง ในขณะที่ ส่วนผสมยาง 15 และ 25% จะเห็นความแตกต่างที่ชัดเจนมากขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากอนุภาคของวัสดุชนิดเดียวกันจะมีการกระจายของข้อมูลที่คล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณารัศมีความขรุขระที่ผสมเศษยางทั้ง 3 รูปแบบ จะเห็นได้ว่าตัวอย่างยางทรงลูกบาศก์มีแนวโน้มของค่ารัศมีความขรุขระที่น้อยกว่าตัวอย่างยางทรงอื่น ในทุกส่วนผสม และเมื่อพิจารณาการกระจายของรัศมีความขรุขระในช่วง 0.5 ถึง 5.0 มม. หลังจากการทดสอบ LAA ที่ 1,000 รอบ โดยพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนผสมของเศษยางทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าในส่วนผสมที่ใช้ยางทรงลูกบาศก์มีค่ารัศมีความขรุขระที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น นอกจากนี้ เมื่อใช้เศษยางในอัตราส่วน 15% พบว่าการเปลี่ยนแปลงของรัศมีความขรุขระที่น้อยที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมยางในสัดส่วนดังกล่าวสามารถช่วยลดการสึกหรอของหินได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงดังรูป 16

เมื่อได้กำหนดรัศมีความขรุขระซึ่งเป็นส่วนกลับของความโค้ง สำหรับจุดยอดของแต่ละอนุภาค สามารถเปรียบเทียบและติดตามพัฒนาการการสึกหรอของชุดอนุภาค ที่การทดสอบ 100, 500 และ 1,000 รอบ โดยใช้ตัวชี้วัด ค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature), และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) แสดงได้ดังรูปที่ 17 ในแถวแรกเป็นภาพ 3 มิติของหินที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างเมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มขึ้น แถวที่สองแสดงแผนที่สีแสดงค่าการสึกหรอ โดยสีน้ำเงินหมายถึงการสึกหรอน้อย ส่วนสีแดงหมายถึงการสึกหรอสูงสุด เห็นได้ว่าการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบ โดยเฉพาะที่ขอบและมุม ส่วนแถวที่สามแสดงแผนที่สีของค่ารัศมีความโค้ง บริเวณสีส้มแสดงส่วนที่นูน (ขอบและมุม) ส่วนสีฟ้าแสดงพื้นที่เว้า เมื่อรอบเพิ่มขึ้นพื้นที่นูนลดลงแสดงถึงการขัดของขอบและมุมให้มันขึ้น และสุดท้ายแสดงรัศมีความขรุขระ (asperity radius) ของพื้นผิว แผนที่สีของรัศมีความขรุขระ แสดงระดับความขรุขระของหิน พบว่า บริเวณขอบและมุมสึกเร็วขึ้น ทำให้ค่ารัศมีความขรุขระเพิ่มขึ้น หินจึงมีพื้นผิวเรียบขึ้นเรื่อย ๆ จากผลการวิเคราะห์ หินโรยทางมีการเปลี่ยนแปลงทั้งรูปร่างขอบและพื้นผิวอย่างชัดเจนเมื่อรอบการหมุนเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงกระบวนการ

เสื่อมสภาพของขอบและมุมของหินจากแรงกระแทกและการเสียดสีของเครื่อง LAA



รูปที่ 17 ตัวอย่างการพัฒนาการของหินโรยทางแสดงด้วยภาพ 3 มิติ

4. บทสรุป

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลของการผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนที่ต่างกัน (0%, 5%, 15%, และ 25%) และผลกระทบของรูปทรงเศษยาง (ลูกบาศก์, แท่ง, และแผ่น) ต่อการสึกหรอของหินโรยทางภายใต้การทดสอบ Los Angeles Abrasion (LAA) รวมถึงการประเมินการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอนุภาคผ่านการวิเคราะห์ภาพ 3 มิติ และฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical Harmonics Function, SHF) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของอนุภาคอย่างละเอียด

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเปอร์เซ็นต์เศษยางสามารถช่วยลดการสึกหรอของหินโรยทางได้ ในขณะที่ ขนาดรูปทรงของเศษยางนั้นมีอิทธิพลต่อการสึกหรอเพียงเล็กน้อยโดยที่ยางทรงลูกบาศก์ช่วยลดการสึกหรอได้ดีที่สุด รองลงมาคือทรงแท่ง และทรงแผ่น เมื่อเพิ่มจำนวนเปอร์เซ็นต์เศษยางมากกว่า 15% อัตราการลดลงของค่าความสึกหรอกลับไม่แตกต่างกัน

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้ SHF สร้างพื้นผิวของอนุภาคขึ้นใหม่ จากผลกระทบของการผสมเศษยางรูปทรงต่าง ๆ ในกระบวนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของหิน พบว่ารูปทรงของเศษยางมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของอนุภาคหินในระดับที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาดัชนีรูปร่าง (FI3D) พบว่าค่าดัชนีนี้ไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างเศษยางแต่ละรูปทรง อย่างไรก็ตาม เมื่อ

ตรวจสอบดัชนีความเป็นมุม (AI3D) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนก่อนและหลังการทดสอบ แต่ยังไม่สามารถสรุปถึงผลกระทบของรูปร่างเศษยางต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าดังกล่าวได้อย่างชัดเจน

ในด้านดัชนีพื้นผิว (MT3D) พบว่าหลังจากการทดสอบ LAA 1,000 รอบ เศษยางทรงลูกบาศก์มีการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีนี้น้อยกว่ายางทรงแท่งและทรงแผ่นในทุกอัตราส่วนผสม รองลงมาคือยางทรงแท่ง และสุดท้ายคือยางทรงแผ่น แสดงให้เห็นว่ารูปทรงของเศษยางอาจมีผลต่อการสึกหรอของอนุภาคหิน

จากการวิเคราะห์หัตถ์มีความขรุขระ พบว่าการทดสอบที่ใช้เศษยาง 5% มีค่าหัตถ์ความขรุขระหลังการทดสอบใกล้เคียงกับการทดสอบที่ไม่มีเศษยาง ขณะที่การใช้เศษยางในอัตราส่วน 15% และ 25% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ เศษยางทรงลูกบาศก์มีค่าหัตถ์ความขรุขระต่ำกว่ารูปทรงอื่น ในทุกอัตราส่วนผสม และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของหัตถ์ความขรุขระหลังการทดสอบ พบว่าอัตราส่วนเศษยาง 15% ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ซึ่งบ่งชี้ว่าในสัดส่วนนี้ เศษยางช่วยลดการสึกหรอของหินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ สัญญาเลขที่ N41A661185 และมหาวิทยาลัยพะเยาที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย (FF5022/2567) ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ เครื่องมือ และทรัพยากรที่จำเป็นต่อการดำเนินงาน รวมถึง บริษัท บัญชีกิจ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสนับสนุนหินโรยทางสำหรับการศึกษาในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] 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, 106435. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106435>
- [2] ASTM C131: ASTM International. (2014). Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine (ASTM C131-14). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0131-14>
- [3] ASTM C535: ASTM International. (2018). Standard test method for resistance to degradation of large-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine (ASTM C535-18). ASTM International.
- [4] Deiros Quintanilla, I., Combe, G., Emerault, F., Voivret, C., and Ferrellec, J.-F. (2019). X-ray CT analysis of the evolution of ballast grain morphology along a Micro-Deval test: key role of the asperity scale. *Granular Matter Conference*, 21, 30. <https://doi.org/10.1007/s10035-019-0881-y>
- [5] Feng, Z., Xu, W., and Lubbe, R. (2020). Three-dimensional morphological characteristics of particles in nature and its application for DEM simulation. *Powder Technology*, 364, 635–646. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.022>
- [6] Ge, H., Sha, A., Han, Z., and Xiong, X. (2018). Three-dimensional characterization of morphology and abrasion decay laws for

- coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 188, 58–67.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.110>
- [7] Goldman, R. (2005). Curvature formulas for implicit curves and surfaces. *Computers and Graphics*, 22(7), 632–658.
<https://doi.org/10.1016/j.cagd.2005.06.005>
- [8] Guo, Y., Markine, V., Qiang, W., Zhang, H., and Jing, G. (2019). Effects of crumb rubber size and percentage on degradation reduction of railway ballast. *Construction and Building Materials*, 212, 210–224.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.315>
- [9] Huttenlocher, D. P., Klanderman, G. A., and Rucklidge, W. J. (1993). Comparing images using the Hausdorff distance. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 15(9), 850–863.
<https://doi.org/10.1109/34.232073>
- [10] Indraratna, B., Salim, W., and Rujikiatkamjorn, C. (2013). *Advanced rail geotechnology - Ballasted track*. CRC Press.
- [11] Kutay, M. E., Ozturk, H. I., Abbas, A. R., and Hu, C. (2011). Comparison of 2D and 3D image-based aggregate morphological indices. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(4), 421–431.
<https://doi.org/10.1080/10298436.2011.575137>
- [12] Liang, H., Shen, Y., Xu, J., and Shen, X. (2021). Multiscale three-dimensional morphological characterization of calcareous sand particles using spherical harmonic analysis. *Frontiers in Physics*, 9, 744319.
<https://doi.org/10.3389/fphy.2021.744319>
- [13] Masad, E., Saadeh, S., Al-Rousan, T., Garboczi, E., and Little, D. (2005). Computations of particle surface characteristics using optical and X-ray CT images. *Computational Materials Science*, 34(3), 406–424.
<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2005.01.010>
- [14] Mitchell, J. K., and Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- [15] Paixão, A., and Fortunato, E. (2021). Abrasion evolution of steel furnace slag aggregate for railway ballast: 3D morphology analysis of scanned particles by close-range photogrammetry. *Construction and Building Materials*, 267, 121225.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121225>
- [16] Selig, E. T., and Waters, J. M. (1994). *Track geotechnology and substructure management*. Thomas Telford Publishing.
- [17] Sun, Q., & Zheng, J. (2021). Realistic soil particle generation based on limited morphological information by probability-based spherical harmonics. *Computational Particle Mechanics Conference*, 8, 215–235. <https://doi.org/10.1007/s40571-020-00325-6>
- [18] Tan, Z., Guo, F., Leng, Z., Yang, Z., and Cao, P. (2024). A novel strategy for generating mesoscale asphalt concrete model with controllable aggregate morphology and packing structure. *Computers and Structures*, 296, 107315.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2024.107315>
- [19] Wu, M., Liu, F., Yang, J. (2023). Stress-strain-strength behavior of geosynthetic reinforced rubber-sand mixtures. *Acta Geotech* 18: 4835–4846. <https://doi.org/10.1007/s11440-023-01868-7>
- [20] Wu, M., Tian, W., Liu, F., Yang, J. (2023a). Seismic isolation effect of rubber-sand mixture cushion under different site classes based on a simplified analysis model. *Soil Dyn Earthq Eng* 166:107738.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107738>
- [21] Wu, M., Tian, W., Liu, F., Yang, J. (2023b). Dynamic behavior of geocell-reinforced rubber sand mixtures under cyclic simple shear loading. *Soil Dyn Earthq Eng* 164:107595. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107595>
- [22] Zhou, B., Wang, J., and Zhao, B. (2015). Micromorphology characterization and reconstruction of sand particles using micro X-ray tomography and spherical harmonics. *Engineering Geology*, 184, 126–137.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.11.009>
- [23] Zhou, B., Wang, J., and Zhao, B. (2018). Three-dimensional sphericity, roughness and fractal dimension of sand particles. *Geotechnique*, 68(1), 18–30.