

พฤติกรรมหน่วยแรงเฉือนของผิวสัมผัสระหว่างชั้นหินโรยทาง-ชั้นรองหินโรยทาง:
การศึกษาเบื้องต้นของฐานฐานวิทยาแบบ 3 มิติจากการสีกหรือของหินโรยทาง



ชัยณรงค์ ทรงศิริวงศ์

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

พฤษภาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

พฤติกรรมหน่วยแรงเฉือนของผิวสัมผัสระหว่างชั้นหินโรยทาง-ชั้นรองหินโรยทาง:
การศึกษาเบื้องต้นของสัณฐานวิทยาแบบ 3 มิติจากการสีกพรของหินโรยทาง



ชัยณรงค์ ทรงศิริวงศ์

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

พฤษภาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

BEHAVIOR OF BALLAST-SUB BALLAST INTERFACE: A PRELIMINARY STUDY OF 3D
MORPHOLOGICAL PARAMETERS OF BALLAST ABRASION



CHAINARONG SONGSIRIWONG

A Thesis Submitted to University of Phayao
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Master of Engineering Degree in Civil Engineering
May 2025

Copyright 2025 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

พฤติกรรมหน่วยแรงเฉือนของผิวสัมผัสระหว่างชั้นหินโรยทาง-ชั้นรองหินโรยทาง:
การศึกษาเบื้องต้นของสัญญาณวิทยาแบบ 3 มิติจากการสีกหระของหินโรยทาง

ของ ชัยณรงค์ ทรงศิริวงศ์

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวรรณ)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุริยาธ ปรอ้าย)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธเนศ ทองเดชศรี)

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ)

- เรื่อง:** พลุติกรรมหน่วยแรงเฉือนของผิวสัมผัสระหว่างชั้นหินโรยทาง-ชั้นรองหินโรยทาง:
การศึกษาเบื้องต้นของสัณฐานวิทยาแบบ 3 มิติจากการสีกหรือของหินโรยทาง
- ผู้วิจัย:** ชัยณรงค์ ทรงศิริวงศ์, วิทยานิพนธ์: วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2567
- อาจารย์ที่ปรึกษา:** รองศาสตราจารย์ ดร. สุริยา วุฒิชัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนศ ทอง
เดชศรี
- คำสำคัญ:** มุมการกอง, เศษยางรถยนต์, หินโรยทาง, ระดับจุลภาค, สัณฐานวิทยา

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันระบบการขนส่งทางรางเริ่มมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาระบบคมนาคมขนส่งในประเทศไทย หินโรยทางรถไฟเป็นองค์ประกอบสำคัญของโครงสร้างทางรถไฟ เมื่อผ่านการใช้งานช่วงเวลาหนึ่ง หินโรยทางรถไฟ (ballast) จะเสื่อมสภาพ ส่งผลต่อการกระจายตัว การทรุดตัว และการปนเปื้อนของวัสดุอนุภาคเล็ก งานวิจัยที่ผ่านมาได้พยายามหาแนวทางในการยืดอายุการใช้งานของชั้นหินโรยทาง โดยใช้วัสดุต่าง ๆ เช่น แผ่นรองใต้ราง (Under Sleeper Pad, USP) แผ่นใยสังเคราะห์ และโพลียูรีเทน โดยเฉพาะ USP ที่ได้รับความนิยมสูงสุด เนื่องจากช่วยลดการเสื่อมสภาพของหินโรยทางโดยทำให้การเชื่อมต่อระหว่างหมอนรองกับหินโรยทางมีความยืดหยุ่นมากขึ้น เพิ่มพื้นที่สัมผัสและช่วยกระจายน้ำหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าวัสดุเหล่านี้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่ก็มีข้อจำกัดด้านต้นทุนที่สูงขึ้นเช่นกัน แนวทางในการใช้วัสดุทางเลือกที่มีต้นทุนต่ำกว่า เช่น การผสมเศษยางรถยนต์ลงในชั้นหินโรยทาง จึงเป็นแนวคิดที่น่าสนใจ เศษยางสามารถช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น ลดแรงกระแทก และลดการแตกหักของหินโรยทาง นอกจากนี้ยังเป็นการนำของเสียจากอุตสาหกรรมยานยนต์กลับมาใช้ใหม่ ซึ่งช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการศึกษาการเสื่อมสภาพของหินโรยทางที่ผสมเศษยางรถยนต์ โดยวิเคราะห์ความทนทานต่อการสีกหรือในสัดส่วนและขนาดยางที่ต่างกัน ภายใต้สภาวะแห้ง และการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาระดับจุลภาคจากภาพการสแกน 3 มิติ อีกทั้งการศึกษานี้จะมุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาด้วยการนำเศษยางรถยนต์มาเป็นวัสดุผสมในหินโรยทาง โดยการทดสอบมุมการกองของหินโรยทางซึ่งสะท้อนถึงมุมเสียดทานภายใน (angle of repose) เป็นตัวบ่งชี้สำคัญที่แสดงถึงความสามารถในการต้านแรงเฉือนของหินโรยทาง การทดสอบใช้เศษยางรถยนต์ 3 รูปแบบ ได้แก่ ยางทรงลูกบาศก์ ทรงแท่ง และทรงแผ่น ตัวอย่างหินจะถูกลบด้วยเครื่องมือสแกน 3D และทดสอบความทนทานต่อการสีกหรือในรอบการหมุน 100, 500 และ 1,000 รอบ โดยผสมเศษยางในสัดส่วน 5%, 13% และ 20% โดยปริมาตร ในแต่ละรอบการหมุนจะใช้ตัวอย่างเดิมในการทดสอบสลับกับการสแกนหลังการทดสอบ LAA (Los Angeles Abrasion Test) จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มสัดส่วนของเศษยางช่วยลดการสีกหรือของหินโรยทางได้ โดยเศษยางทรงลูกบาศก์มีผลในการลดการสีกหรือได้ดีที่สุด รองลงมาคือทรงแท่ง และทรงแผ่น เมื่อเพิ่มสัดส่วนเศษยางมากกว่า 13% การลดลงของความถี่การสีกหรือกลับไม่แตกต่างกัน การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical Harmonics Function, SHF) พบว่ารูปทรงของเศษยางมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางกายภาพของอนุภาคหินอย่างชัดเจน โดยเฉพาะดัชนีความเป็นมุม (AI3D) และดัชนีพื้นผิว (MT3D) ซึ่งเศษยางทรงลูกบาศก์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทรงอื่น ๆ นอกจากนี้ รัศมีความขรุขระของเศษยางทรงลูกบาศก์ก็มีค่าต่ำที่สุดในทุกอัตราส่วนผสม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเศษยางสามารถลดการสีกหรือของหินได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเมื่อใช้เศษยางในอัตราส่วน 13% ที่ส่งผลให้อัตราการสีกหรือลดลงน้อยที่สุด ในส่วนของการศึกษามุมการกอง ดำเนินการทดสอบมุมการกองโดยใช้ท่อ PVC (Plastic Vinyl Chloride) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 เซนติเมตร และเติมหินลงไปด้วยความสูง 90 เซนติเมตร ท่อดังกล่าวถูกยกขึ้นด้วยเครน และสแกนกองหิน โดยใช้เครื่องมือสแกน FARO Focus 3D ผลการศึกษาพบว่า มุมการกองของหินโรยทางใหม่มีค่ามากกว่าหินโรยทางที่ผ่าน LAA ในทุกส่วนผสม นอกจากนี้ เศษยางรถยนต์ทรงลูกบาศก์ส่งผลให้มุมลาดเอียงมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือทรงแท่ง และทรงแผ่นตามลำดับ และเมื่ออัตราส่วนผสมของยางมากกว่า 13% มุมการกองของหินโรยทางจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด

Title: BEHAVIOR OF BALLAST-SUB BALLAST INTERFACE: A PRELIMINARY STUDY OF 3D MORPHOLOGICAL PARAMETERS OF BALLAST ABRASION

Author: Chainarong Songsiriwong, Thesis: M.Eng. (Civil Engineering), University of Phayao, 2024

Advisor: Associate Professor Dr. Suriyayut Pra-ai Co-advisor Assistant Professor Dr.Thanet Thongdetsri

Keywords: Angle of Repose, Tyre, Ballast, Micro Scale, Morphology

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 will deteriorate, affecting its distribution, subsidence, and contamination of small particle materials. Previous research has tried to find ways to extend the life of the ballast layer by using various materials such as Under Sleeper Pad (USP), Geotextile, and polyurethane. In particular, USP is the most popular because it helps reduce ballast deterioration by making the connection between the sleeper and the ballast more flexible, increasing the contact area, and helping to distribute weight effectively. Although these materials are highly effective, their high cost remains a limitation. Therefore, the approach of using alternative materials with lower cost, such as mixing scrap tyres into the ballast layer, is an interesting idea. Scrap tyres can help increase flexibility, absorb shock, and reduce ballast breakage. In addition, it is a way to reuse waste from the automotive industry, which helps reduce environmental impact in another way. This research presents a study on the deterioration of ballast mixed with scrap tyres by analyzing the wear resistance of ballast with different proportions and sizes of tyres under dry conditions and analyzing the micro scale morphology from 3D scanning images. In addition, this study will focus on solving the problem by using scrap tyres as a mixed material in ballast by testing the angle of repose of the ballast, which reflects the angle of internal friction, an important indicator of the shear resistance ability of ballast. The experiment used 3 types of tyre scraps: cube, rod and disk. The stone samples were scanned with a 3D scanner and tested for wear resistance at 100, 500 and 1,000 rotations by mixing 5%, 13% and 20% tyres scraps by volume. The same samples were used for each rotation and scanned after the Los Angeles Abrasion Test. The study found that increasing the proportion of tyre scraps reduced the wear of ballasts. The cube tyre scraps had the best effect on reducing wear, followed by rod and disk shapes. When the proportion of tyre scraps increased more than 13%, the reduction in wear depth was not significantly different. The spherical harmonics function (SHF) morphology study found that the shape of the tyre scraps 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 tyre scraps had the least change compared to the other shapes. In addition, the asperity radius of the cube tyre scraps was the lowest in all mixing ratios, indicating that the tyre scraps could effectively reduce the wear of the stones, especially when using 13% tyre scraps, which resulted in the least reduction in wear rate. In the study of angle of repose, the angle of repose test was conducted using plastic vinyl chloride (PVC) pipes with 30 cm inner diameter and 90 cm height. The pipes were lifted by crane and the angle of repose were scanned using FARO Focus 3D scanner. The results showed that the angle of repose of the fresh ballast was higher than that of the ballast that had undergone LAA testing in all mixes. In addition, the cube-shaped tyre waste resulted in the highest angle of repose, followed by the rod and disk-shaped ones, respectively. When the tyre ratio was more than 13%, the angle of repose of the ballast was significantly reduced.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.สุริยาจุธ ประอ้าย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาตลอดจนวิธีการแก้ปัญหาและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวรช์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ทองเดชศรี และดร.ปาลินี สุมิตสวรรค์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ อันเป็นประโยชน์ในการแก้ไขรูปแบบวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณการสนับสนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ สัญญาเลขที่ N41A661185 และมหาวิทยาลัยพะเยาที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย (FF5022/2567) ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยาที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ เครื่องมือ และทรัพยากรที่จำเป็นต่อการดำเนินงาน รวมถึงบริษัท บัญชากิจ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสนับสนุนทุนroyalสำหรับการศึกษาในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ รวมถึงสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่เป็นแรงใจและแรงสนับสนุนที่สำคัญตลอดระยะเวลาของการศึกษา ไม่ว่าจะเป็นคำแนะนำ กำลังใจ หรือความรักความเข้าใจที่มีให้เสมอมา โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่เหน็ดเหนื่อยและท้อแท้ พวกท่านคือพลังสำคัญ ที่ทำให้ข้าพเจ้ามีร่างกายและแรงใจในการก้าวเดินต่อไปจนสามารถดำเนินงานวิจัยฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงได้

ชัยณรงค์ ทรงศิริวงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	6
ขอบเขตของการวิจัย.....	6
แผนผังสรุปการดำเนินงานวิจัย	7
ประโยชน์ที่จะได้รับการจากการวิจัย.....	8
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
หินโรยทางและชั้นรองหินโรยทาง (ballast and subballast).....	9
สัณฐานวิทยาของวัสดุชนิดเม็ด.....	12
ฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical Harmonics Function, SHF).....	18
การประยุกต์ใช้เศษยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานมาใช้ในการวิศวกรรมธรณีเทคนิค.....	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	30
แนวทางการเร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง	32
การประเมินสัณฐานวิทยาจากการสึกกร่อนของหินโรยทางด้วยกระบวนการทางภาพถ่าย 3 มิติ ...	42
การศึกษามุมการกองของหินโรยทางที่ผสมเศษยางรถยนต์	52

บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	58
ผลการทดสอบการเร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง	58
ผลการประเมินลักษณะสัณฐานของหินโรยทาง	62
การวิเคราะห์ฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical Harmonics Function, SHF)	71
การวิเคราะห์การพัฒนาการของความโค้งและรัศมีความขรุขระในอนุภาคของหินโรยทาง.....	79
การวิเคราะห์มุมการกองของหินโรยทาง	92
บทที่ 5 บทสรุป	95
สรุปผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของหินโรยทาง	95
สรุปผลการศึกษามุมการกอง	96
อภิปรายผลการวิจัย	96
ข้อเสนอแนะ	97
บรรณานุกรม.....	99
ภาคผนวก.....	108
ภาคผนวก ก รัศมีความขรุขระของหินโรยทาง	109
ภาคผนวก ข ภาพ 3 มิติ แสดงการพัฒนาการของการสึกหรอ รัศมีความโค้ง และรัศมี ความ ขรุขระของหินโรยทาง.....	112
ประวัติผู้วิจัย.....	132

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ	7
ตาราง 2 เกณฑ์การคละขนาดอนุภาคของหินโรยทาง.....	11
ตาราง 3 ขอบเขตรูปแบบอนุภาค	16
ตาราง 4 เกณฑ์การจำแนกขนาดของยางแปรรูปตามที่กำหนดโดย ETRA (2013) และ ASTM D6270-08 (2012).....	26
ตาราง 5 มวลของตัวอย่างมวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดสอบหาส่วนคละ	33
ตาราง 6 คุณสมบัติของหินโรยทางและเศษยางที่เสื่อมสภาพ.....	36
ตาราง 7 การกำหนดน้ำหนักขนาดของตัวอย่างการทดสอบ LAA ของวัสดุหยาบ	38
ตาราง 8 จำนวนลูกเหล็กทรงกลมที่ใช้ในการทดสอบแต่ละชั้น	38
ตาราง 9 รายการทดสอบการเร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง.....	39
ตาราง 10 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ LAA.....	40
ตาราง 11 คุณสมบัติของกล้อง 3D FARO Focus M70	53
ตาราง 12 รายการทดสอบมุลาดเอียงของหินโรยทาง.....	55

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 แผนการพัฒนาาระบบรถไฟทางคู่ในประเทศไทย	2
ภาพ 2 ตัวอย่างของรูปแบบหน้าตัดของชั้นโครงสร้างพื้นฐานของโครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ เส้นทาง เด่นชัย-เชียงใหม่-เชียงใหม่.....	4
ภาพ 3 หินโรยทางรถไฟ (ballast)	4
ภาพ 4 ตัวอย่างยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานที่ถูกกองไว้ตามร้านเปลี่ยนยางทั่วไป ในต่างจังหวัด	6
ภาพ 5 วิธีการดำเนินการวิจัย	7
ภาพ 6 ตัวอย่างของชั้นโครงสร้างรางรถไฟ	10
ภาพ 7 (a) หินโรยทางใหม่ que แสดงความเป็นเหลี่ยมและมุม (b) หินโรยทางที่ใช้งานไปแล้ว.....	11
ภาพ 8 หินคลุกที่ใช้ในชั้นรองหินโรยทาง (subballast).....	12
ภาพ 9 ระดับการจำแนกคุณสมบัติรูปร่างของอนุภาค	13
ภาพ 10 ลูกบาศก์ที่มีขนาดด้านต่าง ๆ แตกต่างกันตามแนวแกน.....	14
ภาพ 11 แผนภาพสามแกน (ternary) สำหรับอธิบายรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ด	16
ภาพ 12 ความยาวลักษณะเฉพาะของอนุภาค: L (ยาว), I (กลาง) และ S (สั้น).....	17
ภาพ 13 แผนภาพของ Zingg.....	18
ภาพ 14 ระยะและมุมในพิกัดทรงกลม	19
ภาพ 15 การเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของมวลรวมที่มีระดับ SHF ต่างกันในการวิเคราะห์ ฮาร์มอนิก ทรงกลม	22
ภาพ 16 สัณฐานวิทยาของมวลรวมผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้จากการผลิตเหล็ก (steel slag) โดยที่ $l_{max}=30$	22
ภาพ 17 การจำแนกสัณฐานวิทยาของทรายที่ระดับ SHF แตกต่างกัน โดยที่ $l_{max} = 15$	23
ภาพ 18 ส่วนผสมของดินและเศษยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานในการศึกษาที่ผ่านมา.....	26
ภาพ 19 ตัวอย่างขนาดอนุภาคของเศษยาง	27

ภาพ 20 ตัวอย่างอิทธิพลของสัดส่วนและขนาดของอนุภาคทรายและเศษยางที่ส่งผลต่อ ความแข็งแรง และพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของส่วนผสม	29
ภาพ 21 แผนการดำเนินงานและกระบวนการทดสอบ	31
ภาพ 22 การตรวจสอบแร่ของหินโรยทาง.....	33
ภาพ 23 แผนภูมิการกระจายขนาดละเอียดเปรียบเทียบระหว่างหินโรยทางตัวอย่างกับเกณฑ์ การละเอียดของอนุภาคของหินโรยทาง	34
ภาพ 24 (a) หินโรยทางรถไฟจากโรงโม่บัญชากิจ อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย (b) ยางรถยนต์ ที่เสื่อมสภาพ.....	35
ภาพ 25 อนุภาคหินโรยทางและเศษยาง (a) ลักษณะอนุภาคของหินโรยทาง (b) ลักษณะอนุภาคของเศษยาง	35
ภาพ 26 แผนภูมิการกระจายขนาดละเอียดของเศษยาง.....	36
ภาพ 27 เครื่องทดสอบหาความทนทานการสึกหรอ (Los Angeles Abrasion)	37
ภาพ 28 แผนการประเมินสัญญาณวิทยาจากการสึกหรอของหินโรยทาง ด้วยกระบวนการ ทางภาพถ่าย 3 มิติ	43
ภาพ 29 เครื่องมือ 3D scanner รุ่น Artec Eva	44
ภาพ 30 แสดงแผนภาพกระบวนการสร้างแบบจำลองภาพถ่ายสามมิติ	45
ภาพ 31 แสดงความละเอียดของตัวอย่างการสแกน 3 มิติ (a) อนุภาคตัวอย่าง (b) อนุภาคสแกน (c) เพิ่มความคมชัดของพื้นผิว	45
ภาพ 32 นิยามของความโค้งเป็นค่าผกผันของรัศมีวงกลม ณ จุดต่าง ๆ ของเส้นโค้ง.....	46
ภาพ 33 แสดงการปรับเปลี่ยนมาตราส่วนตัวกรองของการคำนวณความโค้ง	47
ภาพ 34 ตัวอย่างการกำหนดความยาวลักษณะเฉพาะสำหรับอธิบายอนุภาคของหินโรยทาง: a (ยาว), b (กลาง) และ c (สั้น)	48
ภาพ 35 แผนผัง flowchart การขึ้นรูปสัญญาณวิทยา 3 มิติ โดยใช้สมการฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical Harmonics)	50
ภาพ 36 แผนผัง flowchart การขึ้นรูปสัญญาณวิทยา 3 มิติ โดยคำนวณดัชนีระนาบรูปร่างต่าง ๆ Fl_{3DN} Al_{3DN} และ MT_{3DN}	51

ภาพ 37 กล้อง 3D Laser scanner FARO Focus	53
ภาพ 38 การทดสอบมุมลาดเอียง	55
ภาพ 39 มุมมองด้านข้างสองมิติของการวัดมุม	56
ภาพ 40 การวัดมุมทั้ง 8 ด้านในการทดสอบมุมการกอง	57
ภาพ 41 เปอร์เซ็นต์การสีกหรือ LAA เทียบกับจำนวนรอบการหมุน	60
ภาพ 42 ผลกระทบของเศษยางแต่ละรูปแบบต่อการสีกหรือของหินโรยทาง	61
ภาพ 43 อธิบายการคำนวณความลึกของการสีกหรือ	63
ภาพ 44 พัฒนาการความลึกการสีกหรือของอนุภาคหินโรยทางหนึ่งอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ ภาพ 3 มิติ.....	63
ภาพ 45 ตัวอย่างอนุภาคของหินโรยทางก้อนที่แตกหัก.....	64
ภาพ 46 ความลึกของการสีกหรือโดยเฉลี่ยของหินโรยทางที่อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ของเศษยางรถยนต์..	65
ภาพ 47 ลักษณะรูปร่างของเศษยางรถยนต์	66
ภาพ 48 แผนภาพสามแกน (ternary) แสดงรูปร่างของตัวอย่างเศษยางรถยนต์.....	66
ภาพ 49 การวิเคราะห์อนุภาคของหินโรยทางระยะยาว (a) กลาง (b) และสั้น (c).....	67
ภาพ 50 แผนภาพสามแกน (ternary) ของตัวอย่างหินโรยทางก่อนและหลังการทดสอบ LAA.....	69
ภาพ 51 กราฟแสดงค่าดัชนีค่าความแบนเรียบ (F) ความยาว (E) และความเป็นลูกบาศก์ หรือทรง กลม (C)	70
ภาพ 52 ตัวอย่างผลของการสะสมระดับ l ของฮาร์มอนิกทรงกลมตั้งแต่ระดับ $l=1$ ถึง $l=30$	71
ภาพ 53 การเปรียบเทียบปริมาตรและพื้นที่ผิวระหว่างของอนุภาคสแกนและอนุภาคที่สร้างใหม่ โดย SHF ของระดับ l ที่เพิ่มขึ้น	73
ภาพ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ของปริมาตรและพื้นที่ผิวของอนุภาคสแกนกับอนุภาคที่ได้ จาก การวิเคราะห์ SHF	74
ภาพ 55 การสร้างใหม่ของ SHF ของอนุภาคหินโรยทาง 2 ตัวอย่าง ในช่วงขอบเขตของระดับ ฮาร์มอนิก ทรงกลมที่แตกต่างกัน.....	75
ภาพ 56 การกระจายสะสม (CDF) ของดัชนี FI3D, AI3D และ MT3D กรณีไม่ผสมยาง	77

ภาพ 57 การกระจายสะสม (CDF) ของดัชนี FI3D, AI3D และ MT3D ส่วนผสมยางทรงลูกบาศก์...	77
ภาพ 58 การกระจายสะสม (CDF) ของดัชนี FI3D, AI3D และ MT3D ส่วนผสมยางทรงแท่ง.....	78
ภาพ 59 การกระจายสะสม (CDF) ของดัชนี FI3D, AI3D และ MT3D ส่วนผสมยางทรงแผ่น	79
ภาพ 60 Normalized histogram (Probability Density Function: PDF) ของรัศมี ความขรุขระ ตัวอย่างหินโรยทางที่ไม่ผสมเศษยางสำหรับการทดสอบ LAA ที่ 0 100 500 และ 1,000 รอบการหมุน	80
ภาพ 61 การเปลี่ยนแปลงของการแจกแจงความถี่ที่ปรับมาตรฐานของรัศมี ความขรุขระ เทียบระหว่าง ยางทั้ง 3 รูปแบบ ที่ 0 และ 1,000 รอบ.....	83
ภาพ 62 แสดงการกระจายของรัศมี ความขรุขระในช่วง 0.5 ถึง 5.0 มม. ก่อนและ หลังการทดสอบ 1,000 รอบ ที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ	84
ภาพ 63 การกระจายของรัศมี ความขรุขระในช่วง 0.5 ถึง 5.0 มม. หลังจากการทดสอบ LAA ที่ 1,000 รอบ ที่สัดส่วนผสมของยางทั้ง 3 รูปแบบ.....	85
ภาพ 64 ภาพ 3 มิติ วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของหินโรยทางที่ใช้ในการทดสอบ Los Angeles Abrasion (LAA) ค่าการสึกหรอ (wear), รัศมีความโค้ง (curvature) และรัศมี ความขรุขระ (asperity Radius)	87
ภาพ 65 การแจกแจงความถี่ (Normalised Histograms : PDF) 2 มิติ ระหว่างความโค้ง ของพื้นผิว เทียบกับการสึกหรอ	91
ภาพ 66 มุมลาดเอียงของหินโรยทางที่ได้จากการประมวลผลด้วยภาพ 3 มิติ	92
ภาพ 67 การกระจายของมุมการกองของหินโรยทางกับร้อยละเศษยางในสัดส่วนผสมต่าง ๆ	94
ภาพ 68 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการกองของหินโรยทางกับร้อยละเศษยางในแต่ละสัดส่วนผสม ...	94

บทที่ 1

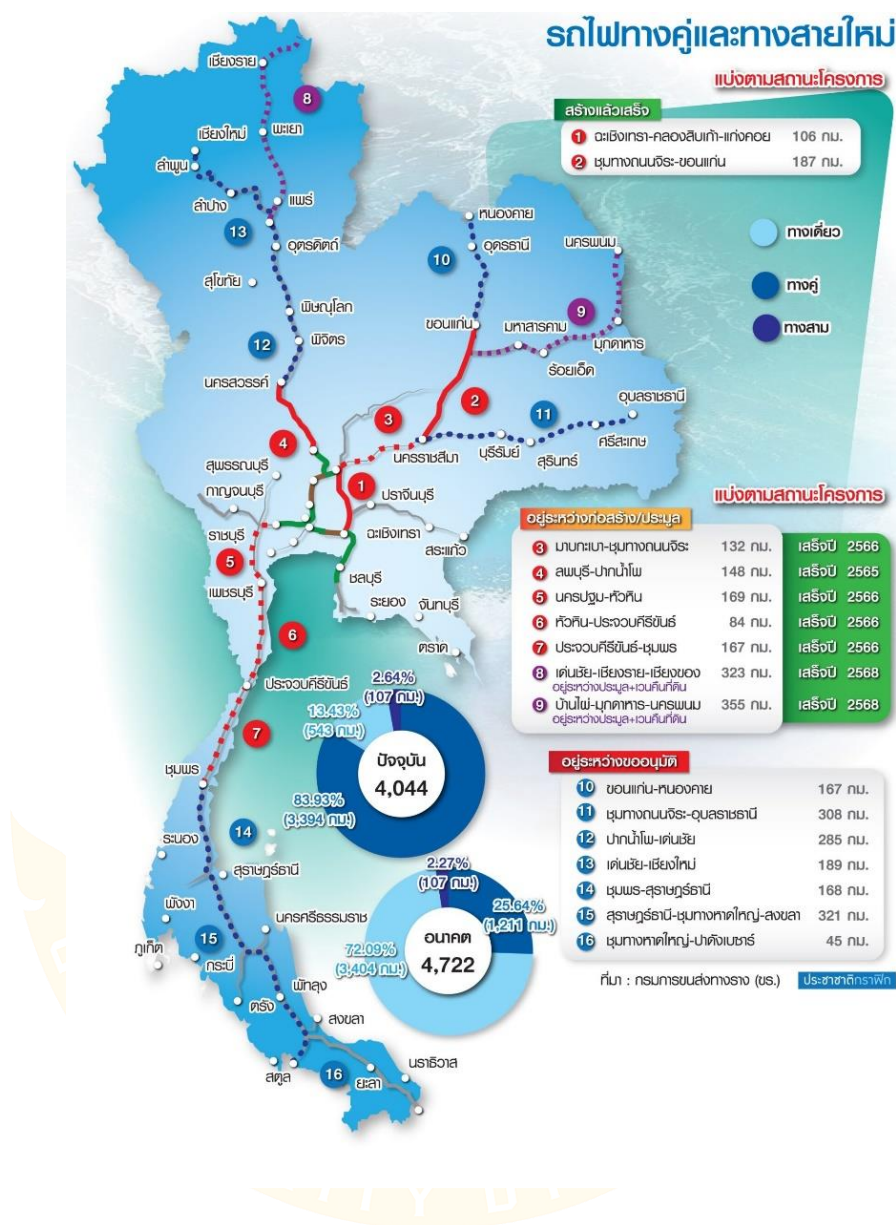
บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยได้กำหนดยุทธศาสตร์การพัฒนาระบบคมนาคมขนส่งระยะ 20 ปี (พ.ศ. 2561–2580) โดยมุ่งเน้นการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน เพื่อสร้างความสามารถในการแข่งขัน พัฒนาคุณภาพชีวิต และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และกำหนดให้ระบบรางเป็นแกนกลางในการเดินทางและขนส่งของประเทศ โดยที่การพัฒนาทางคู่ของประเทศไทยสามารถสรุปได้ดังในภาพ 1 จะพบว่าประเทศไทยมีความยาวของรางรถไฟทั้งในปัจจุบันรวมทั้งในอนาคตอันใกล้นี้รวมมากกว่า 3,000 กิโลเมตร หินโรยทางรถไฟ (Ballast) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของโครงสร้างทางรถไฟ (Rail track) อยู่ชั้นใต้โครงสร้างทางรถไฟ (Substructure) จากหมอนรองรถไฟ (Sleeper) หินโรยทางรถไฟเป็นวัสดุหินแข็งที่คงทน มีความเป็นเหลี่ยมมุม ระบายน้ำได้ดี มีขนาดอนุภาคกระจายตั้งแต่ 20 มม. ถึง 65 มม. (Hudson et al., 2016) มีความต้านทานแรงอัดดี ทำหน้าที่ถ่ายแรงและดูดซับพลังงานจากรางรถไฟลงสู่โครงสร้างทางรถไฟ ด้านทานแรงกระทำทั้งแนวตั้ง (uplift) ด้านข้าง (lateral forces) และแรงกระทำแนวยาว (longitudinal forces) ในทางปฏิบัติวิศวกรผู้ออกแบบมักจะออกแบบให้ชั้นหินโรยทาง วางอยู่เหนือชั้นรองหินโรยทาง (sub-ballast) ที่อัดแน่น ซึ่งหน้าที่หลักของชั้นรองหินโรยทาง คือ เป็นตัวส่งและกระจายน้ำหนักจากรางรถไฟและหมอนรองราง (sleeper) ทำให้ระดับความเค้นที่ส่งไปยังชั้นดินด้านล่างลดลง (Selig and Waters, 1994; Indraratna, et al., 2013)

ภาพที่ 2 แสดงตัวอย่างของรูปแบบหน้าตัดของชั้นโครงสร้างพื้นฐาน (substructure) ของโครงการก่อสร้างรถไฟรางคู่เส้นทางเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของที่กำลังดำเนินการก่อสร้างในขณะนี้ ซึ่งจะประกอบไปด้วยชั้น ballast วางอยู่ด้านบนชั้น sub-ballast และชั้นดินรองพื้นทาง (subbase) ประสิทธิภาพของโครงสร้างรางรถไฟ (track substructure) ภายใต้สภาวะการใช้งานส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับสมรรถนะของผิวสัมผัสต่าง ๆ ของชั้นโครงสร้างดังกล่าว (ยกตัวอย่างเช่น ผิวสัมผัสระหว่าง ballast-subballast ผิวสัมผัสระหว่างชั้น subballast-subgrade) โดยทั่วไป ชั้น subballast มักจะประกอบไปด้วยวัสดุที่เป็นส่วนผสมของทรายและกรวดหรือหินคัดเกรดเพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุมวลหยาบของชั้น ballast และชั้นดินเดิมแทรกซึมเข้าไประหว่างกันและกัน (Trani and Indraratna, 2010) ด้วยหลักการทำงานดังกล่าว ชั้น subballast จะทำหน้าที่เป็นตัวกรองและชั้นแยกซึ่งจะต้องมีการซึมผ่านได้มากพอเพื่อที่จะป้องกันไม่ให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินและสามารถช่วยระบายน้ำออกจากชั้นทาง ภายใต้หน่วยแรงแบบวัฏจักรที่มากกระทำกับชั้น substructure ที่เกิดจากรถไฟวิ่งผ่านไปมา วัสดุมวลหยาบของชั้นหิน

โรยทางจะค่อย ๆ เสื่อมสภาพและเริ่มสูญเสียกำลังรับแรงเฉือนรวมถึงความสามารถในการระบายน้ำ (Tutumler, et al., 2015; Ngo, et al., 2016)

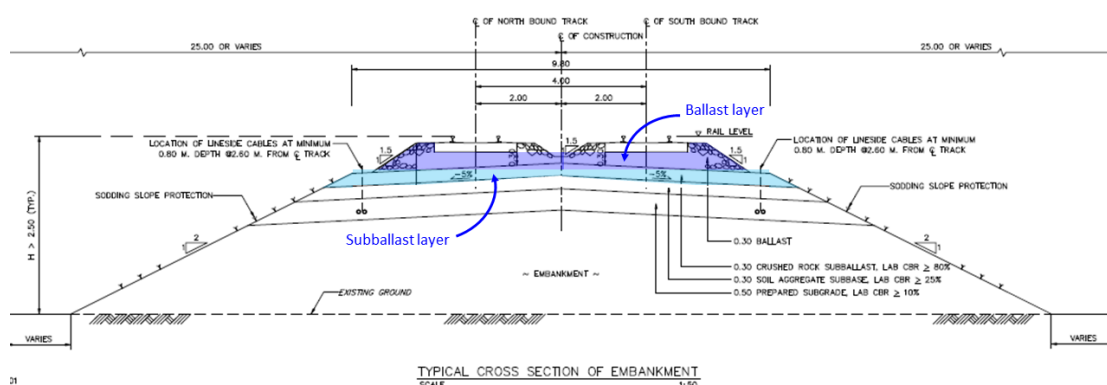


ภาพ 1 แผนการพัฒนาระบบรถไฟทางคู่ในประเทศไทย

ที่มา: ประชาชาติธุรกิจ, 2563, สื่อออนไลน์

การประเมินคุณสมบัติของหินโรยทางให้เหมาะสมกับการใช้งานในโครงสร้างทางรถไฟ จำเป็นต้องพิจารณาทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล โดยพฤติกรรมทางกายภาพสามารถทำความเข้าใจได้จากลักษณะรูปร่าง พื้นผิว และความเป็นเหลี่ยมมุมของหินโรยทาง ในขณะที่พฤติกรรมทางกลนั้น ศึกษาได้จากค่ากำลังและความต้านทานต่อการขัดสี ซึ่งการเข้าใจพฤติกรรมทางกลเหล่านี้ จะช่วยให้สามารถออกแบบและวางแผนการบำรุงรักษาระบบรางได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม เมื่อหินโรยทางถูกใช้งานไปในช่วงระยะเวลาหนึ่ง มักเกิดการเสื่อมสภาพตามธรรมชาติ อนุภาคของหินโรยทางจะเริ่มแตกหัก สูญเสียความเป็นเหลี่ยมมุม และมีลักษณะโค้งมนมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะการกระจายขนาดอนุภาค รวมถึงการเสีรูของชั้นหิน นอกจากนี้ ยังมีการปนเปื้อนของวัสดุขนาดเล็กที่แทรกซึมขึ้นมาจากชั้นพื้นทาง รวมถึงฝุ่นละอองที่ถูกพัดพาโดยลมหรือเกิดจากการแตกหักของหินโรยทางเอง สิ่งเหล่านี้ล้วนส่งผลให้ประสิทธิภาพในการระบายน้ำลดลง เกิดการขังของน้ำภายในชั้นดิน และอาจนำไปสู่ปรากฏการณ์น้ำโคลนไหลย้อนกลับได้ (Indraratna, et al., 2018)

ยิ่งไปกว่านั้น ความเร็วของรถไฟที่เพิ่มขึ้นตามความต้องการหรือเทคโนโลยีอาจส่งผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างรางรถไฟ (track substructure) เพื่อหลีกเลี่ยงเหตุการณ์การตกรางของรถไฟ (derailment) จำเป็นจะต้องดำเนินการบำรุงรักษาบ่อยครั้ง ซึ่งไม่เพียงแต่จะมีค่าใช้จ่ายที่สูง แต่ยังทำให้การจราจรติดขัดอีกด้วย ตัวอย่างเช่น ในแต่ละปีงบประมาณสำหรับการบำรุงรักษา เฉพาะชั้น ballast งบประมาณดังกล่าวจะอยู่ที่ประมาณ 15-20% (Sweta and Hussaini, 2019) ในการปรับเปลี่ยนหรือก่อสร้างแต่ละครั้งจะใช้หินโรยทางในปริมาณมาก แต่ข้อมูลจากกรมอุตสาหกรรมการผลิตและเหมืองแร่พบว่าประเทศไทยมีอัตราการใช้หินในงานก่อสร้างสูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณการผลิตมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ในปี 2560 ปริมาณการผลิตลดลงถึง 16.9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสวนทางกับปริมาณความต้องการใช้หินที่สูงขึ้น เช่นในปี 2557 ใช้ประมาณ 7.4 ล้านลูกบาศก์เมตร แต่ในปี 2560 ใช้ถึง 28.8 ล้านลูกบาศก์เมตร มีความต้องการใช้หินก่อสร้างสูงขึ้นประมาณปีละ 20 ล้านตัน ด้วยผลจากแผนพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของประเทศที่เกิดขึ้นพร้อมกันหลายอย่าง โดยเฉพาะระบบขนส่งทางรางที่มีงบประมาณการลงทุนสูงสุด ทำให้ความต้องการหินที่ได้มาตรฐานในปริมาณที่มากขึ้น อีกทั้งในด้านกฎหมายและสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้แหล่งผลิตปัจจุบันมีกำลังการผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการในการวิจัยที่ผ่านมาจึงมีการศึกษาวัสดุต่าง ๆ เพื่อยืดอายุการใช้งานของหินโรยทาง เช่น แผ่นรองใต้ราง (under sleeper pad, USP) แผ่นใยสังเคราะห์ และโพลียูรีเทน โดยเฉพาะการใช้ USP ซึ่งได้รับความนิยมสูงสุด เนื่องจากสามารถลดการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง โดยการทำให้การเชื่อมต่อระหว่างหมอนรองกับหินโรยทางมีความนุ่มขึ้น ส่งผลให้เพิ่มพื้นที่สัมผัสและช่วยกระจายน้ำหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่า USP และโพลียูรีเทนจะมีประสิทธิภาพสูง แต่ก็มีข้อจำกัดเนื่องจากต้นทุนที่สูง



ภาพ 2 ตัวอย่างของรูปแบบหน้าตัดของชั้นโครงสร้างพื้นฐานของโครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่
เส้นทางเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ



ภาพ 3 หินโรยทางรถไฟ (ballast)

ปัจจุบันปริมาณสะสมของยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งาน (end-of-life tyres) เริ่มส่งผลกระทบต่อการใช้ชีวิตของผู้คนเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอันตรายที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การเสื่อมสภาพของตัวยางรถยนต์ในระยะยาว ซึ่งสังเกตได้ในประเทศกำลังพัฒนาและประเทศที่พัฒนาแล้วเนื่องจากการใช้ยานพาหนะอย่างแพร่หลาย วิธีการจัดการยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานเหล่านี้แบบดั้งเดิม เช่น การฝังกลบหรือการกองสะสม (ดังภาพ 4) พบว่าเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและมีความยุ่งยากในเรื่องค่าใช้จ่าย การรีไซเคิลยางเป็นกระบวนการเปลี่ยนยางที่หมดอายุการใช้งานหรือของเสียที่ไม่ต้องการให้เป็นวัสดุที่สามารถนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์หรือการใช้งานใหม่ ๆ โดยทั่วไปแล้ว

ยางที่หมดอายุการใช้งานจะกลายเป็นตัวเลือกสำหรับการรีไซเคิล เมื่อไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไป เนื่องจากการสึกหรอหรือความเสียหาย และไม่สามารถนำไปดอกลงใหม่หรือเสาะร่องใหม่ได้อีกต่อไป ปัญหาดังกล่าวที่เกี่ยวข้องกับการจัดการยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานได้กระตุ้นการวิจัยและการประยุกต์ใช้ยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานในแนวทางที่ยั่งยืนต่อสิ่งแวดล้อม ในรอบทศวรรษที่ผ่านมา เศษยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโยธา จำนวนมาก (Arachchige, et al., 2022; Indraratna, et al., 2021; Sánchez, et al., 2019) ในรูปแบบของมวลรวมที่ได้มาจากเศษยาง (tyre-derived aggregates, TDA) เนื่องจากคุณสมบัติที่ได้เปรียบของ TDA ได้แก่ ความสามารถในการหน่วงพลังงานสูง (energy damping) น้ำหนักต่อหน่วยต่ำและต้นทุนต่ำ โดยทั่วไปมวลรวมที่ได้มาจากเศษยางสามารถแบ่งออกได้สองประเภทสำหรับใช้ในงานวิศวกรรมโยธา: I) ประเภท A และ II) ประเภท B (ASTM A., 2017) โดยที่ประเภท A มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 12 ถึง 305 มม. ในขณะที่มวลรวมที่ได้มาจากเศษยางประเภท B มีขนาดอนุภาคสูงสุด (D_{max}) 450 มม. จากการศึกษาที่ผ่านมาทำให้เกิดแนวความคิดในการที่จะนำเศษยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว (end-of-life tyres) มาเป็นส่วนผสมเพื่อยืดอายุการใช้งานของหินโรยทาง (Wu, et al. 2021; Arachchige, et al., 2022) นอกจากจะช่วยยืดอายุการใช้งานแล้ว ยังเป็นการลดปัญหาขยะและเสนอทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม มีบางประเด็นที่ยังคงเป็นข้อถกเถียง เช่น ผลกระทบจากรูปร่างและขนาดของหินโรยทางที่มีต่อการเสื่อมสภาพและการเสีรูป รวมถึงการหาค่าเปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสมที่สุดของเศษยางรถยนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิเคราะห์ในระดับพื้นผิว (texture) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในระดับจุลภาค (micro scale) ดังนั้น การศึกษานี้จะนำเสนอรูปแบบของการเสื่อมสภาพของหินโรยทางที่ผสมเศษยางรถยนต์ โดยการวิเคราะห์ความทนทานต่อการสึกหรอของหินในสัดส่วนและขนาดที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะแบบแห้ง โดยใช้เครื่องทดสอบการสึกหรอ (Los Angeles Abrasion, LAA) และการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาในระดับพื้นผิวจากภาพที่ได้จากการสแกนสามมิติ รวมถึงการศึกษาผลกระทบของรูปร่างและอัตราส่วนผสมของเศษยางที่แตกต่างกันต่อมุมการกองของหินโรยทาง โดยการทดสอบมุมการกองของหินโรยทางซึ่งสะท้อนถึงมุมแรงเสียดทานภายในเป็นตัวบ่งชี้สำคัญที่แสดงถึงความสามารถในการต้านแรงเฉือนของหินโรยทาง ซึ่งจะช่วยเป็นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงการนำเศษยางมาใช้ในงานวิศวกรรมทางรถไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจะเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประเมินกำลังรับแรงเฉือนของหินโรยทางในอนาคต



ภาพ 4 ตัวอย่างยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานที่ถูกกองไว้ตามร้านเปลี่ยนยางทั่วไป
ในต่างจังหวัด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนและขนาดที่แตกต่างกันต่อความทนทานต่อการสึกหรอของหินโรยทาง
2. เพื่อประเมินอิทธิพลของส่วนผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนและขนาดที่แตกต่างกันต่อสัญญาณวิทยาของหินโรยทางในระดับจุลภาค (micro scale)
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนและขนาดที่แตกต่างกันต่อมุมการกองของหินโรยทาง

ขอบเขตของการวิจัย

1. ตัวอย่างของหินโรยทางที่นำมาศึกษาจะมาจากแหล่งผลิต อ.แม่จัน จ.เชียงราย ซึ่งเป็นหินแอนดีไซต์
2. การทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบไปด้วยการทดสอบ Los Angeles Abrasion เพื่อศึกษาการสึกหรอของตัวอย่าง และ 3D Scanner เพื่อตรวจสอบสัญญาณวิทยา และการทดสอบมุมการกองของหิน โดยทำการทดสอบในสภาพแห้ง (dry state)
3. เศษยางรถยนต์ที่ไม่ใช้แล้วทรงลูกบาศก์ (cube) ที่มีขนาดประมาณ 2-3 ซม. ทรงแผ่น (disk) ที่มีขนาดประมาณ 3-4 ซม. และทรงแท่ง (rod) ขนาด 6-7 ซม. ในสัดส่วนโดยปริมาตรร้อยละ 0, 5, 13 และ 20

ในโครงการวิจัยครั้งนี้มีแผนการดำเนินงานวิจัยตามขั้นตอนที่แสดงดังตาราง 1 โดยในเดือน เมษายน-กรกฎาคม พ.ศ. 2566 จะทำการดำเนินการศึกษารวบรวมข้อมูลและทบทวนวรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระหว่างเดือนมิถุนายน-พฤศจิกายน พ.ศ. 2566 จะดำเนินการจัดเตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุตัวอย่างสำหรับการทดสอบ เดือนสิงหาคม-มกราคม พ.ศ. 2567 ทำการทดสอบ หาคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ในเดือนตุลาคม-กรกฎาคม พ.ศ. 2567 จะทำการทดสอบการสึกหรอ LAA พร้อมกับการสแกนภาพ 3 มิติ จากนั้นในเดือนเมษายน-กันยายน พ.ศ. 2567 ทำการทดสอบมุมการกองของหินโรยทาง โดยช่วงเวลาของเดือนมิถุนายน-พฤศจิกายน พ.ศ. 2567 ทำการวิเคราะห์ เปรียบเทียบ และสรุปผลที่ได้จากการทดสอบ และในเดือนตุลาคม-มีนาคม พ.ศ. 2568 จะทำการจัดทำรูปเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์และเตรียมนำเสนอ

ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย

1. เกิดความเข้าใจผลกระทบของเศษยางรถยนต์ที่ใช้แล้วต่อการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง รถไฟ
2. แนวทางในการช่วยลดอายุการใช้งานของหินโรยทางรถไฟจากการใช้เศษยางรถยนต์ เป็นส่วนผสมในชั้นหินโรยทาง
3. แนวทางในการช่วยลดปัญหาขยะจากยางรถยนต์ ซึ่งส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นการนำ ทรัพยากรที่มีอยู่มาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่า

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โดยทั่วไประบบขนส่งทางรางจะถูกออกแบบให้มีอายุการใช้งานในระยะยาว ดังนั้นในการก่อสร้างใหม่หรือการบำรุงรักษาจึงมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานตลอดช่วงอายุ (life cycle cost) ในการบำรุงรักษาโดยทั่วไป เราจะให้ความสำคัญในด้านความปลอดภัย (safety) ความพร้อมใช้งาน (availability) และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (economy) เพื่อทำให้เกิดความเข้าใจคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างส่วนล่าง (substructure) นั่นคือตั้งแต่ชั้นหินโรยทางลงมาและจะทำให้สามารถคาดการณ์แนวโน้มการเสื่อมสภาพของหินโรยทางจากการใช้งาน ผลของการดำเนินการศึกษาในอดีตที่ผ่านมาจึงมีความสำคัญในการที่จะนำมาเป็นแนวทางในการดำเนินการหรือพัฒนาต่อไป

หินโรยทางและชั้นรองหินโรยทาง (ballast and subballast)

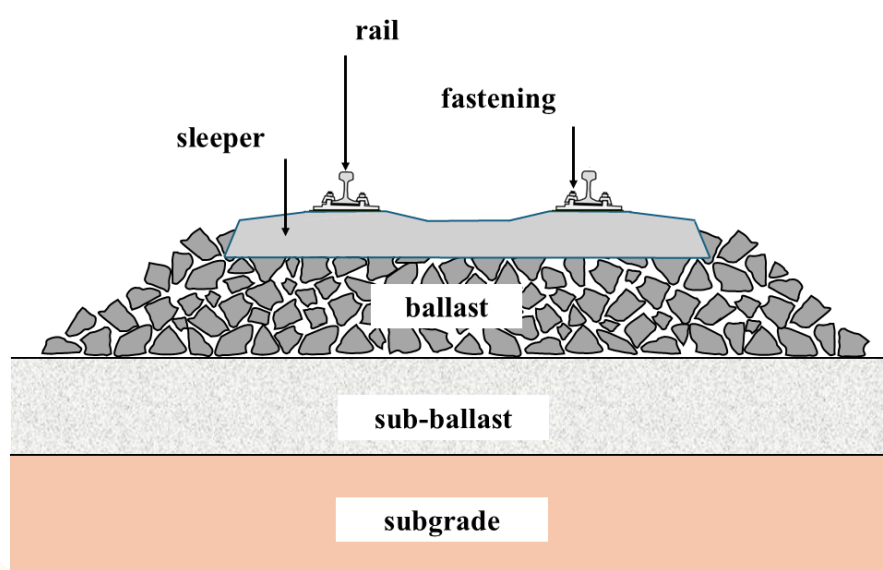
หินโรยทาง (ballast) คือวัสดุหลักในส่วนล่างของโครงสร้างฐานพื้นทางรถไฟ ซึ่งอยู่ใต้หมอนรองทางรถไฟ ทำหน้าที่หลักในการถ่ายโอนน้ำหนักจากชั้นโครงสร้างส่วนบน (superstructure) กระจายลงมา (ภาพ 6) เป็นโครงสร้างที่สำคัญของทางรถไฟ มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของทางรถไฟ วัสดุที่ใช้เป็นหินแข็ง เช่น หินแกรนิต หินบะซอลต์ หินปูน เศษหินและกรวด มีเหลี่ยมมุม มีการกระจายของขนาดสม่ำเสมอ (uniform grade) มีช่องว่างระหว่างอนุภาคหิน และมีความต้านทานต่อการขัดสี แต่บางครั้งอาจไม่ใช้หินเสมอไป อาจเป็นวัสดุใด ๆ ที่สามารถยึดหมอนรองรางกับรางไม่ขยับตามแรงกระแทกของล้อ เช่น กากโลหะจากการถลุงเหล็ก (slag) ทราย (sand) ขี้เถ้า (cinder) อิฐหัก (crushed brick) กรวด (gravel) คุณสมบัติเฉพาะของหินโรยทางจำเป็นจะต้องเป็นไปตามเกณฑ์คือ

1. ขนาดการคละกระจายและปราศจากการปนเปื้อนของเม็ดดินขนาดเล็กเพื่อให้มั่นใจว่ามีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีการระบายน้ำที่เหมาะสมของทางรถไฟ
2. เหลี่ยมมุมของหินที่คมจะทำให้เกิดความต้านทานแรงเฉือนที่ดีของชั้นหินโรยทาง
3. มีความต้านทานเชิงกลสูงต่อการสึกหรอเพื่อรักษามุมและลดการเกิดของอนุภาคเม็ดละเอียด

4. ความสม่ำเสมอของรูปร่าง ไม่ยาวหรือแบนเกินไป

การประเมินคุณสมบัติหินโรยทางให้เป็นไปตามโครงสร้างทางรถไฟนั้น จะประเมินจากคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล โดยพฤติกรรมทางกายภาพของหินวัสดุหินโรยทางนั้นสามารถทำความเข้าใจได้จากรูปร่าง (shape) พื้นผิว (texture) และความเป็นเหลี่ยมมุม (angularity) ดังแสดงในภาพ 7(a) ในขณะที่พฤติกรรมเชิงกลนั้นศึกษาจากกำลังและความต้านทานการขัดสี

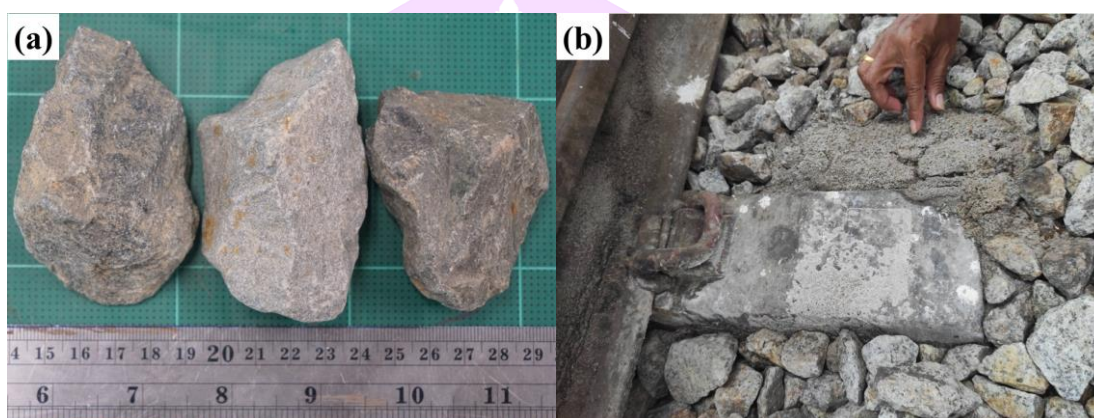
(Sadeghi, et al., 2016) การทำความเข้าใจพฤติกรรมเชิงกลของหินโรยทางนำไปสู่การออกแบบที่ดีขึ้น และการบำรุงรักษาอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อผ่านการใช้งานช่วงเวลาหนึ่ง หินโรยทางรถไฟ (ballast track) จะเกิดการเสื่อมสภาพ เกิดแตกหักของอนุภาคหินโรยทาง เกิดการเสีรูปร่าง ความเป็นเหลี่ยมมุม ลดลงและมีลักษณะโค้งมนมากขึ้น ส่งผลต่อการกระจายขนาดคละ เกิดการทรุดตัว และมีการปนเปื้อน ด้วยวัสดุอนุภาคเล็ก ทั้งจากชั้นพื้นทางแทรกขึ้นมา จากการพัดพาของลมหรือเศษหินจากการแตกหัก ของหินโรยทางเอง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพด้านการระบายน้ำลดลง เกิดการขังตัวของน้ำในดิน ยังจะ ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์น้ำโคลนไหลย้อนกลับได้ ดังแสดงในภาพ 7(b) (Indraratna, et al., 2018)



ภาพ 6 ตัวอย่างของชั้นโครงสร้างรางรถไฟ

สำหรับประเทศไทย ขนาดของหินโรยทางถูกกำหนดด้วยขนาดของตะแกรงร่อนคู่หนึ่งซึ่งมีขนาดช่องเปิดมีหน่วยวัดขนาดเป็นมิลลิเมตร หินโรยทางรถไฟที่นำมาทดสอบต้องสามารถร่อนผ่าน ตะแกรงขนาดใหญ่สุดและค้างอยู่บนตะแกรงขนาดเล็กสุด ให้ขนาดใหญ่สุดของหินโรยทางรถไฟเป็น 63 มม. หรือ 50 มม. และขนาดเล็กสุดเป็น 31.5 มม. (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2561) การทดสอบการคละขนาดของหินโรยทางรถไฟให้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C136 หินโรยทางรถไฟสามารถแบ่งออกเป็น 6 ขนาด ตามการคละขนาดอนุภาคของหินโรยทาง ตามตาราง 2 การทดสอบความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักของหินโรยทางให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C29 หากมิได้กำหนดเป็นอย่างอื่นให้พิจารณาเลือกใช้หินโรยทางรถไฟที่บดอัดตามมาตรฐาน ASTM C29 แล้วได้ความหนาแน่นรวม (bulk density) ไม่น้อยกว่า 1,200 กก./ม³

ในขณะที่ชั้นรองหินโรยทาง (sub-ballast) ส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุมวลรวมหินโมหรือหินคลุก (crushed rock soil aggregate type) ที่ใช้สำหรับการก่อสร้างถนน (ดูภาพ 8 ประกอบ) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นดินมวลหยาบ มีการลดขนาดอนุภาคที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการแทรกตัวของดินพื้นทางและป้องกันการแทรกตัวของหินโรยทางเข้ามาในชั้นรองหินโรยทาง การกำหนดการลดขนาดอนุภาคให้เป็นไปตามคู่มือการออกแบบและก่อสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง



ภาพ 7 (a) หินโรยทางใหม่ที่แสดงความเป็นเหลี่ยมและมุม (b) หินโรยทางที่ใช้งานไปแล้ว

ตาราง 2 เกณฑ์การลดขนาดอนุภาคของหินโรยทาง

ขนาดช่อง	หินโรยทางขนาด 31.5–50 มม.			หินโรยทางขนาด 31.5–63 มม.		
เปิดตะแกรง	เปอร์เซ็นต์ผ่าน โดยน้ำหนัก					
(มม.)	กลุ่ม หรือ ขนาด					
	A	B	C	D	E	F
80	100	100	100	100	100	100
63	100	97-100	95-100	97-99	95-99	93-99
50	70-99	70-99	70-99	65-99	55-99	45-70
40	30-65	30-70	25-75	30-65	25-75	15-40
31.5	1-25	1-25	1-25	1-25	1-25	0-7
22.4	0-3	0-3	0-3	0-3	0-3	0-7

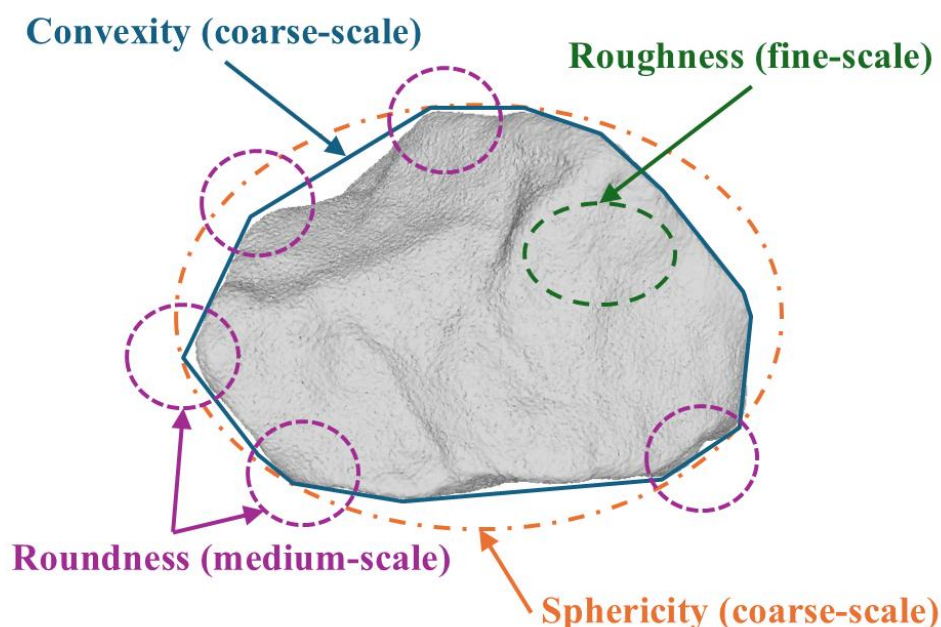
ที่มา: สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2561



ภาพ 8 หินคลุกที่ใช้ในชั้นรองหินโรยทาง (subballast)

สัณฐานวิทยาของวัสดุชนิดเม็ด

โดยทั่วไปในการอธิบายสัณฐานวิทยาของวัสดุชนิดเม็ดเรามักจะใช้ตัวแปรและคำจำกัดความต่าง ๆ สำหรับอธิบายตัวแปรเหล่านี้ ส่วนใหญ่ที่ใช้กำหนดลักษณะสัณฐานวิทยาจะถูกจัดประเภทหรือเรียงลำดับโดยใช้มาตราส่วนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความต้องการหรือขอบเขตของการศึกษา Mitchell and Soga (2005) ได้แบ่งระดับการจำแนกวัสดุชนิดเม็ดออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ รูปร่าง (form, ระดับมหภาค), ความเป็นเหลี่ยม (angularity, ระดับปานกลาง) และพื้นผิว (texture, ระดับจุลภาค) แสดงดังภาพ 9



ภาพ 9 ระดับการจำแนกคุณสมบัติรูปร่างของอนุภาค

ที่มา: Guo, et al., 2018

ในระดับมหภาค ความเป็นทรงกลมหรือลูกบาศก์ (sphericity or compactness) การยืดออกหรือความยาว (elongation) และความแบนเรียบ (flatness) โดยทั่วไปมักจะใช้อธิบายถึงรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ด ในระดับปานกลางจะเน้นที่การอธิบายความกลมของวัสดุชนิดเม็ด คือ ความเป็นเหลี่ยมมุม (angularity) และในระดับจุลภาคของวัสดุชนิดเม็ด ตัวแปรหลักที่ใช้ในการอธิบายพื้นผิว (surface texture) คือความหยาบ (roughness)

1. เทนเซอร์ในแนวพื้นผิว (surface orientation tensor, SOT)

สำหรับการอธิบายรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ดโดยการกำหนดลักษณะของวัสดุแต่ละก้อนนั้น ไม่ว่าจะเป็นความเป็นทรงกลม การยืดออก และความแบนเรียบ Orosz, et al. (2021) ได้อธิบายรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ดด้วยเทนเซอร์ในแนวพื้นผิว (Surface Orientation Tensor, SOT) โดยพิจารณาพื้นผิวหน้าเรียบของอนุภาคหลายเหลี่ยมที่มีทั้งความนูน (convex) หรือเว้า (concave) ซึ่งสามารถแสดงในรูปของที่มีเวกเตอร์พุ่งออกจากพื้นที่ผิวแต่ละด้านและถ่วงด้วยพื้นที่ผิวหน้าที่เวกเตอร์ ดังนั้น SOT จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ

$$f_{ij} = \frac{1}{\sum_{(k)} A^{(k)}} \sum_{(k)} (A^{(k)} n_i^{(k)} n_j^{(k)}) \quad (2.1)$$

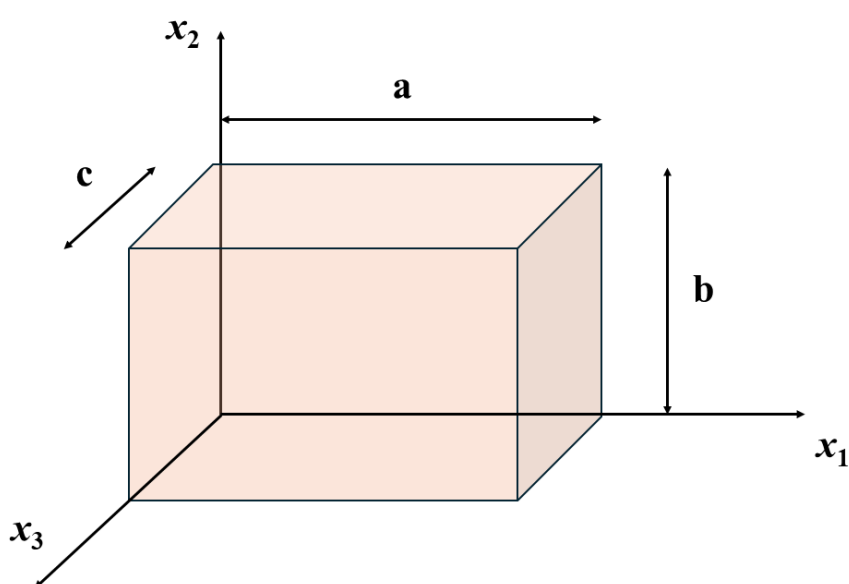
โดยที่ k คือจำนวนผิวหน้าของอนุภาค ในขณะที่ $A^{(1)}, A^{(2)} \dots A^{(k)}$ คือพื้นที่ของผิวหน้า และ $n^{(1)}, n^{(2)} \dots n^{(k)}$ คือเวกเตอร์ตั้งฉากในแต่ละผิวหน้า และกำหนดให้ค่าลักษณะเฉพาะ (eigenvalue) $f_1 \geq f_2 \geq f_3$ โดยที่ค่าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (eigenvector) ตัวแรก f_1 สะท้อนถึงการวางแนวที่อนุภาคส่วนใหญ่จะสัมผัสกับอนุภาคที่อยู่ใกล้กัน กรณีอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นแผ่นแบนเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะตัวแรก f_1 คือการวางแนวของเวกเตอร์ปกติของผิวด้านใหญ่ทั้งสองด้าน สำหรับรูปหลายเหลี่ยมปกติ (เช่น ลูกบาศก์) ค่าลักษณะเฉพาะทั้งสามค่าจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่อนุภาคที่มีรูปร่างเป็นแท่งยาวและบางมาก ๆ ค่าลักษณะเฉพาะที่น้อยที่สุด f_3 จะมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ และจากค่าลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถนำไปใช้สำหรับการกำหนดลักษณะของรูปแบบอนุภาคแต่ละขนาดได้ดังนี้

$$\text{ค่าความเป็นลูกบาศก์หรือทรงกลม (Compactness: C)} = \frac{f_3}{f_1} \quad (2.2)$$

$$\text{ค่าความแบนเรียบ (Flatness: F)} = \frac{f_1 - f_2}{f_1} \quad (2.3)$$

$$\text{ค่าความยาว (Elongation: E)} = \frac{f_2 - f_3}{f_1} \quad (2.4)$$

เพื่อให้่ายต่อความเข้าใจ ภาพ 10 จะแสดงอนุภาคในรูปของปริซึมลูกบาศก์และมีขนาดของระยะที่แตกต่างกันตามแนวแกน โดยที่ระยะ $a \geq b \geq c$ ลักษณะเฉพาะของพื้นผิวทั้งหมดด้านสามารถแสดงได้ดังนี้



ภาพ 10 ลูกบาศก์ที่มีขนาดด้านต่าง ๆ แตกต่างกันไปตามแนวแกน

พื้นผิวด้านซ้ายและขวา;

$$A_{right} = b \cdot c; \quad n_{right} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad A_{left} = b \cdot c; \quad n_{left} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

พื้นผิวด้านบนและล่าง;

$$A_{top} = a \cdot c; \quad n_{top} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad A_{bottom} = a \cdot c; \quad n_{bottom} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

พื้นผิวด้านหน้าและหลัง;

$$A_{front} = a \cdot b; \quad n_{front} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad A_{back} = a \cdot b; \quad n_{back} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

จากข้อมูลข้างต้น เทนเซอร์ในแนวพื้นผิวจะสามารถแสดงในรูป

$$f = \frac{1}{a \cdot b + a \cdot c + b \cdot c} \begin{bmatrix} b \cdot c & 0 & 0 \\ 0 & a \cdot c & 0 \\ 0 & 0 & a \cdot b \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

และจากสมการ (2.2)-(2.4) ตัวบ่งชี้ลักษณะของรูปแบบอนุภาคจะสามารถเขียนในรูปของ

$$\text{ค่าความเป็นลูกบาศก์หรือทรงกลม (Compactness: C)} = \frac{c}{a} \quad (2.9)$$

$$\text{ค่าความแบนเรียบ (Flakiness: F)} = 1 - \frac{c}{b} \quad (2.10)$$

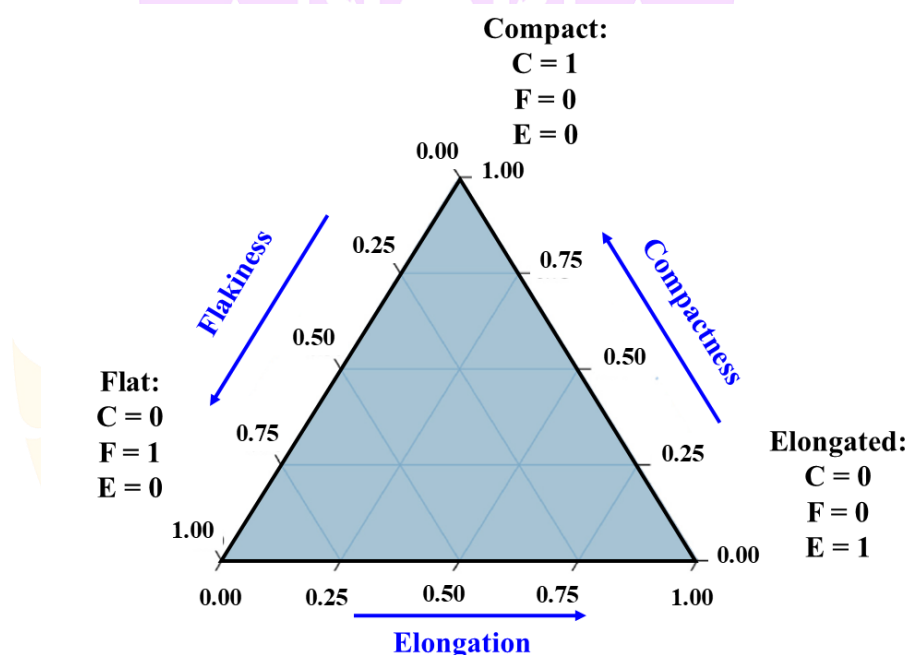
$$\text{ค่าความยาว (Elongation: E)} = \frac{c}{b} - \frac{c}{a} \quad (2.11)$$

ตาราง 7 แสดงลักษณะตัวอย่างขอบเขตรูปแบบของอนุภาคในแต่ละรูปแบบ ยกตัวอย่างเช่นกรณีที่มีปริซึมมีการยืดตัวในทิศทางของแกน 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 ดังแสดงในภาพ 11

ตาราง 3 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

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก Orosz, et al., 2021



ภาพ 11 แผนภาพสามแกน (ternary) สำหรับอธิบายรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ด

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก Orosz, et al., 2021

2. ตัวบ่งชี้ทางสัณฐานวิทยาของวัสดุชนิดเม็ด

วิธีการทั่วไปในการอธิบายรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ดคือการกำหนดระยะขนาดต่าง ๆ ในแนวแกนระบบ 3 มิติ สำหรับรูปทรงลูกบาศก์ดังแสดงในภาพ 12 โดยที่ระยะ S จะเป็นระยะที่สั้นที่สุด L เป็นระยะที่ยาวที่สุด ในขณะที่ I จะเป็นระยะระหว่างตรงกลางของสั้นที่สุดและยาวที่สุด และทำให้สามารถกำหนดคุณลักษณะต่าง ๆ ของรูปร่างทั่วไปได้ ตัวอย่างเช่น

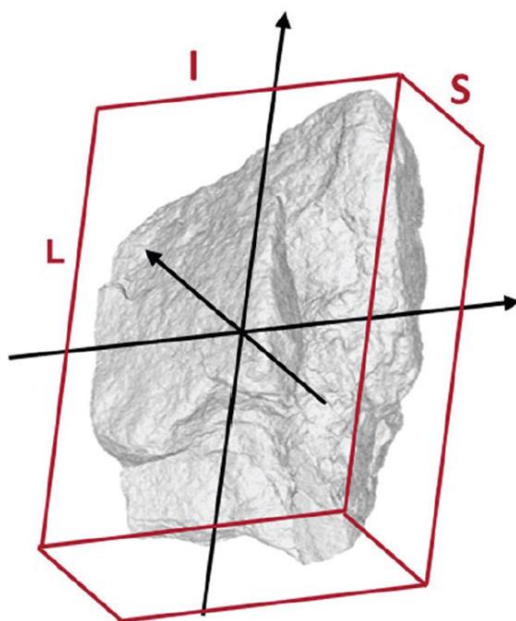
$$\text{Sphericity } (\psi) = \sqrt[3]{\frac{S \cdot I}{L^2}} \quad (2.12)$$

$$\text{Elongation ratio } (ER) = \frac{I}{L} \quad (2.13)$$

$$\text{Flatness ratio } (FR) = \frac{S}{I} \quad (2.14)$$

$$\text{Flatness-elongation } (FE) = \frac{L}{S} \quad (2.15)$$

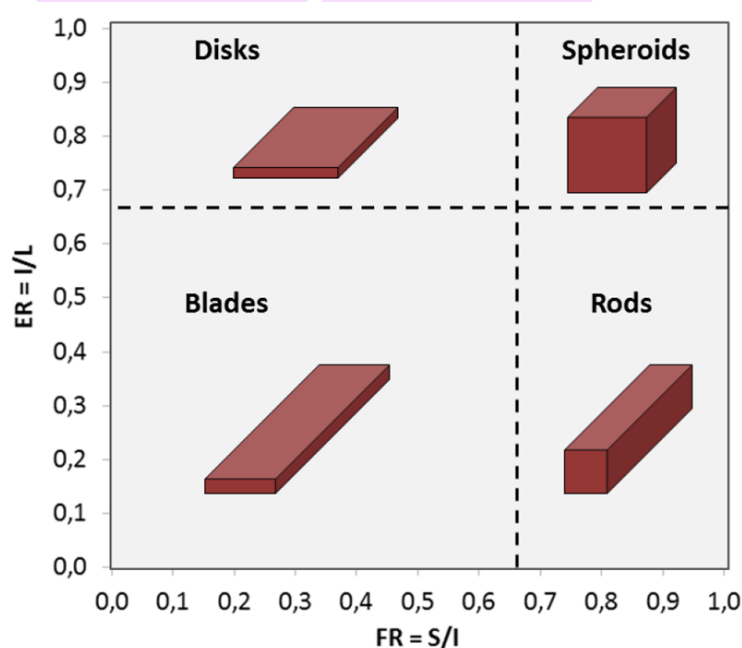
$$\text{Shape factor } (SF) = \frac{FR}{ER} \quad (2.16)$$



ภาพ 12 ความยาวลักษณะเฉพาะของอนุภาค: L (ยาว), I (กลาง) และ S (สั้น)

ที่มา: Quintanilla, et al., 2017

จากนิยามข้างต้นจะพบว่า Shape factor มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 เมื่อค่าดังกล่าวมีเท่ากับ 1 นั้นคือกรณีที่รูปร่างของวัสดุชนิดเม็ดเป็นรูปทรงกลมหรือลูกบาศก์ Zingg (1935) ได้นำเสนอการจำแนกประเภทของวัสดุรวมรวมโดยใช้ตัวแปร ER และ FR โดยกำหนดหมวดหมู่ที่แตกต่างกันออกเป็นสี่หมวด ได้แก่ ใบมีด (blades), แท่ง (rods), แผ่น (disks) และทรงกลม (spheroids) การจำแนกประเภทและค่าจำกัดความของหมวดหมู่ต่าง ๆ เหล่านี้มักจะนำเสนอในรูปแบบของแผนภาพของ Zingg (Zingg's diagram) โดยจะใช้ค่า $2/3$ ของ ER และ FR เป็นเส้นแบ่งดังแสดงในภาพ 13



ภาพ 13 แผนภาพของ Zingg

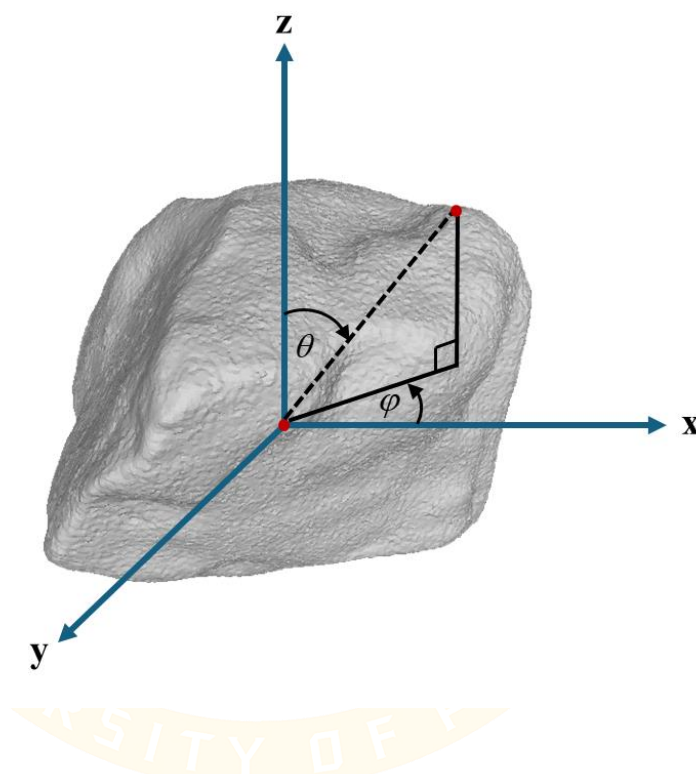
ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก Quintanilla, et al., 2017

ฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical Harmonics Function, SHF)

ฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical Harmonics Function, SHF) คือส่วนเชิงมุมของผลเฉลยในระบบพิกัดทรงกลมของสมการ Laplace (Laplace equation) ฟังก์ชันนี้ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในกลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanics) การประมวลผลและวิเคราะห์ภาพ โดยใช้คอมพิวเตอร์ (computer graphic) รวมถึงการทำแผนที่ทรงกลม (spherical mapping) การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกทรงกลม เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาสัญญาณวิทยาของวัสดุ

ชนิดเม็ด ซึ่งสามารถใช้ในการวัดรูปร่างของอนุภาคแต่ละอนุภาคและวิเคราะห์การกระจายตัวของรูปร่างตัวอย่าง ข้อมูลนี้สามารถใช้เพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมของวัสดุชนิดเม็ดและออกแบบวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น (Masad, et al. 2005; Kutay, et al. 2011; Liang, et al. 2021; Guo, et al. 2023)

SHF เป็นชุดฟังก์ชันยกตัวอย่างเช่น อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) ซึ่งโดยปกติจะอธิบายรูปร่างของอนุภาคในรูปแบบ 2 มิติ แต่ข้อดีของฟังก์ชันนี้จะอธิบายในรูปแบบ 3 มิติ โดยที่ฟังก์ชันเหล่านี้จะถูกกำหนดโดยฟังก์ชันของรัศมี $r(\theta, \varphi)$ ในพิกัดทรงกลม ดังแสดงในภาพ 14 สำหรับ SHF แต่ละฟังก์ชัน อนุภาคในรูปแบบ 3 มิติ สามารถแสดงรูปร่างทางคณิตศาสตร์โดยใช้พิกัดทรงกลมที่มีขนาดรัศมี $r(\theta, \varphi)$ จากจุดกำเนิดถึงจุดบนพื้นผิวของอนุภาคเป็นฟังก์ชันของมุมทิศ (azimuthal angles, θ) และมุมเชิงขั้ว (polar angles, φ) ฟังก์ชันของรัศมี $r(\theta, \varphi)$



ภาพ 14 ระยะและมุมในพิกัดทรงกลม

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก Kutay, et al., 2011

สำหรับการสร้างพื้นผิวของอนุภาคมวลรวมในรูปแบบ 3 มิติโดย SHF (Feng, et al. 2020) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การสร้างทรงกลมหนึ่งหน่วยในพิกัดทรงกลมจากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} r(\theta, \varphi) &= \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l A_l^m Y_l^m(\theta, \varphi) \\ &\approx \sum_{l=0}^n \sum_{m=-l}^l a_l^m Y_l^m(\theta, \varphi) \end{aligned} \quad (2.17)$$

เมื่อทำการขยายสมการ (2.17) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} r(\theta, \varphi) &= A_0^0 Y_0^0(\theta, \varphi) + \sum_{m=-1}^1 A_1^m Y_1^m(\theta, \varphi) \\ &\quad + \sum_{m=-2}^2 A_2^m Y_2^m(\theta, \varphi) + \dots + \sum_{m=-l}^l A_l^m Y_l^m(\theta, \varphi) \end{aligned} \quad (2.18)$$

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

$Y_l^m(\theta, \varphi)$ คือสัมประสิทธิ์ของ SHF ที่ระดับ l และลำดับ m ของฮาร์โมนิกทรงกลม

$$Y_l^m(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{(2l+1)(l-m)!}{4\pi(l+m)!}} P_l^m(\cos \theta) e^{im\varphi} \quad (2.19)$$

โดยที่ i คือหน่วยจินตภาพ (imaginary unit) และ $P_l^m(x)$ คือ พหุนามของ Legendre (Legendre polynomials) ซึ่งจะเขียนในรูปของ

$$P_l^m(x) = (1-x^2)^{\frac{m}{2}} \frac{d^m}{dx^m} \left[\frac{1}{2^l l!} \frac{d^l}{dx^l} (x^2-1)^l \right] \quad (2.20)$$

ความละเอียดและความถูกต้องของการสร้างพื้นผิวของอนุภาคมวลรวมจะขึ้นอยู่กับระดับ l ($l_{\max}$ อยู่ในช่วง 15-30, Zhou, et al. 2015; Quintanilla, et al., 2017; Zhou, et al. 2018; Paixao and Fortunato, 2021)

2. ทำการแปลงจากข้อมูล Point cloud 3 มิติที่ประมวลผลแล้วเป็นพิกัดเชิงขั้ว โดยแปลงแต่ละจุดของระบบพิกัดฉาก (x, y, z) สู่ระบบพิกัดทรงกลม แต่ละจุดบนพื้นผิวของอนุภาคจะสอดคล้องกับชุด $r(\theta, \varphi)$

3. การหาค่าสัมประสิทธิ์ A_l^m ของ SHF ซึ่งจะขึ้นอยู่กับข้อมูล point cloud 3 มิติ โดยสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของรัศมี $r(\theta, \varphi)$ และพจน์ของ SHF, $Y_l^m(\theta, \varphi)$ ที่อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น ซึ่งจะเขียนในรูปของ

$$A_l^m = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi f(r, \theta, \varphi) Y_l^m(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi \quad (2.21)$$

โดยทั่วไปจำนวนค่าสัมประสิทธิ์ A_l^m จะอยู่ที่ $(l_{\max} + 1)^2$

4. การสร้างพื้นผิวใหม่ของอนุภาค โดยใช้ผลคูณของค่าสัมประสิทธิ์ A_l^m ที่คำนวณได้ และฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม $Y_l^m(\theta, \varphi)$ โดยที่ผลลัพธ์จะแสดงในรูปของรัศมีเชิงขั้ว $r(\theta, \varphi)$

ภาพ 15 แสดงตัวอย่างของการประยุกต์ใช้ SHF สำหรับการสร้างพื้นผิวใหม่ของวัสดุมวลรวม โดยจะพบว่าระดับ l ของฮาร์มอนิกทรงกลมมีผลต่อรูปร่างของอนุภาค สำหรับการศึกษาของ Guo, et al. (2023) ได้กำหนดให้ n คือระดับของฮาร์มอนิกทรงกลม และ $n = 20$ สามารถที่อธิบายลักษณะวิทยาของวัสดุมวลรวมได้เป็นอย่างดี โดยที่ระยะรัศมีจะมีค่าอยู่ในช่วง 1.65 ถึง 3.15 มม. ในขณะที่ภาพ 16 แสดงการสร้างพื้นผิวของอนุภาควัสดุมวลรวมที่ได้จากผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้จากการผลิตเหล็ก (steel slag) โดยที่ $l_{\max} = 30$ แสดงให้เห็นถึงข้อดีของการใช้ SHF ในการสร้างพื้นผิวใหม่ของอนุภาค

ข้อได้เปรียบของ SHF อีกอย่างหนึ่งนั่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์ A_l^m สามารถนำมาใช้เพื่อคำนวณตัวระบุรูปร่างต่าง 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 ในการวิเคราะห์ลักษณะวิทยาของอนุภาคในระดับต่าง ๆ Masad, et al. (2005); Kutay, et al. (2011) ได้จำแนกระดับของฮาร์มอนิกทรงกลมเป็นช่วง ๆ โดยที่ $l_{\max} = 30$ ดังนี้

ดัชนีรูปร่าง 3 มิติ (3D form index)

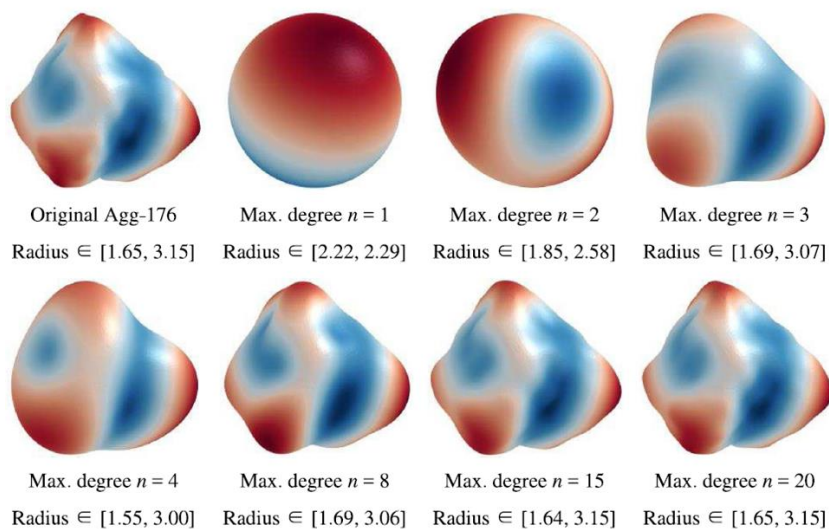
$$FI_{3DN} = \sum_{l=1}^4 \sum_{m=-1}^l \frac{|A_l^m|}{A_0^0} \quad (2.22)$$

ดัชนีความเป็นมุมแบบ 3 มิติ (3D angularity index)

$$AI_{3DN} = \sum_{l=5}^{25} \sum_{m=-1}^l \frac{|A_l^m|}{A_0^0} \quad (2.23)$$

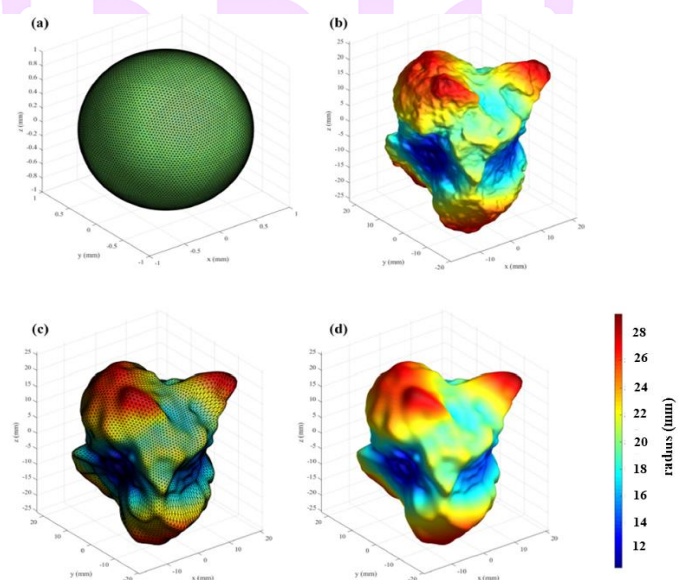
ดัชนีพื้นผิวแบบ 3 มิติ (3D micro-texture index)

$$MT_{3DN} = \sum_{l=26}^{30} \sum_{m=-1}^l \frac{|A_l^m|}{A_0^0} \quad (2.24)$$



ภาพ 15 การเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของมวลรวมที่มีระดับ SHF ต่างกันในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกทรงกลม

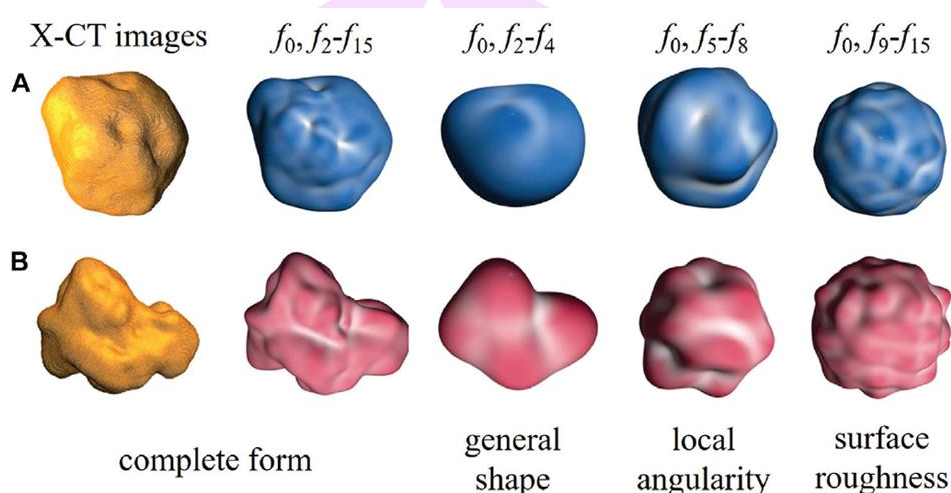
ที่มา: Guo, et al., 2023



ภาพ 16 สัณฐานวิทยาของมวลรวมผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้จากการผลิตเหล็ก (steel slag) โดยที่ $l_{\max}=30$

ที่มา: Paixao and Fortunato, 2023

โดยการกำหนดช่วงของค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวนี้ การจำแนกความแตกต่างของสัณฐานวิทยาของวัสดุชนิดเม็ดในระดับต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น Liang, et al. (2021) ได้อธิบายสัณฐานวิทยาของทรายที่ระดับต่าง ๆ ดังแสดงในภาพ 17 โดยที่ระดับ SHF จะพิจารณาที่ $l_{\max}=20$ ซึ่งแต่ละระดับการพิจารณาจะแบ่งเป็น 3 ช่วงเช่นเดียวกันโดยที่ในระดับมหภาค ปานกลางและจุลภาค จะพิจารณาในช่วง $l=2-4$, $l=5-8$ และ $l=9-15$ ตามลำดับ



ภาพ 17 การจำแนกสัณฐานวิทยาของทรายที่ระดับ SHF ต่างกัน โดยที่ $l_{\max} = 15$

ที่มา: Liang, et al., 2021

การประยุกต์ใช้เศษยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานมาใช้ในการงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค

วัสดุมวลรวมที่ได้มาจากเศษยาง (tyre-derived aggregates, TDA) ที่ประกอบด้วยส่วนผสมของเศษยางล้อ (เช่น ยางเม็ดและเศษยาง) และดินปนทราย สามารถนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรม เนื่องจากคุณลักษณะของน้ำหนักเบา ความสามารถในการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นสูง โมดูลัสแรงเฉือนต่ำ และการหน่วงขนาดใหญ่ ยกตัวอย่างเช่น วัสดุเติมถมของกำแพงต่อม่อของสะพานหรือกำแพงกันดิน (Tweedie, et al., 1998; Rowhani and Rainey, 2016) การเพิ่มเสถียรภาพของฐานรากบนชั้นดินอ่อน (Patil, et al., 2011; Soltani-Jigheh, et al., 2014) ดินถมหลังท่อ (Christ, et al., 2010; Tafreshi, et al., 2012; Mehrjardi, et al., 2015) วัสดุคันทางและเชิงลาด (Yoon, et al., 2006; Mohajerani, et al. 2020) และเป็นชั้นแยกฐานรากสำหรับการป้องกันแผ่นดินไหว (Tsang, 2008; Pitilakis, et al., 2015; Wu, et al., 2023) จากมุมมองด้านสิ่งแวดล้อม การนำยางล้อรถยนต์

ที่หมดอายุการใช้งานกลับมาประโยชน์เพิ่มสามารถแก้ไขปัญหาก็เกี่ยวข้องกับการจัดการยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานและให้ความปลอดภัยในระยะยาว ที่ผ่านมามีการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการศึกษาภาคสนามแสดงให้เห็นว่ามีการชะล้างสารที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพของประชาชนจากเศษยางรถยนต์เพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย ซึ่งพิสูจน์ได้ว่าเศษยางรีไซเคิลไม่ใช่วัสดุอันตราย (Cui, et al., 2021; Liu, et al., 2000) นอกจากนี้ เนื่องจากเป็นวัสดุที่ไม่ซึบน้ำ ยางจึงไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำใต้ดิน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ไม่พึงประสงค์ต่อดินและน้ำใต้ดินก็น้อย ด้วยเหตุนี้มวลรวมที่ได้มาจากเศษยางจึงเป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นแนวทางการแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานที่ยั่งยืนให้กับโครงการต่าง ๆ

อย่างไรก็ตาม ปริมาณของยางจะส่งผลให้ความแข็งแรงและโมดูลัสมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับทรายหรือหินปกติ ยกตัวอย่างเช่น มุมเสียดทานจะลดลงตามปริมาณยางที่เพิ่มขึ้น (Zornberg, et al., 2004) นอกจากนี้ Ahn and Cheng (2014, 2017) พบว่า วัสดุทดแทนมวลรวมที่ได้มาจากเศษยางสามารถลดแรงดันบนกำแพงกันดินและลดการสั่นสะเทือนในชั้นดินถมหลังกำแพงภายใต้แรงแผ่นดินไหว ในทำนองเดียวกันกำแพงกันดินแบบเสริมกำลังทางกล (Mechanically Stabilized Earth wall, MSE wall) ที่มีดินถมหลังกำแพงเป็นวัสดุมวลรวมที่ได้มาจากเศษยางจะแสดงการเคลื่อนตัวที่ต่ำกว่ากำแพงเสริมกำลังทางกลที่ใช้วัสดุดินถมด้วยทราย (Xiao, et al., 2012) แม้ว่าการศึกษาบางส่วนที่กล่าวมาข้างต้นจะศึกษาคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ (เช่น โมดูลัสแรงเฉือนและอัตราส่วนการหน่วง) ของตัวอย่างที่ประกอบด้วยเศษยางทั้งหมด แต่ส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นในส่วนของมวลรวมที่ได้มาจากเศษยางที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก (เช่น < 7 มม.)

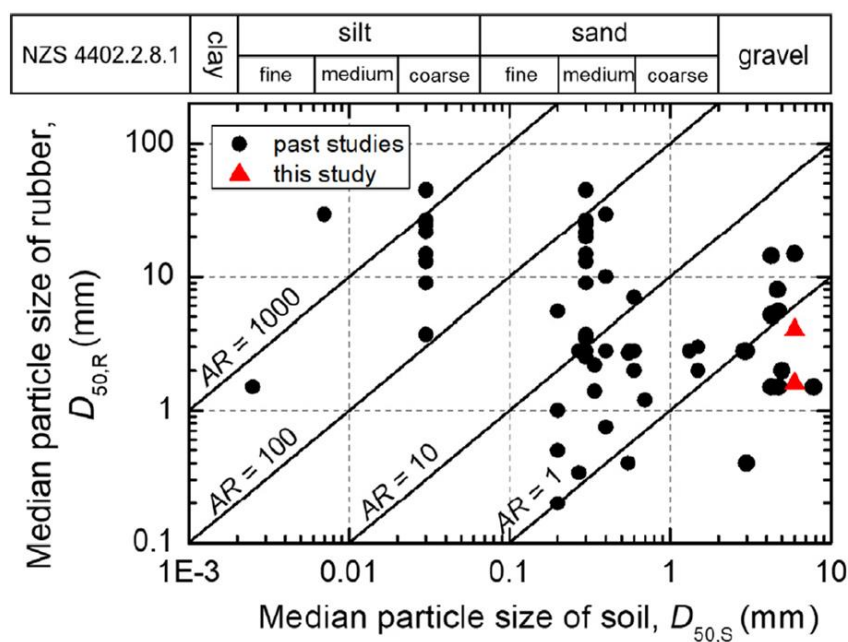
ในการนำตาข่ายเสริมกำลัง (geogrid) มาเสริมกำลังวัสดุมวลรวมที่ได้มาจากเศษยาง อาจเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพ ผลการยึดเกาะระหว่างตาข่ายเสริมกำลังและดินถมสามารถปรับปรุงกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุมวลรวมที่ได้มาจากเศษยางได้ จึงเป็นการช่วยเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของฐานรากและเสถียรภาพโดยรวมของโครงสร้างที่อยู่ด้านบน ผลการเสริมแรงของตาข่ายเสริมกำลังกับชั้นดินปกติได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ (ยกตัวอย่างเช่น กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2563; ณัฐพัชร์ และอภินิติ, 2559; Correia and Zornberg, 2018; Venkateswarlu, et al., 2018; Liu, et al., 2021; Venkateswarlu, et al., 2018; Wang, et al., 2018) อย่างไรก็ตาม การวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมความเค้น-ความเครียด-ความแข็งแรงของวัสดุมวลรวมที่ได้มาจากเศษยางที่เสริมด้วยตาข่ายเสริมกำลังยังมีข้อจำกัดมาก โดยรวมแล้ว การเสริมแรงวัสดุมวลรวมที่ได้มาจากเศษยาง ด้วยแผ่นใยสังเคราะห์มีประโยชน์หลายประการในการใช้งานทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคและแผ่นดินไหว วัสดุมวลรวมที่ได้มาจากเศษยางเสริมแรงสามารถใช้เป็นวัสดุงานถมได้ดีกว่าเพื่อลดหน่วยแรงกดทับที่สัมผัสกับดินที่อยู่ด้านล่างและการเสียรูปของพื้นผิว (Liu, et al., 2019; Manohar and Anbazhagan, 2021; Wu, et al., 2023b) นอกจากนี้

วัสดุมวลรวมที่ได้มาจากเศษยางยังสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุฐานรากสำหรับชั้นแยกในการช่วยแก้ไขปัญหเกี่ยวกับแผ่นดินไหว ในขณะที่การใช้การเสริมแรงสามารถเอาชนะข้อด้อยของวัสดุมวลรวมที่ได้มาจากเศษยางในแง่ของกำลังต้านทานแรงเฉือนและความสามารถในการรับน้ำหนัก (Liu, et al., 2017; Fonseca, et al., 2019; Edincliler and Yildiz, 2022) ในการศึกษาปัจจุบัน มีการทดสอบแรงอัดแบบสามแกน (Triaxial test) ที่ได้รับการออกแบบและดำเนินการอย่างดีจำนวนหนึ่งเพื่อประเมินพฤติกรรมความเค้น - ความเครียด - ความแข็งแรงของวัสดุมวลรวมที่ได้มาจากเศษยางเสริมแรงอย่างไรก็ตาม ข้อสรุปทั้งหมดเกี่ยวกับการเสริมแรงด้วยธรณีสัณเคราะห์อาจถูกจำกัดโดยขนาดของชิ้นงานและช่องเปิดรวมถึงชนิดของวัสดุเสริมแรง และผลกระทบของหน่วยแรงเริ่มต้น (Wu, et al., 2023) เพื่อประเมินการใช้ธรณีสัณเคราะห์เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุมวลรวมที่ได้มาจากเศษยางเพิ่มเติม จำเป็นต้องมีการทดสอบธรณีเทคนิคขนาดใหญ่ยกตัวอย่างเช่น Large triaxial test หรือ Large direct shear test และการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

1. การจำแนกขนาดของเศษยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานแปรรูป

ปัจจุบันเศษยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโยธามาก ในรูปแบบของมวลรวมที่ได้มาจากเศษยาง (tyre-derived aggregates, TDA) เนื่องจากคุณสมบัติที่ได้เปรียบของ TDA ได้แก่ ความสามารถในการหน่วงพลังงานสูง (Energy damping) น้ำหนักต่อหน่วยต่ำและต้นทุนต่ำ โดยทั่วไปมวลรวมที่ได้มาจากเศษยางสามารถแบ่งออกได้สองประเภทสำหรับใช้ในงานวิศวกรรมโยธา: I) ประเภท A และ II) ประเภท B (ASTM A., 2017) โดยที่ประเภท A มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 12 ถึง 305 มม. ในขณะที่มวลรวมที่ได้มาจากเศษยางประเภท B มีขนาดอนุภาคสูงสุด (D_{max}) 450 มม. การจำแนกขนาดของเศษยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานแปรรูปมีความสำคัญอย่างมากในบริบททางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานในโครงการก่อสร้าง (Shah, et al., 2016a) วิศวกรธรณีเทคนิคมักใช้ยางล้อที่ผ่านการแปรรูปเพื่อทดแทนวัสดุแบบดั้งเดิมที่ยั่งยืนและคุ้มค่า การจำแนกขนาดที่ถูกต้องของเศษยางเหล่านี้ถือเป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณาความเหมาะสมสำหรับการใช้งานเฉพาะด้าน (Akbarimehr, et al., 2020; Tiwari, et al., 2012; Yang, et al., 2020; Shariat, et al., 2018) ด้วยการจัดหมวดหมู่เศษยางที่หมดอายุการใช้งานแปรรูปออกเป็นกลุ่มขนาดที่แตกต่างกันอย่างเป็นระบบ (ภาพ 18) วิศวกรสามารถประเมินคุณลักษณะทางกายภาพของยางนั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงการกระจายขนาดของอนุภาค อัตราส่วนโพรง และพฤติกรรมในการบดอัด (Dabic-Miletic, et al., 2021; Li, et al., 2010; Tran, et al., 2022) การประเมินคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ของวัสดุจะนำมาใช้ในการออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพการก่อสร้างทางธรณีเทคนิค ยกตัวอย่างเช่น เขื่อน กำแพงกันดิน และคันดิน นอกจากนี้การจำแนกขนาดของยางเศษที่แปรรูปจะช่วยให้สามารถเลือกเทคนิคทางวิศวกรรมได้

อย่างเหมาะสมและสามารถกำหนดกลยุทธ์การจัดการของเสียที่เกิดจากยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะสามารถช่วยพัฒนาแนวทางในการปฏิบัติที่คำนึงถึงสิ่งแวดล้อมในสาขาวิศวกรรมธรณีเทคนิค



ภาพ 18 ส่วนผสมของดินและเศษยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานในการศึกษาที่ผ่านมา

ที่มา: Tasalloti, et al., 2021

ตาราง 4 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		

การจำแนกประเภทอนุภาคของเศษยางรถยนต์เหล่านี้สามารถอ้างอิงได้จากมาตรฐานต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น ASTM D6270-08 (2012) และ ETRA (2013) ซึ่งมาตรฐานเหล่านี้จะระบุช่วงขนาดเฉพาะสำหรับอนุภาคของเศษยางที่ได้มาจากวิธีการตัด โดยใช้การแยกหรือการจัดแถบโลหะหรือส่วนประกอบใด ๆ ออกจากยางรถยนต์ ตาราง 4 แสดงการจำแนกขนาดของยางแปรรูปตามที่กำหนดโดย ETRA (2013) และ ASTM D6270-08 (2012) นอกจากนี้ ภาพ 19 ยังแสดงให้เห็นอนุภาควางที่แตกต่างกันสี่ประเภท ซึ่งสังเกตได้จากการศึกษาก่อนหน้านี้ (Edincliler, et al., 2013; Foose, et al., 1996)



ภาพ 19 ตัวอย่างขนาดอนุภาคของเศษยาง

ที่มา: Mistry, et al., 2021

2. การจำแนกขนาดของเศษยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานแปรรูป

ในการศึกษาหรือทดสอบในห้องปฏิบัติการอย่างละเอียดถี่ถ้วนนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับพฤติกรรมของส่วนผสมของดินและเศษยางอย่างครอบคลุมเพื่อให้แน่ใจว่าการใช้เศษยางรถยนต์อย่างเหมาะสมที่สุดในการใช้งานทางธรณีเทคนิค ในการศึกษาพฤติกรรมของดินเมื่อผสมกับเศษยาง การวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่กำลังของดินที่มีอนุภาคเป็นเม็ด เช่น ทราย กรวด เมื่อถูกปรับปรุงด้วยเศษยาง รวมถึงพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวที่ผสมด้วยเศษยาง

(Das and Bhowmik, 2020; Madhusudhan, et al., 2020; Ding, et al., 2021; Akbarimehr and Fakharian, 2021) โดยทั่วไปการผสมวัสดุมวลรวมและเศษยางรถยนต์ควรคำนึงถึงการทำให้วัสดุเป็นเนื้อเดียวกัน และพยายามไม่ให้เกิดการแบ่งแยกระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ทั้งในห้องปฏิบัติการและในภาคสนามการใช้ส่วนผสมดินกับยาง (Jahandari, et al., 2021) การแยกตัวอาจเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างในด้านขนาด ความหนาแน่น ความแข็ง และรูปร่างระหว่างเศษยางกับอนุภาคของดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อส่วนผสมมีสัดส่วนของเศษยางที่สูงกว่า (Fareghian, et al., 2023)

สมรรถนะทางกลของส่วนผสมระหว่างดินทรายและเศษยางได้รับผลกระทบอย่างเห็นได้ชัดจากสัดส่วนของเศษยางที่รวมอยู่ในส่วนผสม (Fu, et al., 2023) การประเมินและการเลือกสัดส่วนเศษยางที่แม่นยำถือเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพและคุณสมบัติที่ต้องการของวัสดุผสมเหล่านี้ มีการเสนอวิธีการหลายวิธีในการประเมินสัดส่วนยางในเชิงปริมาณ รวมถึงเศษส่วนของทราย (sand fraction, S_f) เศษส่วนของยาง (rubber fraction, F_R) และปริมาณเศษยาง (tyre content, χ) เศษส่วนของทรายและยางแสดงถึงสัดส่วนตามปริมาตร ในขณะที่ปริมาณยางแสดงเป็นสัดส่วนตามมวล

$$S_f = \frac{V_S}{V_R + V_S} \quad (2.25)$$

$$F_R = \frac{V_R}{V_R + V_S} \quad (2.26)$$

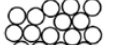
$$\chi = \frac{M_R}{M_R + M_S} \quad (2.27)$$

โดยที่ V_S และ V_R คือปริมาตรของทรายและเศษยางตามลำดับ ในขณะที่ M_S และ M_R คือ มวลของทรายและเศษยาง และเมื่อพิจารณาขนาดเฉลี่ย (D_{50}) ของทรายและเศษยาง จะสามารถกำหนดอัตราส่วนรูปร่าง (aspect ratio, AR) ได้ดังสมการ

$$AR = \frac{D_{50-R}}{D_{50-S}} \quad (2.28)$$

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าปริมาณเศษยางที่แตกต่างกันส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกล รวมถึงความแข็งแรงและพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของส่วนผสมที่ประกอบด้วยทรายและยาง (Bergado, et al., 2005; Bandyopadhyay, et al., 2023; Daiet, al., 2023; Farooq and Nimbalkar, 2023; Afrazi, et al., 2022) ภาพ 20 แสดงตัวอย่างอิทธิพลของสัดส่วนและขนาดของอนุภาคทรายและเศษยางที่ส่งผลต่อความแข็งแรงและพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของส่วนผสม การศึกษาเหล่านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุปริมาณยางที่เหมาะสมซึ่งช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกล

ผลการศึกษานี้มีส่วนช่วยให้เข้าใจและออกแบบส่วนผสมยางทรายสำหรับการใช้งานธรณีเทคนิคได้ดียิ่งขึ้น

F_R	Skeleton material		Remarks
	AR = 0.27	AR = 0.67	
0			Rigid gravel skeleton
20			Gravel-controlled stiffness; rubber may prevent buckling of gravel columns; AR = 0.27: segregation if rubber can pass through gravel pores
40			
60			AR = 0.27: Transition mixture. Rubber separates gravel contacts at low pressures; gravel contacts may form at large pressures. AR = 0.67: Rubber forms percolating skeleton. There is gravel-gravel grain interaction Gravel forms percolating skeleton. There is rubber-rubber particle interaction
80			
100			Soft rubber skeleton

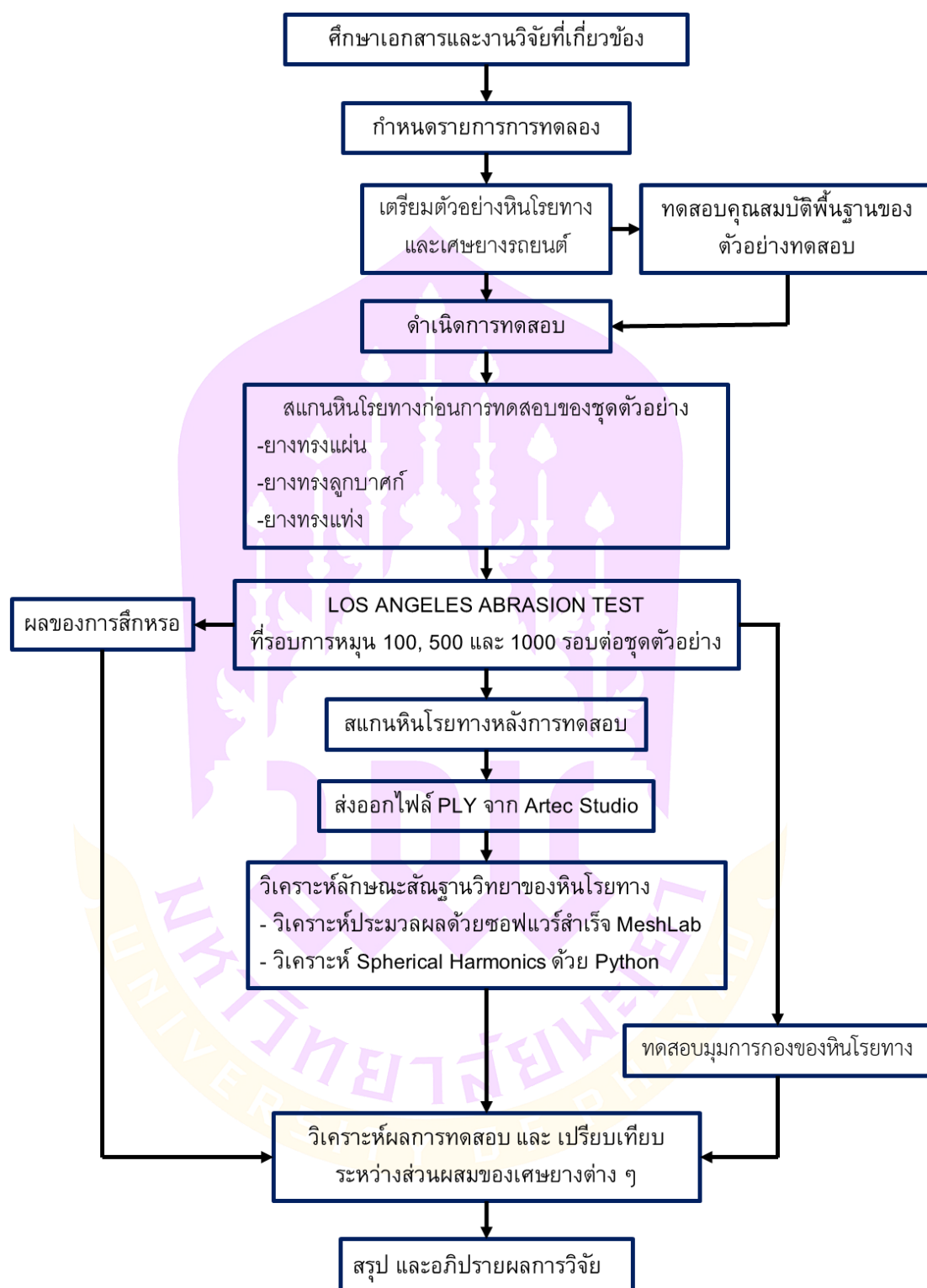
ภาพ 20 ตัวอย่างอิทธิพลของสัดส่วนและขนาดของอนุภาคทรายและเศษยางที่ส่งผลต่อความแข็งแรงและพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของส่วนผสม



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาเบื้องต้นของสัณฐานวิทยาแบบ 3 มิติจากการสึกหรอของหินโรยทาง โดยให้ความสำคัญกับการประเมินผลกระทบจากการสึกหรอของหินโรยทาง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของระบบโครงสร้างทางรถไฟ เนื่องจากหินโรยทางมีบทบาทสำคัญในการรองรับและกระจายแรงที่เกิดจากการใช้งานของระบบขนส่งทางราง การวิจัยนี้จึงใช้วิธีการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Los Angeles Abrasion test, LAA) ร่วมกับวิเคราะห์สัณฐานวิทยาแบบ 3 มิติ เพื่อให้เกิดความเข้าใจ จึงทำการแบ่งแผนการดำเนินงานและกระบวนการทดสอบการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง ดังแสดงในภาพ 21 ในการทดสอบตัวอย่างหินโรยทางจะทำการทดสอบ 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือการทดสอบ LAA และการทดสอบมุมการกองของหินโรยทาง ในการทดสอบ LAA ตัวอย่างการทดสอบจะทำการผสมเศษยางรถยนต์โดยปริมาตรที่ร้อยละ 0, 5, 13 และ 20 ซึ่งเศษยางรถยนต์ที่ใช้จะมีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกันอยู่ 3 รูปแบบ ได้แก่ ยางทรงแผ่น ยางทรงลูกบาศก์ และยางทรงแท่ง โดยเริ่มต้นจะทำการสแกนตัวอย่างหินโรยทางก่อนการทดสอบ LAA หลังจากสแกนหินตัวอย่างเสร็จจะทำการสอบ LAA ที่ 100, 500 และ 1,000 รอบ หลังจากทำการสอบ LAA แล้วจึงนำตัวอย่างหินหลังการทดสอบไปทำการสแกนอีกรอบ การขึ้นรูปวัตถุจะใช้เครื่องสแกน 3 มิติ ควบคู่กับซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Artec Studio version 17 เมื่อทำการสแกนก่อนและหลังการทดสอบเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงส่งออกไฟล์ในรูปแบบ .PLY แล้วนำไปประมวลผลต่อโดยซอฟต์แวร์สำเร็จรูป MeshLab ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความแบน (flatness: F) ค่าความยาว (Elongation: E) และ ค่าความเป็นทรงกลมหรือทรงลูกบาศก์ (compactness: C) อีกทั้งยังใช้ศึกษาการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอนุภาคโดยการศึกษาความโค้งของพื้นที่ผิวของหินโรยทาง (curvature) ที่แสดงความขรุขระของพื้นผิว ซึ่งเป็นส่วนกลับของความโค้งโดยที่สามารถแสดงความโค้งเว้า (concave) และโค้งนูน (convex) อีกทั้งยังใช้ Python ในการวิเคราะห์ spherical harmonic ซึ่งสามารถวิเคราะห์ความละเอียดได้ใน 3 ระดับ ได้แก่ ดัชนีรูปทรง 3 มิติ (Fl_{3DN}) ดัชนีความเป็นมุม 3 มิติ (Al_{3DN}) และ ดัชนีไมโคร-เท็กซ์เจอร์ 3 มิติ (MT_{3DN}) ในการทดสอบส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบมุมการกอง ซึ่งจะทำการทดสอบโดยผสมเศษยางรถยนต์ตามการทดสอบของ LAA ทำการทดสอบมุมการกองโดยใช้ตัวอย่างหินโรยทางที่ผ่านการทดสอบ LAA ที่ 500 และ 1,000 รอบ มาใช้ในการทดสอบ จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดสอบและเปรียบเทียบระหว่างส่วนผสมของเศษยางเพื่ออธิบายผลกระทบของการสึกหรอและการผสมยางรถยนต์ในหินโรยทาง สรุปและอภิปรายผลการวิจัย



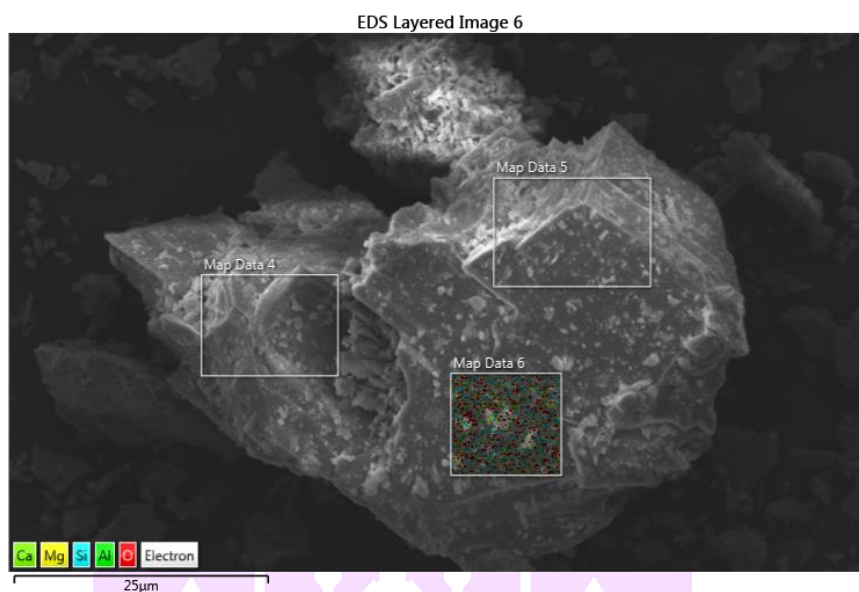
ภาพ 21 แผนการดำเนินงานและกระบวนการทดสอบ

แนวทางการเร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

1. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1.1 หินโรยทางรถไฟ

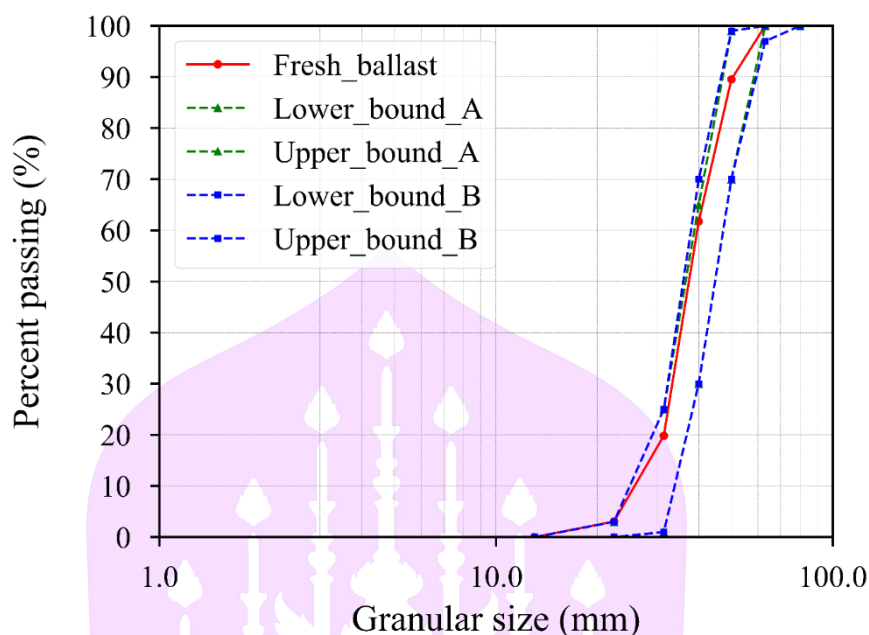
หินโรยทาง (ballast) คือ วัสดุหลักในส่วนล่างของโครงสร้างฐานพื้นทางรถไฟ ซึ่งอยู่ใต้หมอนรองรางรถไฟ ทำหน้าที่หลักในการรับแรงถ่ายโอนจากชั้นโครงสร้างส่วนบน (superstructure) ที่กระจายลงมาถึงโครงสร้างส่วนล่าง ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สำคัญของทางรถไฟ มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของทางรถไฟวัสดุที่ใช้จะเป็นหินแข็ง โดยในงานวิจัยนี้จะใช้หินโรยทางในโครงการการก่อสร้างทางรถไฟสายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ จากโรงโม่บัญชีากิจ อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย เป็นหินแอนดีไซต์ ประกอบไปด้วย แร่แฟลจีโอเคลส แอมฟิโบลแคลไซต์ ไพรอกซีน และ คลอไรต์ เป็นองค์ประกอบหลัก แสดงดังภาพ 22 และ ภาพ 23 แสดงกระจายขนาดคละเปรียบเทียบกับระหว่างหินโรยทางตัวอย่างกับเกณฑ์การคละขนาดอนุภาคของหินโรยทาง (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2561) การทดสอบการคละขนาดของหินโรยทางรถไฟดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 136 จากตาราง 5 แสดงขนาดตะแกรงและน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบหาส่วนคละของวัสดุมวลรวม โดยที่ตัวอย่างหินโรยทางใหญ่สุดค้ำบนขนาดตะแกรง 2 นิ้ว หรือ 50 มิลลิเมตร ให้ใช้น้ำหนักมากกว่า 20 กิโลกรัม ในการทดสอบครั้งนี้จะใช้น้ำหนักหินโรยทาง 40 กิโลกรัม เพื่อดำเนินการทดสอบหาส่วนคละของหินโรยทางจริงในสนาม ภาพ 24(a) แสดงตัวอย่างหินโรยทางรถไฟ หินโรยทางรถไฟที่ใช้ในการทดสอบ จะร่อนผ่านตะแกรงขนาดใหญ่สุด 63 มิลลิเมตร และค้ำอยู่บนตะแกรงขนาดเล็กสุด 31.5 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานการทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ โดยใช้เครื่องมือทดสอบหาความสึกหรอ (LAA) ในที่นี้จะใช้ตัวอย่างหิน 2 ขนาด ขนาดละ $5,000 \pm 50$ กรัม แสดงดังภาพ 25(a) ลักษณะอนุภาคของหินโรยทาง โดยที่หินโรยทางขนาด 40-45 มิลลิเมตร จะร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 นิ้ว และค้ำตะแกรงขนาด 1.5 นิ้ว ส่วนหินโรยทางขนาด 30-35 มิลลิเมตร จะร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1.5 นิ้ว และค้ำตะแกรงขนาด 1 นิ้ว



ภาพ 22 การตรวจสอบแร่ของหินโรยทาง

ตาราง 5 มวลของตัวอย่างมวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดสอบหาส่วนคละ

ขนาดระบุใหญ่สุด	น้ำหนักตัวอย่างไม่น้อยกว่า (กิโลกรัม)
9.5 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว)	1.0
12.5 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว)	2.0
19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)	5.0
25.0 มิลลิเมตร (1 นิ้ว)	10.0
37.5 มิลลิเมตร (1.5 นิ้ว)	15.0
50.0 มิลลิเมตร (2 นิ้ว)	20.0
63.0 มิลลิเมตร (2.5 นิ้ว)	35.0
75.0 มิลลิเมตร (3 นิ้ว)	60.0
90.0 มิลลิเมตร (3.5 นิ้ว)	100.0



ภาพ 23 แผนภูมิการกระจายขนาดตะกั่วเปรียบเทียบระหว่างหินโรยทางตัวอย่างกับเกณฑ์การตะกั่วขนาดอนุภาคของหินโรยทาง

1.2 เศษยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพ

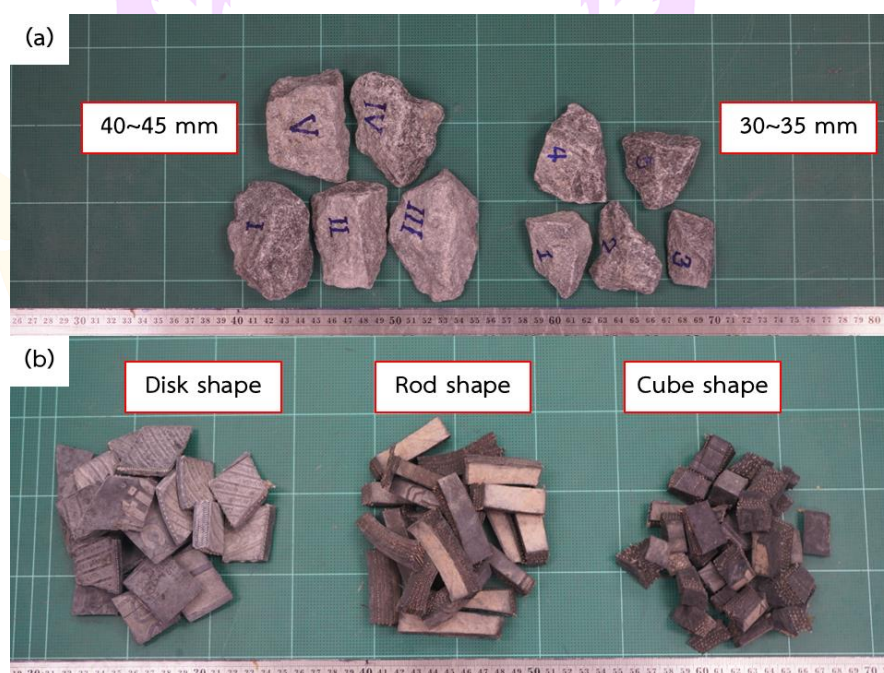
ยางรถยนต์ส่วนใหญ่ทำมาจากวัสดุหลักคือยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ ซึ่งมีคุณสมบัติยืดหยุ่นและทนทานต่อการสึกหรอ โดยยางที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้จะเป็นยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานแล้ว แสดงดังภาพ 24(b) ยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพ ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ จะใช้ยางอยู่ 3 รูปทรง ได้แก่ รูปทรงแผ่น รูปทรงลูกบาศก์ และรูปทรงแท่ง โดยยางทั้งหมดจะถูกตัดจากยางรถยนต์ที่หมดสภาพการใช้งาน โดยเลือกใช้บริเวณแก้มยาง ซึ่งจะถูกตัดให้ได้ขนาดและรูปร่างตามที่กำหนดอย่างเหมาะสมเพื่อใช้ในการทดลอง แสดงดังภาพ 25(b) แสดงลักษณะรูปร่างของยางรถยนต์ที่ใช้ทดสอบโดยมีรายละเอียดขนาดและรูปร่างดังนี้ ยางทรงแผ่น ยางทรงแท่ง และยางทรงลูกบาศก์ จะมีขนาดโดยประมาณ 3-4, 6-7 และ 2-3 ซม. ตามลำดับ โดยเศษยางรถยนต์จะถูกนำมาผสมกับหินโรยทาง เพื่อสร้างส่วนผสมในสัดส่วนของปริมาณยางตามปริมาตร (Volumetric Rubber Content; VRC) ที่แตกต่างกัน (Tasalloti et al., 2021) ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ VRC ถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของปริมาตรยาง (V_R) ต่อปริมาตรของแข็ง (V_G) ในส่วนผสม แสดงดังสมการ 3.1

$$VRC = \frac{V_R}{V_R + V_G} \quad (3.1)$$

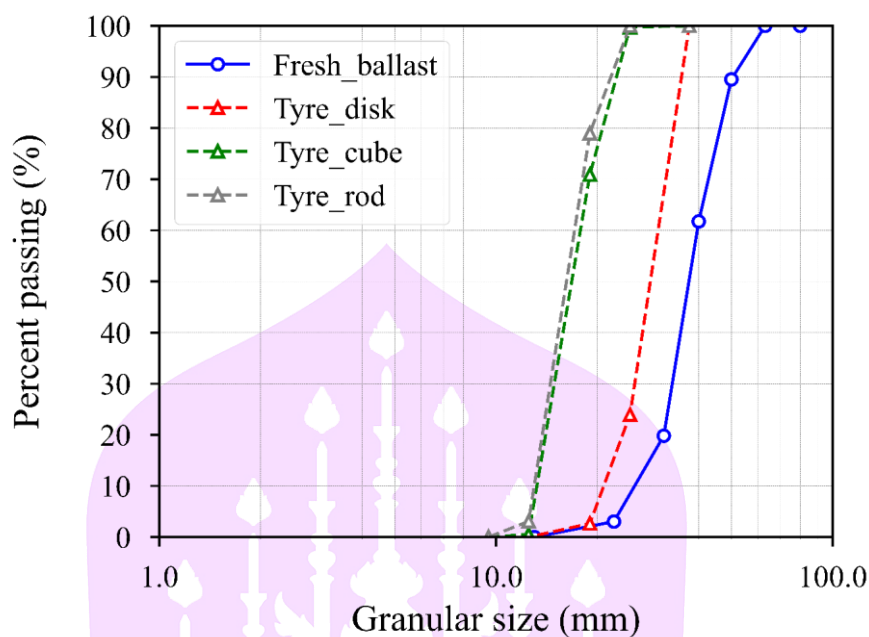
ภาพ 26 แสดงการกระจายขนาดคละของเศษยางรถยนต์ในแต่ละรูปทรงโดยจะเทียบกับ การกระจายขนาดคละของหินโรยทางตัวอย่าง ตาราง 6 แสดงรายละเอียดคุณสมบัติของหินโรยทาง และเศษยางที่เสื่อมสภาพ



ภาพ 24 (a) หินโรยทางรถไฟจากโรงไม้บัญชีกิจ อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย (b) ยางรถยนต์ ที่เสื่อมสภาพ



ภาพ 25 อนุภาคหินโรยทางและเศษยาง (a) ลักษณะอนุภาคของหินโรยทาง (b) ลักษณะอนุภาค ของเศษยาง



ภาพ 26 แผนภูมิการกระจายขนาดคละของเศษยาง

ตาราง 6 คุณสมบัติของหินโรยทางและเศษยางที่เสื่อมสภาพ

วัสดุตัวอย่าง	ความถ่วงจำเพาะ	ปริมาณความชื้น %
หินโรยทาง	2.91	0.225
เศษยางทรงแผ่น	1.12	-
เศษยางทรงลูกบาศก์	1.04	-
เศษยางทรงแท่ง	1.24	-

2. การเร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

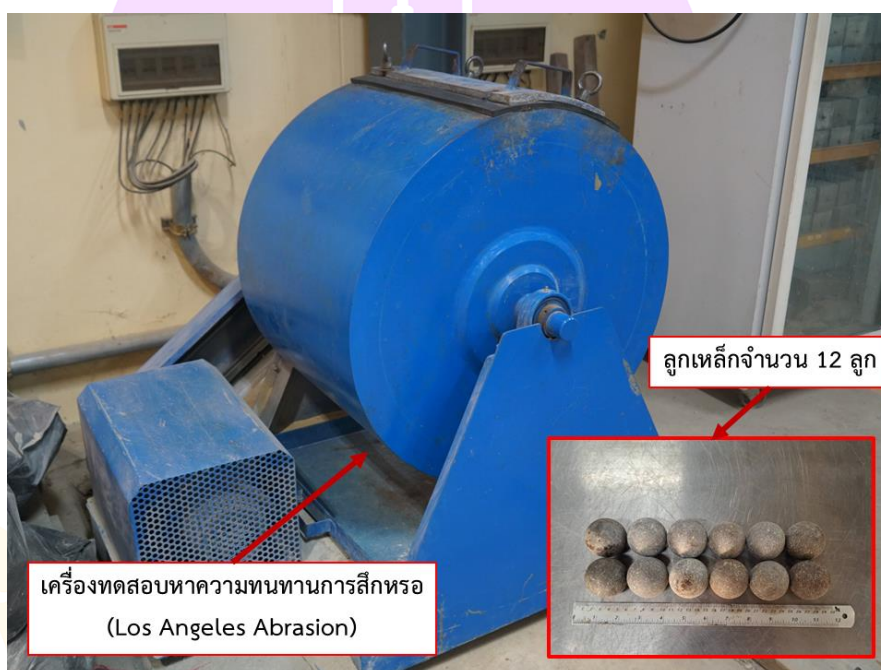
2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการเร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทางของการวิจัยครั้งนี้ เป็นเครื่องทดสอบหาความทนทานการสึกหรอ (Los Angeles Abrasion) ดังแสดงในภาพ 27 โดยจะอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวงชนบท (Department of Rural Roads) ประเทศไทย (มทข. (ท) 501.9-2545) ประกอบด้วยลูกเหล็กทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 46.8 มม. (1 27/32 นิ้ว) แต่ละลูกหนักระหว่าง 390-445 กรัม จำนวนลูกเหล็กทรงกลมขึ้นอยู่กับชั้นของตัวอย่าง น้ำหนักตัวอย่างในการทดสอบจะถูกกำหนดดังตาราง 7 ในที่นี้จะทำการทดสอบโดยใช้น้ำหนัก $10,000 \pm 75$

กรัม ในชั้นของตัวอย่าง F ที่หินโรยทางร้อนผ่านตะแกรงขนาด 2 นิ้ว และค้ำตะแกรงขนาด 1.5 นิ้ว และที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 1.5 นิ้ว และค้ำตะแกรงขนาด 1 นิ้ว ขนาดละ $5,000 \pm 50$ กรัม โดยจะใช้ ลูกเหล็กจำนวน 12 ลูก น้ำหนัก $5,000 \pm 25$ กรัม ที่อยู่ในชั้น F ซึ่งกำหนดไว้ในตาราง 8 เครื่องทดสอบหาความสึกหรอ (LAA) จะหมุนด้วยความเร็ว 30-33 รอบต่อนาที เมื่อพิจารณาความทนทานการสึกหรอสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{Loss}(\%) = \frac{W_0 - W_i}{W_0} \times 100 \quad (3.2)$$

โดยที่ W_0 คือน้ำตัวอย่างทั้งหมด และ W_i คือน้ำหนักที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 12



ภาพ 27 เครื่องทดสอบหาความทนทานการสึกหรอ (Los Angeles Abrasion)

ตาราง 7 การกำหนดน้ำหนักขนาดของตัวอย่างการทดสอบ LAA ของวัสดุหยาบ

ขนาดตะแกรง (mm)		น้ำหนัก (กรัม) และ ชั้นของตัวอย่าง						
ผ่าน	ค้าง	A	B	C	D	E	F	G
75.0	63.0					2,500±50		
63.0	50.8					2,500±50		
50.8	37.5					2,500±50	5,000±50	
37.5	25.0	1,250±25					5,000±50	5,000±25
25.0	19.0	1,250±25						5,000±25
19.0	12.5	1,250±10	2,500±10					
12.5	9.5	1,250±10	2,500±10					
9.5	6.3			2,500±10				
6.3	4.75			2,500±10				
4.75	3.36				5,000±10			
น้ำหนักตัวอย่างรวม		2,500±10	2,500±10	2,500±10	2,500±10	10,000±100	10,000±75	10,000±50
จำนวนรอบ			500				1,000	

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก ASTM C 131

ตาราง 8 จำนวนลูกเหล็กทรงกลมที่ใช้ในการทดสอบแต่ละชั้น

ชั้น	ลูกเหล็กทรงกลม (ลูก)	น้ำหนักรวม (กรัม)
A	12	5,000±50
B	11	4,584±50
C	8	3,330±50
D	6	2,500±50
E	12	5,000±50
F	12	5,000±50
G	12	5,000±50

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก ASTM C 131

2.2 ขั้นตอนการทดสอบเร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

ในการศึกษาครั้งนี้จะดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบหาความทนทานการสึกหรอ (LAA) เร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทางภายใต้สภาวะแห้ง (dry) โดยจะศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนและขนาดที่แตกต่างกัน ตาราง 9 แสดงรายละเอียดการทดสอบ จากรูปแบบการทดสอบจะแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วน คือ การทดสอบ LAA และการสแกนด้วยภาพ 3 มิติ โดยในแต่ละรอบของการทดสอบจะใช้หินโรยทาง $10,000 \pm 75$ กรัม ผสมกับรูปแบบเศษยางต่าง ๆ (ไม่ผสมเศษยาง, ทรงแผ่น, ทรงลูกบาศก์ และ ทรงแท่ง) ในอัตราส่วนร้อยละของเศษยางที่ต่างกัน ได้แก่ 0% 5% 13% และ 20% โดยปริมาตร ซึ่งหนึ่งรอบการทดสอบจะใช้ตัวอย่างเดียวกันในการหาความทนทานการสึกหรอที่จำนวนรอบต่าง ๆ คือ 100 500 และ 1,000 รอบ เพื่อศึกษาพัฒนาการการสึกหรอของรูปร่างที่เกิดจากกระบวนการเร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

ตาราง 9 รายการทดสอบการเร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

สภาวะ ตัวอย่าง	รูปแบบเศษยาง	ร้อยละเศษยาง (%)	จำนวนรอบการทดสอบ
แห้ง	ไม่ผสมเศษยาง	0	100, 500, 1000
		5	100, 500, 1000
		13	100, 500, 1000
		20	100, 500, 1000
	ทรงลูกบาศก์	5	100, 500, 1000
		13	100, 500, 1000
		20	100, 500, 1000
	ทรงแท่ง	5	100, 500, 1000
		13	100, 500, 1000
		20	100, 500, 1000

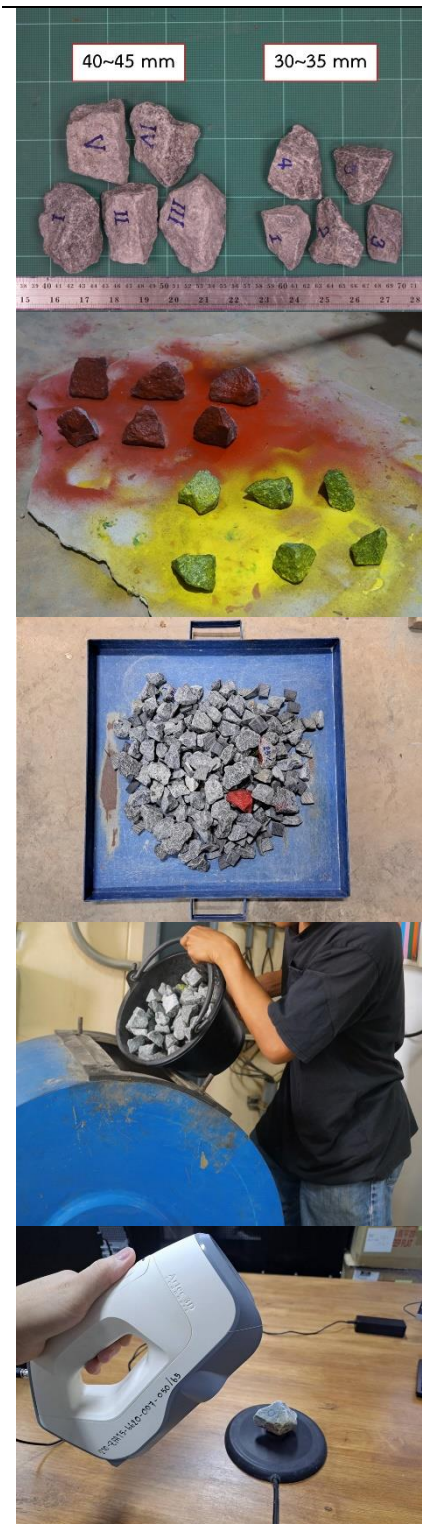
ในการเตรียมตัวอย่างการทดสอบเร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง ขั้นตอนแรกเริ่มในการเตรียมวัสดุโดยการล้างตัวอย่างหินโรยทางด้วยน้ำเพื่อชะล้างสิ่งปนเปื้อนและลดฝุ่นที่เกิดขึ้น จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 ± 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปริมาณหินโรยทางที่ใช้ทดสอบ 10,000 กรัม โดยจะใช้หินโรยทางสองขนาด ดังนี้ หินขนาด 40-45 มิลลิเมตร ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผ่านตะแกรง 2 นิ้ว ค้างตะแกรง 1.5 นิ้ว และ หินขนาด 30-35 มิลลิเมตร ที่มีขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลางผ่านตะแกรง 1.5 นิ้ว ค้างตะแกรง 1 นิ้ว โดยจะใช้น้ำหนักขนาดละ 500 ± 50 กรัม ก่อนจะเริ่มทำการทดสอบหาความทนทานการสึกหรอ (LAA) จะต้องทำการสุ่มเลือกหินตัวอย่าง จำนวน 10 ก้อน ขนาดละ 5 ก้อน ในที่นี้คือ หินขนาด 40-45 มิลลิเมตร จำนวน 5 ก้อน และขนาด 30-35 มิลลิเมตร จำนวน 5 ก้อน เพื่อเป็นตัวแทนของการทดสอบรอบนั้น โดยจะนำหินตัวอย่างไปสแกน ด้วยเครื่อง 3D สแกน ก่อนการทดสอบ หลังจากการสแกนเสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้วนั้นจะทำการพ่นสี ให้กับตัวอย่างหินทั้งสองขนาดที่มีต่างกัน เพื่อให้สามารถระบุและแยกตัวอย่างหินหลังจากการทดสอบ LAA ได้ ในการทดสอบนี้จะใช้ลูกเหล็กจำนวน 12 ลูก น้ำหนัก $5,000 \pm 25$ กรัม โดยเริ่มต้นจะทำการทดสอบ LAA ที่ 100 รอบ จากนั้นจะนำตัวอย่างหินที่สุ่มเลือกก่อนหน้าไปทำการสแกนอีกครั้ง หลังจากทำการทดสอบ LAA ที่รอบการหมุน 100 รอบ ซึ่งจะทำการทดสอบ LAA สลับกับการสแกน จนครบรอบการทดสอบที่ 500 และ 1,000 รอบ โดยในการทดสอบครั้งนี้จะทำการทดสอบหินโรยทาง ในสภาวะแห้ง เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้นจึงแสดงภาพประกอบขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง และการทดสอบ แสดงดังตาราง 10

ตาราง 10 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ LAA

ภาพประกอบ	รายละเอียดขั้นตอน
	1. ล้างตัวอย่างหินโรยทาง และอบหินโรยทางในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 100 ± 10 °C ให้แห้ง
	2. น้ำหนักหินตัวอย่างรวม $10,000 \pm 75$ กรัม โดยจะใช้หิน อยู่สองขนาดในการทดสอบ คือขนาดหินทดสอบที่ค้างบน ตะแกรง 1 นิ้ว (30-35 มม.) และ 1.5 นิ้ว (40-45 มม.) ขนาดละ 500 ± 50 กรัม

ตาราง 10 (ต่อ)

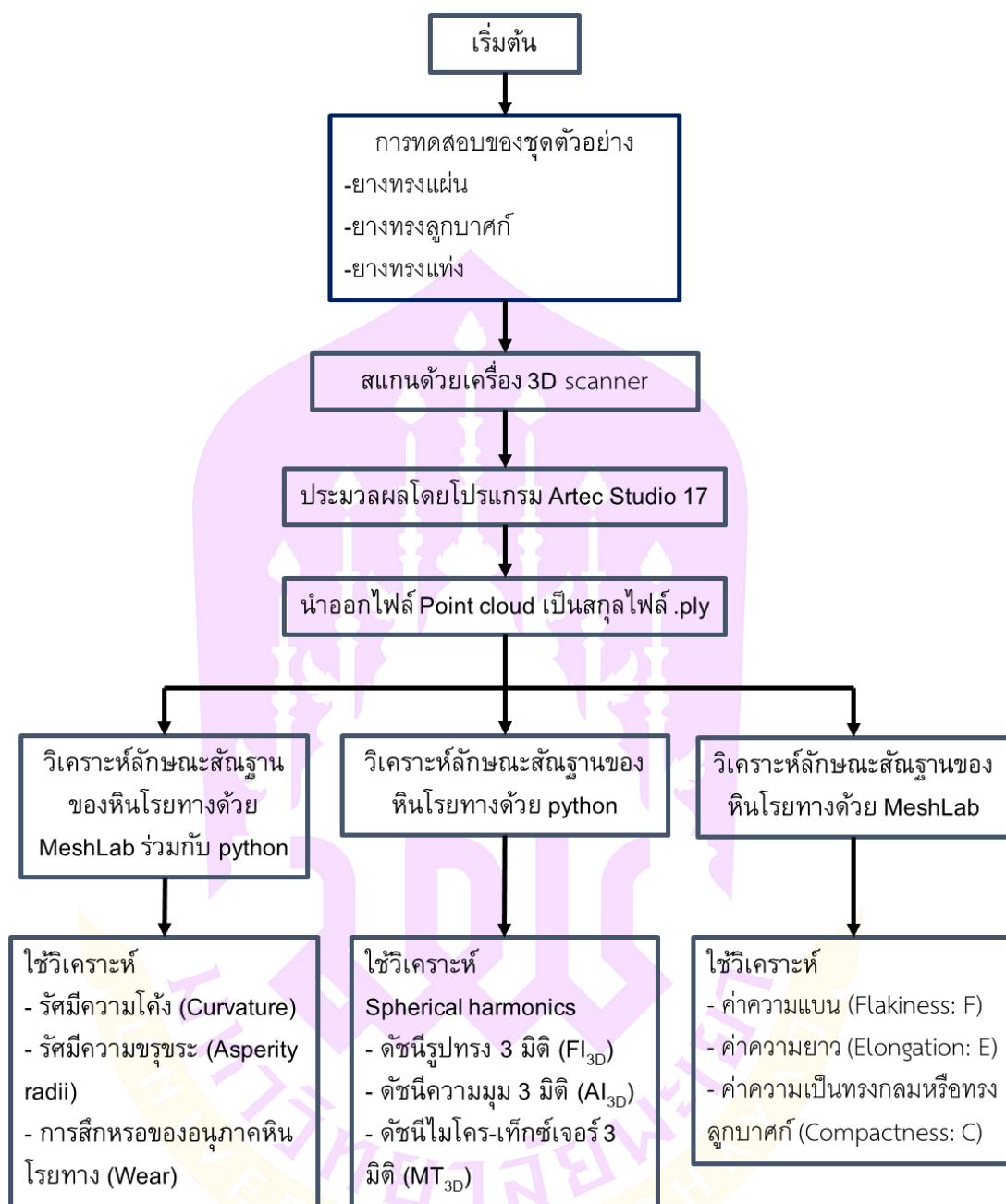
ภาพประกอบ	รายละเอียดขั้นตอน
	3. สุ่มเลือกตัวอย่างหินจำนวน 10 ก้อน ขนาดละ 5 ก้อน นำไปสแกนโดย 3D สแกน เพื่อเป็นตัวแทนของการทดสอบรอบนั้น 4. พ่นสีตัวอย่างที่สุ่มเลือกหลังจากการสแกนเพื่อสามารถแยกแยะระหว่างหินตัวอย่างที่สแกนกับหินตัวอย่างไม่ได้สแกน 5. ผสมตัวอย่างหินโรยทางกับเศษยางที่ร้อยละต่าง ๆ 6. ทำการทดสอบ LAA ที่จำนวนรอบ 100 รอบ 7. หลังจากผ่านการทดสอบ LAA ที่ 100 รอบ นำหินตัวอย่างทั้ง 10 ก้อน ไปสแกนด้วยเครื่อง 3D สแกนอีกรอบ

ตาราง 10 (ต่อ)

ภาพประกอบ	รายละเอียดขั้นตอน
	8. ทำการทดสอบ LAA ที่จำนวนรอบ 500 และ 1,000 รอบ โดยจะทำการทดสอบสลับกับการสแกนในแต่ละรอบการหมุน ในที่นี้จะใช้ตัวอย่างหินโรยทางเดิมในการทดสอบ LAA และการสแกน

การประเมินสัณฐานวิทยาจากการสึกหรอของหินโรยทางด้วยกระบวนการทางภาพถ่าย 3 มิติ

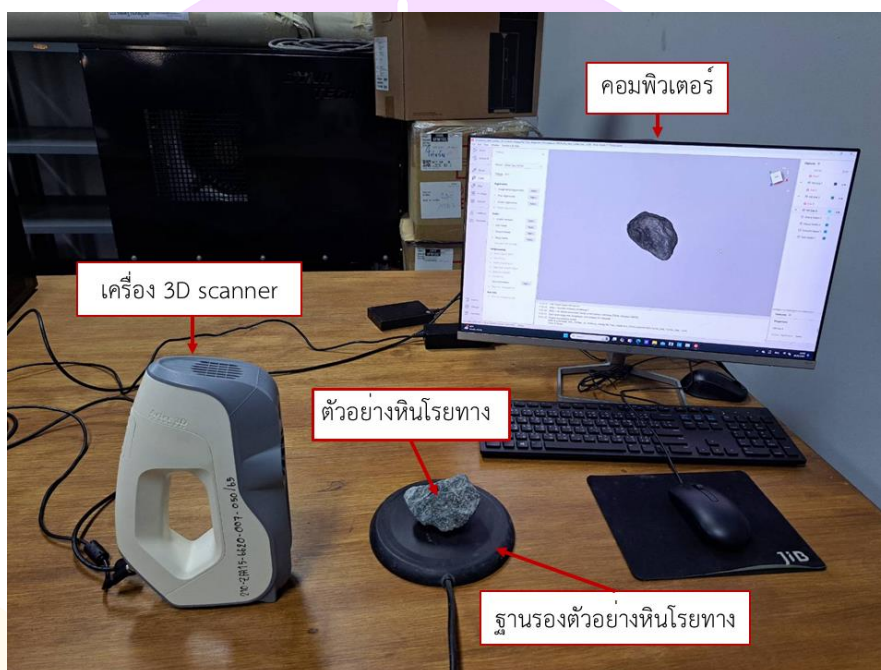
ในการศึกษาสัณฐานวิทยาของหินโรยทางด้วยการประมวลผลการสแกน 3 มิติ มีแผนการประเมินสัณฐานวิทยาจากการสึกหรอของหินโรยทาง ดังแสดงในภาพ 28 โดยเริ่มต้นสุ่มเลือกตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของกลุ่มการทดสอบของหินโรยทางที่ผสมเศษยางรถยนต์ทั้ง 3 รูปแบบ นำไปสแกนด้วยเครื่องมือ 3D scanner โดยภาพถ่ายที่บันทึกได้จะถูกประมวลผลด้วยโปรแกรม Artec Studio 17 และส่งออกไฟล์ point cloud เป็นสกุลไฟล์ .PLY จากนั้นจึงจะทำการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของหินโรยทาง โดยใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป MeshLab ในการวิเคราะห์ รัศมีความโค้ง (curvature) รัศมีความขรุขระ (asperity radii) และการสึกหรอของอนุภาคหินโรยทาง (wear) ซึ่งจะใช้ Python ในการดึงผลต่าง ๆ ที่ได้จาก MeshLab ในการวิเคราะห์ Spherical harmonics จะใช้ Python ในการสร้างรูปทรงขึ้นมาใหม่โดยใช้สมการ Spherical harmonics จากไฟล์ .PLY ที่ส่งออกก่อนหน้านี้ ซึ่งจะใช้สมการนี้หาค่า ดัชนีรูปทรง 3 มิติ (FI_{3D}) ดัชนีความมุม 3 มิติ (AI_{3D}) และดัชนีไมโคร-เท็กซ์เจอร์ 3 มิติ (MT_{3D}) สุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์รูปร่างของหินโรยทางโดยการใช้เทนเซอร์ในแนวพื้นผิว (SOT) โดยพิจารณาพื้นผิวหน้าเรียบของอนุภาคหลายเหลี่ยม ซึ่งจะแสดงค่าความแบน (F) ค่าความยาว (E) และค่าความเป็นทรงกลมหรือทรงลูกบาศก์ (C) โดยใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป MeshLab



ภาพ 28 แผนการประเมินสัณฐานวิทยาจากการสึกหรอของหินโรยทาง ด้วยกระบวนการทางภาพถ่าย 3 มิติ

1. เครื่องมือ 3D scanner

การศึกษานี้ใช้เครื่องมือ 3D scanner รุ่น Artec Eva แสดงดังภาพ 29 เป็นเครื่องสแกน 3D แบบมือถือที่มีความแม่นยำสูงจาก Artec 3D ซึ่งเป็นเครื่องสแกนสามมิติที่สามารถจับภาพที่มีขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ด้วยความแม่นยำของจุด 3D ถึง 0.1 มิลลิเมตร และความละเอียดสูงสุดถึง 0.2 มิลลิเมตร โดยมีระยะการทำงานอยู่ที่ 0.4-1.0 เมตร เป็นที่นิยมในงานสแกนวัตถุหลากหลายประเภท เช่น ชิ้นส่วนทางวิศวกรรม วัตถุโบราณ และแม้กระทั่งการสแกนร่างกายเพื่อการแพทย์ เป็นต้น

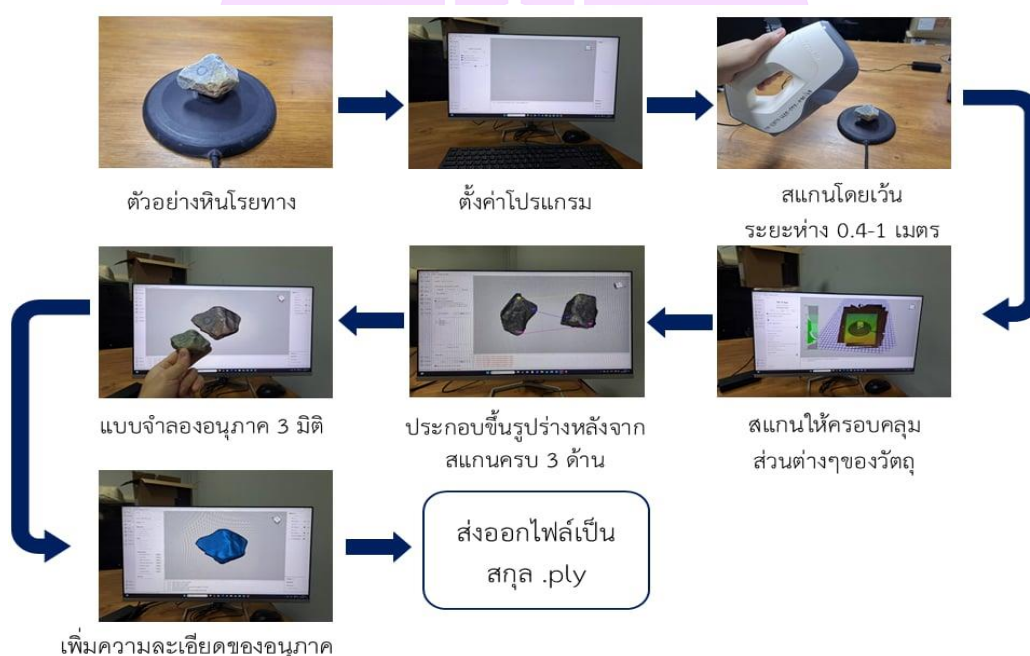


ภาพ 29 เครื่องมือ 3D scanner รุ่น Artec Eva

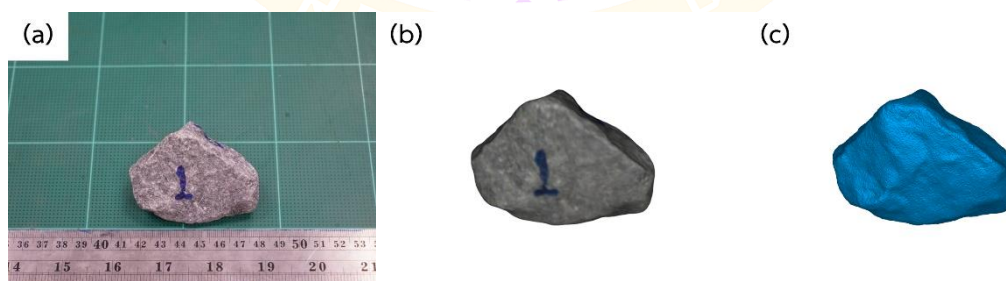
2. กระบวนการสแกนด้วยเครื่องมือ 3 มิติ

กระบวนการสแกนด้วยเครื่องมือ 3 มิติ ก่อนอื่นควรทำความสะอาดและเตรียมพื้นผิวของตัวอย่างหินโรยทางที่ต้องการสแกนให้เรียบร้อย พื้นผิวควรไม่มีฝุ่นละอองหรือสิ่งสกปรกที่อาจรบกวนคุณภาพของการสแกน เปิดโปรแกรม Artec Studio บนคอมพิวเตอร์และเชื่อมต่อ Artec Eva กับเครื่องคอมพิวเตอร์ ภาพ 30 แสดงแผนภาพกระบวนการสร้างแบบจำลองภาพถ่าย 3 มิติ เริ่มต้นโดยการตั้งค่าโปรแกรม Artec Studio ให้จับภาพข้อมูลแบบ HD (High Definition) หรือการสร้างภาพความละเอียดสูง ในการสแกนโดยจะต้องเว้นระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างเครื่องสแกนกับวัตถุตัวอย่างประมาณ 0.4-1.0 เมตร ทำการหมุนและเคลื่อนที่ Artec Eva ให้รอบวัตถุในอัตราความเร็วที่เหมาะสม โดยพยายามรักษามุมและระยะห่างให้คงที่เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ละเอียดและถูกต้อง ในครั้งนี้

จะทำการสแกนวัตถุตัวอย่างทั้งหมด 3 ด้าน เพื่อให้ครอบคลุมส่วนต่าง ๆ ของวัตถุที่สแกน หากมีส่วนใดขาดให้ทำการสแกนซ้ำในจุดนั้น ๆ หลังจากสแกนครบทั้ง 3 ด้าน เสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้วจะทำการประกอบชิ้นรูปร่างของหินตัวอย่างโดยจะใช้ฟังก์ชันใน Artec Studio เพื่อรวมข้อมูลจุดต่าง ๆ ที่ได้จากการสแกนเข้าด้วยกัน โดยใช้การจัดตำแหน่งแบบอัตโนมัติ กรณีการจัดตำแหน่งแบบอัตโนมัติไม่ได้ จะปรับการจัดตำแหน่งเป็นแบบแมนนวลแทน เพื่อให้ชิ้นงานถูกประกอบอย่างแม่นยำและถูกต้อง เมื่อสร้างโมเดล 3 มิติ เบื้องต้นแล้ว จะใช้ตัวเลือกการปรับ sharpness เพื่อเพิ่มความคมชัดของพื้นผิว แสดงดังภาพ 31 เมื่อได้โมเดลตามที่ต้องการแล้วจึงจะบันทึกไฟล์ point cloud เป็นสกุลไฟล์ .PLY ซึ่งสามารถใช้ในโปรแกรมอื่น ๆ เพื่อการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาจากภาพถ่าย 3 มิติ ต่อไป



ภาพ 30 แสดงแผนภาพกระบวนการสร้างแบบจำลองภาพถ่ายสามมิติ



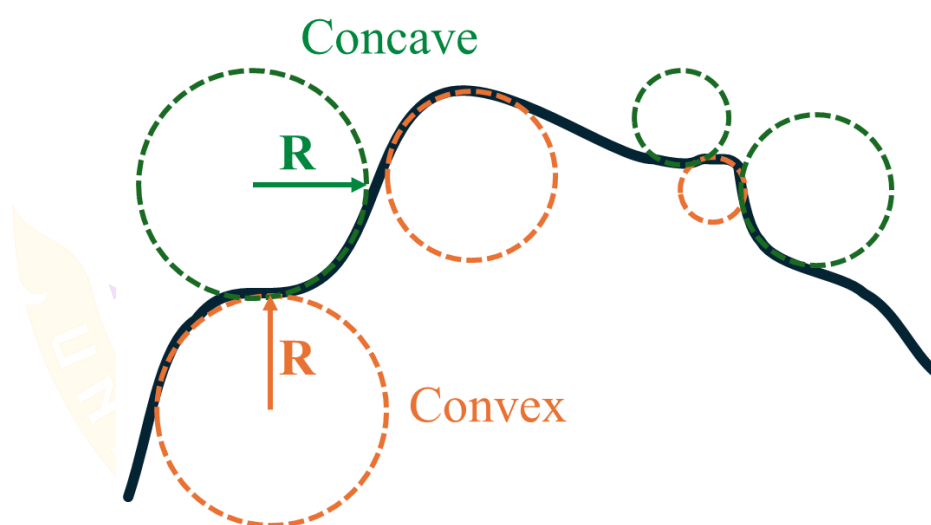
ภาพ 31 แสดงความละเอียดของตัวอย่างการสแกน 3 มิติ (a) อนุภาคตัวอย่าง (b) อนุภาคสแกน (c) เพิ่มความคมชัดของพื้นผิว

3. การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของหินโรยทาง

การศึกษาและวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของหินโรยทางเราจะใช้โปรแกรม MeshLab ในการวิเคราะห์รัศมีความโค้งในระดับพื้นผิวและการสีกหระของหินตัวอย่าง เพื่อศึกษารูปร่างในระดับความขรุขระ วิวัฒนาการของความโค้งในพื้นที่ (หรือส่วนกลับของรัศมีความขรุขระ) ถูกวิเคราะห์สำหรับเส้นโค้ง 2 มิติ ความโค้งที่จุด point cloud ใด ๆ สามารถกำหนดเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นสัมผัส ซึ่งเทียบเท่ากับส่วนกลับของรัศมีของวงกลมที่พอดีที่สุดที่จุด point cloud

$$K = \frac{1}{R} \quad (3.3)$$

โดยที่ R คือรัศมีของวงกลมสำหรับพื้นผิว ความโค้งมีความซับซ้อนในการกำหนดเนื่องจากจำเป็นต้องจับอัตราการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวจากระนาบสัมผัส แต่แนวคิดของทรงกลมที่พอดีที่สุด ซึ่งรัศมีคือส่วนกลับของความโค้ง ยังคงสามารถนำไปใช้ในการคำนวณความโค้งเฉลี่ยได้ แสดงดังภาพ 32

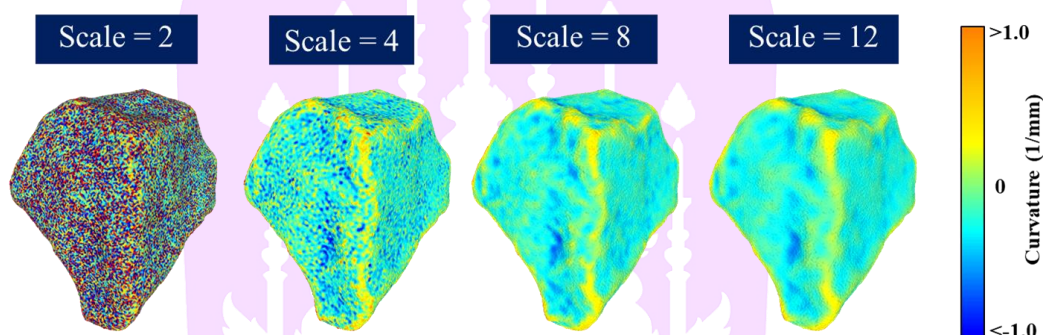


ภาพ 32 นิยามของความโค้งเป็นค่าผกผันของรัศมีวงกลม ณ จุดต่าง ๆ ของเส้นโค้ง

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก Quintanilla, et al., 2019

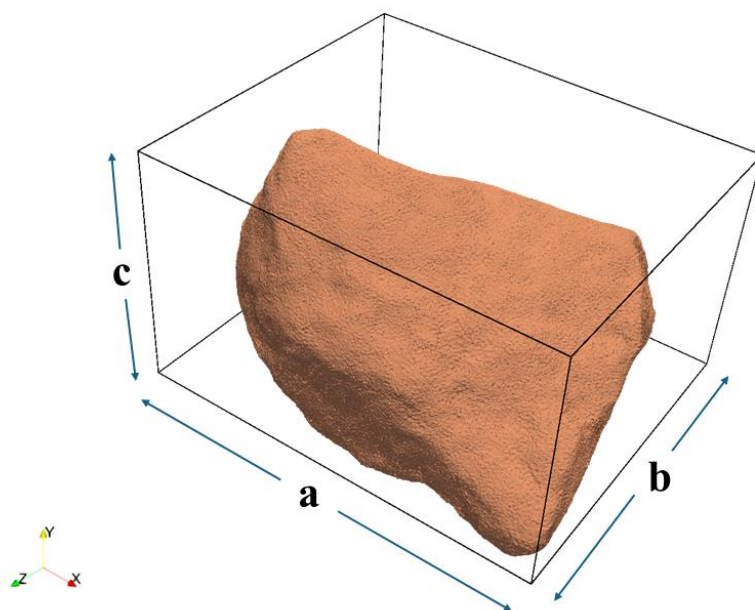
ในการหารัศมีความโค้ง ความโค้งสามารถกำหนดได้ในเชิงทฤษฎีว่าเป็นค่าผกผันของรัศมี (Quintanilla, et al., 2017) ขั้นตอนนี้จะดำเนินการโดยใช้อัลกอริทึม Algebraic Point Set Surfaces (APSS) เป็นฟังก์ชันตัวกรองใน MeshLab ที่มีพารามิเตอร์มาตราส่วน (scale) เป็นตัวปรับการคำนวณ

ข้อมูลพื้นผิวโดยพิจารณาจากบริเวณข้างเคียงของแต่ละจุดบนพื้นผิว (point cloud หรือ mesh model) กล่าวคือ พารามิเตอร์มาตราส่วนจะกำหนดขนาดของพื้นที่รอบจุดที่ต้องการคำนวณ ภาพ 33 จะแสดงการปรับมาตราส่วนของตัวกรองที่เปลี่ยนการคำนวณความโค้งข้างเคียงรอบตัวอย่าง หินโรยทาง เมื่อพิจารณาจากการตรวจสอบด้วยสายตาของผลลัพธ์ของตัวกรองและขนาดของปลายูนูนของหินโรยทาง จึงได้เลือกมาตราส่วนที่ 8 มาตราส่วนนี้ช่วยให้ศึกษาความขรุขระที่มีรัศมีมากกว่า 0.3 มม. ได้ ทั้งนี้เนื่องจากค่ามาตราส่วนในช่วง 6 และ 10 ใกล้เคียงกัน จึงให้ผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หลังจากได้เลือกมาตราส่วนตัวกรองแล้วจึงจะนำออกข้อมูลเป็นไฟล์ .PLY แล้วใช้ Python ดึงข้อมูลผลของรัศมีความโค้งออกเป็นไฟล์ .CSV เพื่อการประมวลผลต่อไป



ภาพ 33 แสดงการปรับเปลี่ยนมาตราส่วนตัวกรองของการคำนวณความโค้ง

นอกจากนี้ ในการศึกษาวิเคราะห์สำหรับการอธิบายรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ดโดยการกำหนดลักษณะของวัสดุแต่ละก้อนนั้นอธิบายได้โดยใช้เทนเซอร์ในแนวพื้นผิว (Surface Orientation Tensor, SOT) เพื่ออธิบายรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ด ซึ่งใช้ฟังก์ชันของค่าความแบน (flatness), ค่าความยาว (elongation) และค่าความกลม (compactness) โดยการนำเข้าไฟล์ .PLY ในโปรแกรม MeshLab แล้วทำการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ โดยที่ a, b และ c คือ ด้านที่ยาว กลาง และ สั้น ตามลำดับ ภาพ 34 แสดงลักษณะเฉพาะสำหรับอธิบายอนุภาคในรูปแบบความแบนและความยาวของหินโรยทาง ซึ่งทำให้สามารถกำหนดคุณลักษณะต่าง ๆ ของรูปร่างทั่วไปได้



ภาพ 34 ตัวอย่างการกำหนดความยาวลักษณะเฉพาะสำหรับอธิบายอนุภาคของหินโรยทาง:
a (ยาว), b (กลาง) และ c (สั้น)

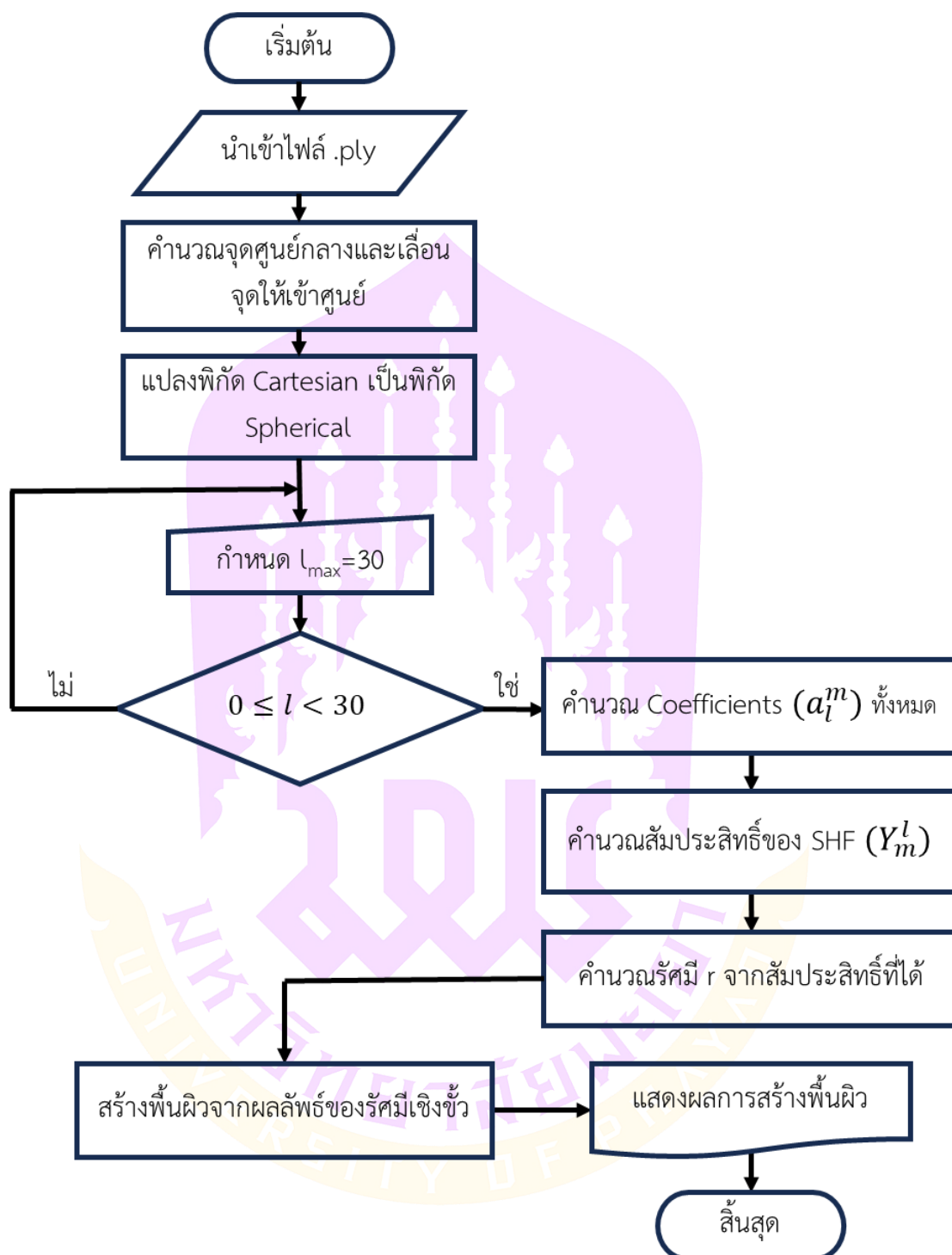
4. การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา 3 มิติ โดยใช้ฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical Harmonics, SH)

ในการศึกษาเราจะใช้ Python ในการขึ้นรูปสัณฐานวิทยา 3 มิติใหม่ โดยใช้สมการฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical Harmonics) เราจะใช้ฮาร์มอนิกทรงกลมฟังก์ชันมุมฉากเพื่ออธิบายอนุภาคใน 3 มิติ ดังนั้นพื้นผิวของอนุภาคจึงถูกกำหนดโดยฟังก์ชันระยะทางในแนวรัศมี $r(\theta, \varphi)$ ในพิกัดทรงกลม

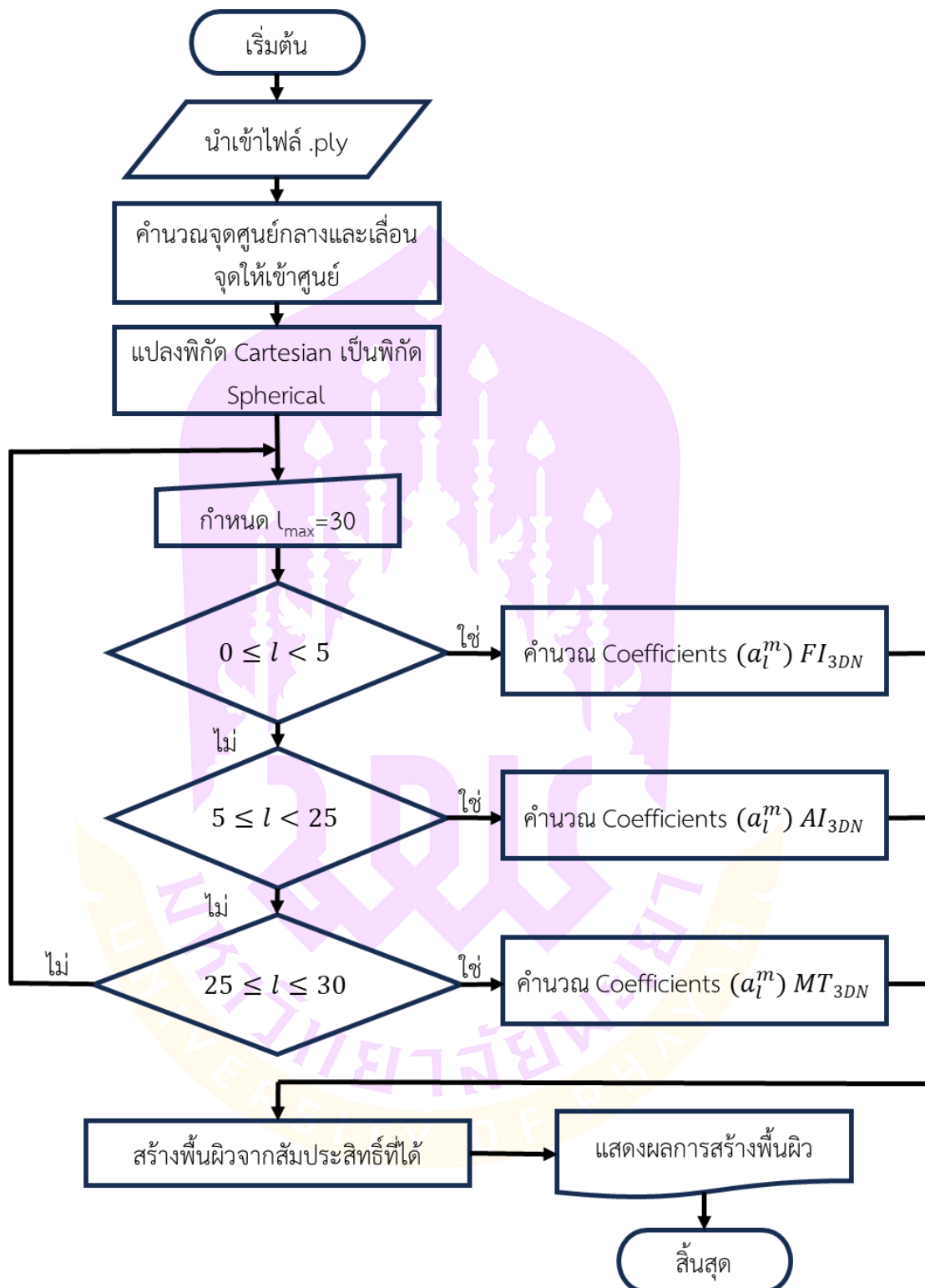
ภาพ 35 แสดงผังงาน flowchart การขึ้นรูปสัณฐานวิทยา 3 มิติ โดยใช้สมการฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical Harmonics, SH) โดยเริ่มต้นจากการนำเข้าตัวอย่างไฟล์ .PLY คำนวณจุดศูนย์กลางและเลื่อนจุดให้เข้าศูนย์แล้วค่อยทำการจัดแนว point cloud ตามแกนหลัก จากนั้นทำการแปลงพิกัด cartesian (x, y, z) เป็นพิกัด spherical (r, θ, φ) กำหนดลำดับของอนุกรม SH $l_{\max} = 30$ ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้ l มากที่สุดอยู่ที่ 30 ใช้ลูปวนซ้ำสำหรับค่า l และ m เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ SH (a_l^m) จากนั้นพื้นผิวของอนุภาคจะถูกสร้างขึ้นใหม่ โดยใช้ผลคูณของค่าสัมประสิทธิ์ a_l^m ที่คำนวณได้และฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม $Y_l^m(\theta, \varphi)$ โดยที่ผลลัพธ์จะแสดงในรูปของรัศมีเชิงขั้ว $r(\theta, \varphi)$

ในส่วนของการหาค่าดัชนีรูปร่าง 3 มิติ (FI_{3DN}) ดัชนีความเป็นมุมแบบ 3 มิติ (AI_{3DN}) และดัชนีพื้นผิวแบบ 3 มิติ (MT_{3DN}) ต้องทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ $SH (d_i^m)$ ทั้งหมดทุกตัว ก่อนค่อยนำค่าการคำนวณของแต่ละตัวไปคำนวณดัชนี ซึ่งจะจำแนกระดับของฮาร์มอนิกทรงกลมเป็น ช่วง ๆ โดยช่วงที่ $1 \leq l < 5$ คือการคำนวณดัชนีรูปร่าง 3 มิติ (FI_{3DN}) ช่วง $5 \leq l < 26$ คือการคำนวณความเป็นมุมแบบ 3 มิติ (AI_{3DN}) และช่วง $26 \leq l \leq 30$ คือการคำนวณพื้นผิวแบบ 3 มิติ (MT_{3DN}) แสดงดังภาพ 36





ภาพ 35 แผนผัง flowchart การขึ้นรูปสัณฐานวิทยา 3 มิติ โดยใช้สมการฮาร์โมนิกทรงกลม (Spherical Harmonics)



ภาพ 36 แผนผัง flowchart การขึ้นรูปสัณฐานวิทยา 3 มิติ โดยคำนวณดัชนีระบรูปร่างต่าง ๆ

FI_{3DN} AI_{3DN} และ MT_{3DN}

การศึกษามุมการกองของหินโรยทางที่ผสมเศษยางรถยนต์

1. กล้อง 3D Laser scanner FARO Focus

กล้อง 3D laser scanner เป็นอุปกรณ์ รุ่น FARO Focus M70 ที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองสามมิติ (3D) ของวัตถุหรือพื้นที่ด้วยความแม่นยำสูง แสดงดังภาพ 37 โดยใช้เทคโนโลยีการสแกนด้วยแสงเลเซอร์ ซึ่งกระบวนการทำงานของกล้องนี้อาศัยหลักการสะท้อนกลับของแสงเลเซอร์ที่ถูกส่งไปยังวัตถุแล้วสะท้อนกลับมาสู่เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งบนกล้อง การวัดระยะเวลาที่แสงเลเซอร์ใช้ในการเดินทางไปกลับ ทำให้กล้องสามารถคำนวณระยะทางได้อย่างแม่นยำในระดับมิลลิเมตร ในส่วนของการทำงาน กล้องจะปล่อยแสงเลเซอร์ออกไปยังวัตถุและรับข้อมูลที่สะท้อนกลับมากลับมา ข้อมูลเหล่านี้จะถูกแปลงเป็นชุดของจุดข้อมูลที่เรียกว่า “Point cloud” ซึ่งเป็นชุดของจุดจำนวนมากที่แสดงตำแหน่งเชิงพิกัดในระบบสามมิติ ข้อมูลนี้จะถูกนำมาประมวลผลเพื่อสร้างภาพโครงร่างของวัตถุที่สมบูรณ์ ซึ่งสามารถใช้ในการสร้างแบบจำลองสามมิติได้ กล้อง 3D Scan Laser ได้รับความนิยมในหลายสาขา เช่น วิศวกรรม, การสำรวจ, สถาปัตยกรรม และการผลิต เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญหลายประการ ได้แก่ ความแม่นยำในการวัด, ความเร็วในการสแกน และความสามารถในการประมวลผลข้อมูลในพื้นที่ขนาดใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานที่ต้องการการวัดรายละเอียดอย่างละเอียด เช่น การสร้างแผนผังอาคาร, การตรวจสอบโครงสร้างทางวิศวกรรม หรือการวิเคราะห์รูปร่างและขนาดของวัตถุที่มีความซับซ้อน ในเชิงทฤษฎี กล้อง 3D Scan Laser ทำงานโดยอาศัยหลักการ “Time of Flight” ซึ่งเป็นการวัดเวลาที่แสงเลเซอร์ใช้ในการเดินทางจากกล้องไปยังวัตถุและสะท้อนกลับมากลับมา กล้องจะคำนวณระยะทางของแต่ละจุดจากข้อมูลนี้ และนำมาสร้างภาพสามมิติของวัตถุ ข้อมูลที่ได้จากการสแกนมีความละเอียดสูง ทำให้สามารถนำไปใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำในการประมวลผลเชิงพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีคุณสมบัติแสดงดังตาราง 11



ภาพ 37 กล้อง 3D Laser scanner FARO Focus

ตาราง 11 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

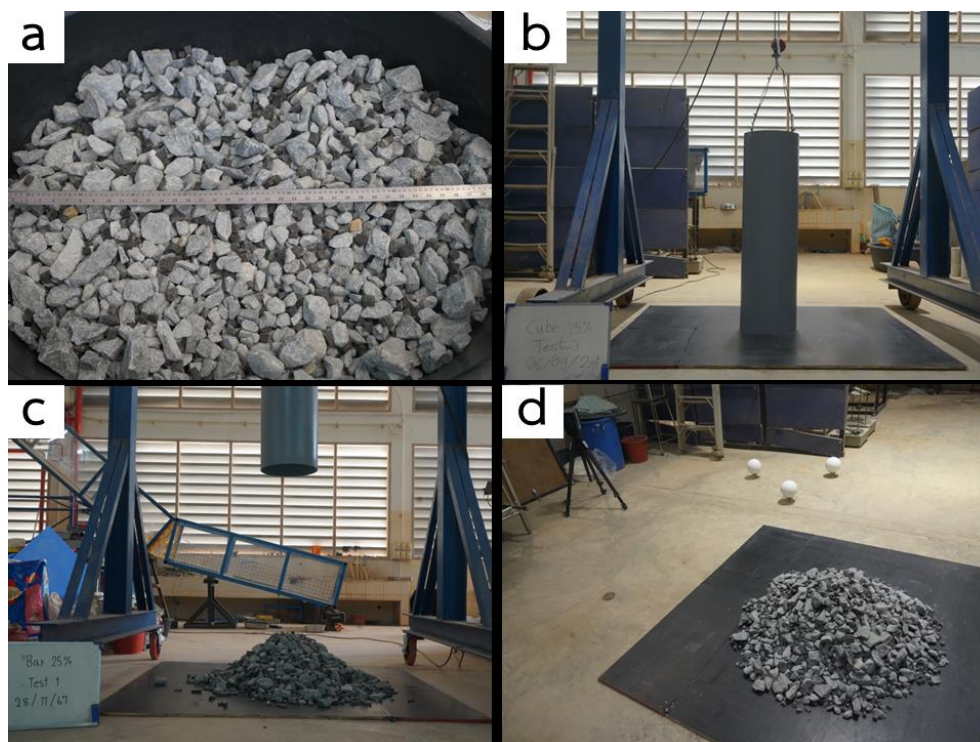
2. การทดสอบมุมการกองของหินโรยทาง

ตามทฤษฎีการทดสอบแบบเม็ด Wu, et al. (2002) กระบอกทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร (4–5 เท่าของขนาดอนุภาคสูงสุด) และความสูง 90 เซนติเมตร (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 ในแต่ละกลุ่มจะทำการผสมเศษยางรถยนต์ที่สัสด่วนและขนาดของรูปร่างต่าง ๆ (0%, 5%, 13% และ 20%) โดยปริมาตร (ภาพ 38(a)) แสดงดังตาราง 12 เตรียมตัวอย่างหินโรยทางโดยการล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและสิ่งปนเปื้อน จากนั้นปล่อยให้แห้งสนิทเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการทดสอบในขั้นตอนถัดไป หลังจากนั้นจะทำการเตรียมชุดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยแผ่นรองหิน ท่อ PVC ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร และรอกสำหรับยกท่อ PVC ขึ้น เพื่อใช้ในการทดสอบ

ภาพ 37 แสดงตัวอย่างการทดสอบจนถึงการเสร็จสิ้นการสแกน โดยหินโรยทางตัวอย่างจะถูกเติมลงไปในท่อ PVC ทรงกระบอกจนถึงระยะความสูง 90 เซนติเมตร (ภาพ 38(b)) จากนั้นจึงทำการทดสอบโดยใช้รอกยกกระบอกของท่อขึ้นสูงแล้วปล่อยให้หินตกอย่างอิสระจนกระทั่งรอกยกสูงอยู่เหนือกองหิน (ภาพ 38(c)) ซึ่งในแต่ละรอบของการทดสอบ จะใช้กล้อง 3D laser scan ที่มีความละเอียดสูงในการบันทึกภาพ 3 มิติ ของกองหิน (ภาพ 38(d)) โดยกล้องสามารถจับรายละเอียดของโครงสร้างพื้นผิวและมุมการกองของหินได้อย่างแม่นยำ ข้อมูลที่ได้รับจากการสแกนจะถูกนำไปประมวลผลในโปรแกรม Autodesk Recap และโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณมุมการกองของหินภายใต้สภาวะการทดสอบต่าง ๆ การวิเคราะห์นี้จะช่วยประเมินผลกระทบของเศษยางรถยนต์ต่อพฤติกรรมการกองของหิน และสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของตัวอย่างหินได้



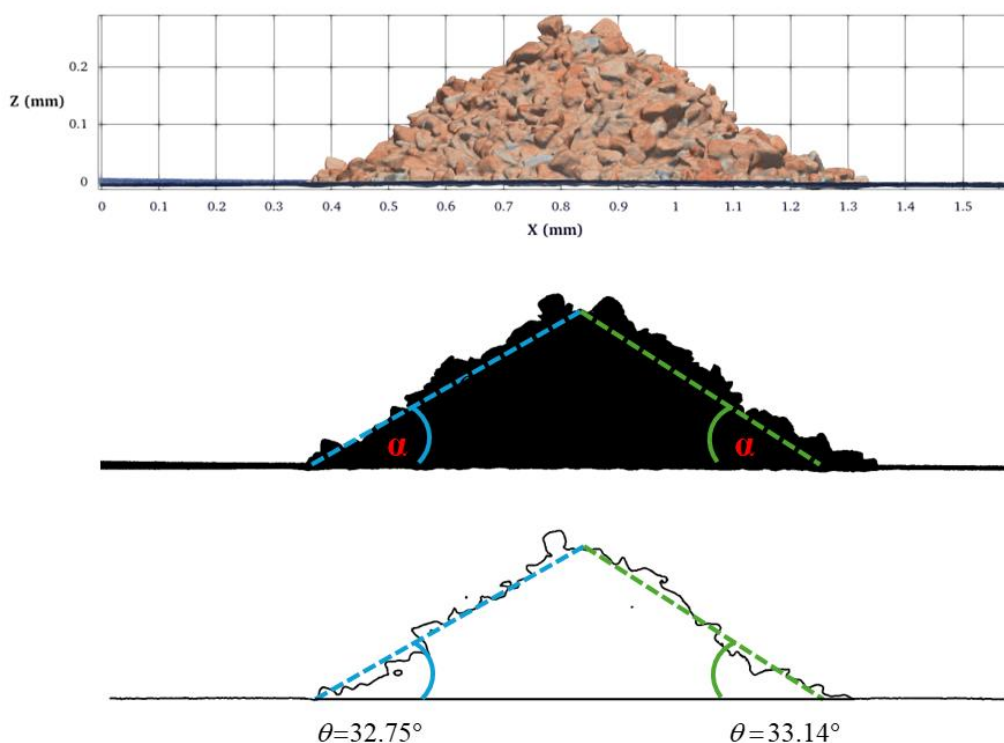
ภาพ 38 การทดสอบมุมลาดเอียง

ตาราง 12 รายการทดสอบมุมลาดเอียงของหินโรยทาง

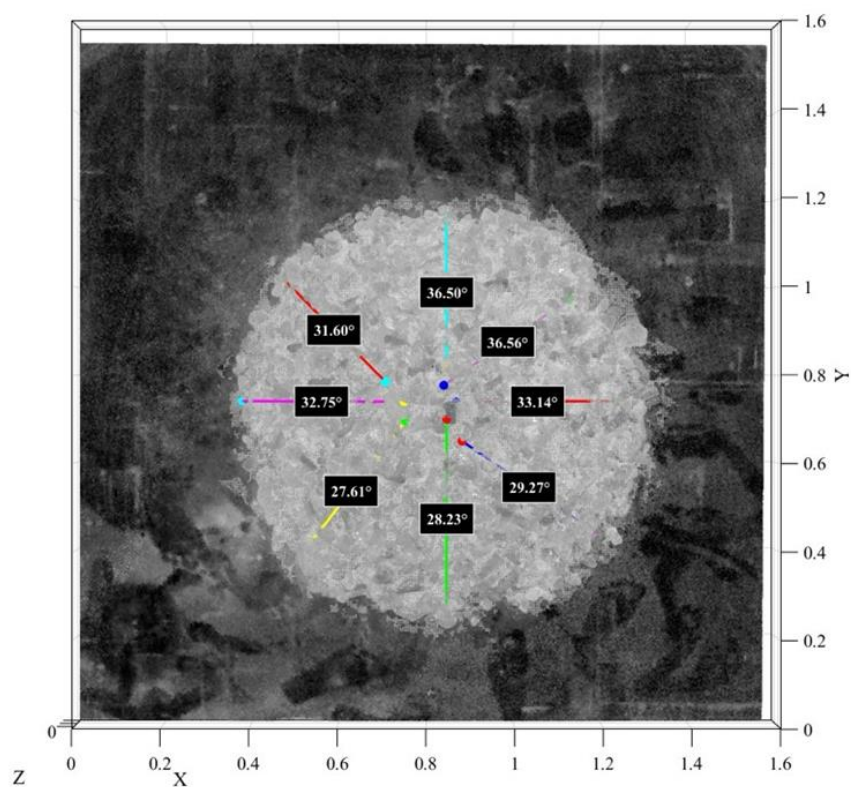
ตัวอย่าง	ตัวอย่างหินโรยทาง	เปอร์เซ็นต์เศษยาง (%)	รูปแบบเศษยาง
1	หินโรยทางใหม่	0	-
2		5	ลูกบาศก์, แท่ง, แผ่น
3		13	ลูกบาศก์, แท่ง, แผ่น
4		20	ลูกบาศก์, แท่ง, แผ่น
5	หินโรยทาง LAA 500 รอบ	0	-
6		5	ลูกบาศก์, แท่ง, แผ่น
7		13	ลูกบาศก์, แท่ง, แผ่น
8		20	ลูกบาศก์, แท่ง, แผ่น
9	หินโรยทาง LAA 1,000 รอบ	0	-
10		5	ลูกบาศก์, แท่ง, แผ่น
11		13	ลูกบาศก์, แท่ง, แผ่น
12		20	ลูกบาศก์, แท่ง, แผ่น

3. การวัดมุมการกองด้วยภาพถ่ายสามมิติ

ในการวัดมุมการกองโดยใช้ภาพถ่ายสามมิติ จะทำการคำนวณมุมระหว่างจุดยอดบนสุดของกองวัสดุลงไปยังขอบล่างของกองในแต่ละด้าน ตามแนวระนาบที่กำหนด ซึ่งเป็นการประเมินจากภาพด้านข้างในมุมมองแบบสองมิติตามที่แสดงในภาพ 39 โดยดำเนินการวัดมุมทั้งหมด 8 ด้าน รอบกองตัวอย่าง แสดงดังภาพ 40 และนำค่ามุมที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยให้เป็นค่าตัวแทนของการทดลองแต่ละครั้ง เพื่อให้ได้ค่าที่สะท้อนลักษณะโดยรวมของมุมการกองของวัสดุในแต่ละการทดลองได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากกองวัสดุอาจไม่ได้มีความสมมาตรในทุกทิศทาง การวัดเพียงมุมเดียวอาจไม่เพียงพอในการอธิบายลักษณะทางกายภาพของมุมการกองได้อย่างครบถ้วน การใช้ค่าเฉลี่ยจากหลายทิศทางจึงช่วยลดผลกระทบจากความไม่สม่ำเสมอ และทำให้ผลที่ได้มีความเป็นกลาง มีความน่าเชื่อถือ และสามารถเปรียบเทียบระหว่างการทดลองต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำมากยิ่งขึ้น



ภาพ 39 มุมมองด้านข้างสองมิติของการวัดมุม



ภาพ 40 การวัดมุมทั้ง 8 ด้านในการทดสอบมุมการกอง



บทที่ 4

ผลการศึกษา

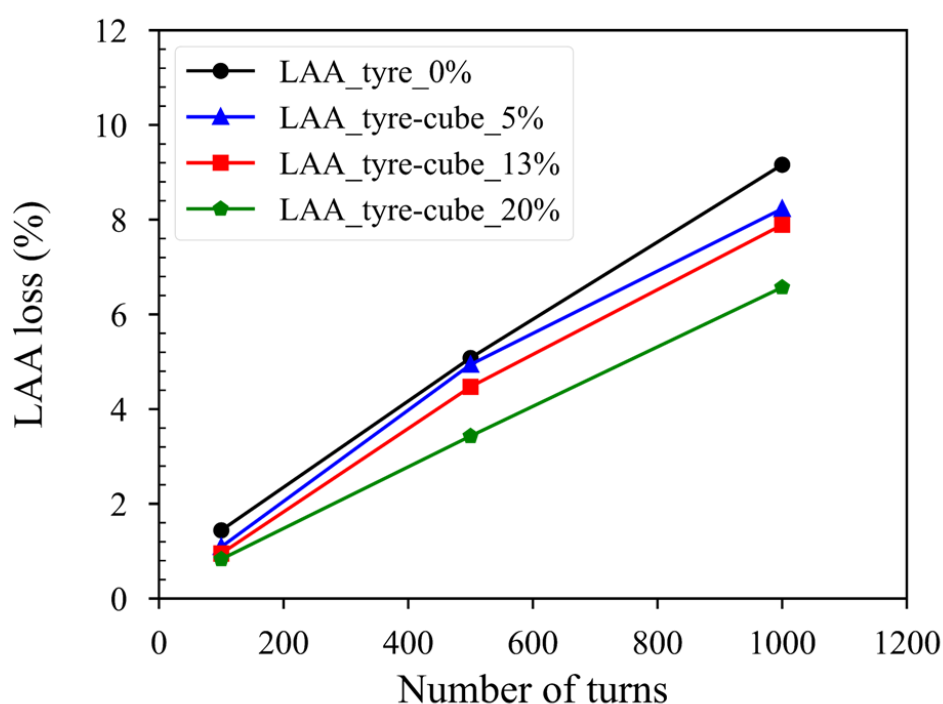
ในการศึกษานี้ ได้ทำการวิเคราะห์และประเมินผลข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เพื่อศึกษาพฤติกรรมของหินโรยทางภายใต้สภาวะการใช้งาน รวมถึงผลกระทบของการสึกหรอที่เกิดขึ้นหลังจากการทดสอบ LAA ที่ผสมเศษยางรถยนต์ที่ไม่ใช่แล้ว โดยวิธีการประมวลผลข้อมูลด้วยภาพถ่าย 3 มิติ ซึ่งใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์ความโค้งผิว การคำนวณค่ารัศมีความขรุขระ และการใช้ฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical Harmonics) เพื่อจำแนกลักษณะของอนุภาค นอกจากนี้ยังมี การเปรียบเทียบลักษณะทางเรขาคณิตและสัญญาณวิทยาของหินโรยทางก่อนและหลังการทดสอบ เพื่อให้เข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพื้นผิว และอิทธิพลของวัสดุผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน

ผลการศึกษาจะถูกนำเสนอในรูปแบบของแผนภาพ กราฟ ตาราง และภาพจำลองสามมิติ เพื่อนำเสนอการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคหินโรยทางที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสึกหรอ ข้อมูลที่ได้รับจากการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์ในเชิงปริมาณโดยใช้วิธีการทางสถิติและการประมวลผลข้อมูล เพื่อให้เข้าใจถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับหินโรยทางหลังจากการทดสอบ ซึ่งรวมถึง การคำนวณค่าทางเรขาคณิต เช่น เหลี่ยมมุม ความกลม ความโค้ง และรัศมีความขรุขระของอนุภาค โดยค่าต่าง ๆ เหล่านี้ จะถูกนำมาเปรียบเทียบระหว่างสภาวะก่อนและหลังการทดสอบ เพื่อระบุระดับของการสึกหรอและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคบอลลาสต์ นอกจากนี้ ยังมีการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างชุดตัวอย่างที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน เช่น หินโรยทางที่ไม่มีวัสดุเสริมและหินโรยทางที่มีการผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบว่าการผสมวัสดุเสริมเศษยางรถยนต์ มีผลต่อการลดการสึกหรอของหินโรยทางหรือไม่ การเปรียบเทียบนี้จะช่วยให้สามารถสรุปแนวโน้มและประเมินประสิทธิภาพของวัสดุเสริมในเชิงวิศวกรรมได้อย่างชัดเจนขึ้น

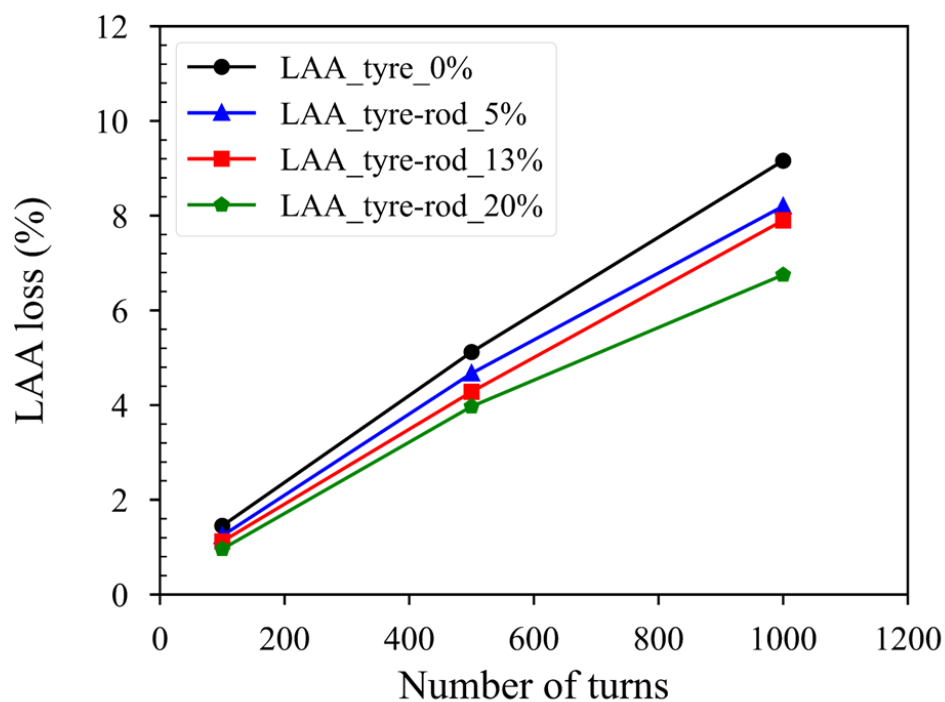
ผลการทดสอบการเร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

การสึกหรอของหินโรยทางที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ Los Angeles Abrasion (LAA) จะถูกคำนวณจากสัดส่วนน้ำหนักที่สูญเสียไปเมื่อเทียบกับน้ำหนักตั้งต้น ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญในการประเมินความทนทานต่อแรงกระแทกและแรงเสียดทานของวัสดุ ในการทดสอบการเร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทางจะผสมเศษยางรถยนต์ที่ 0 5 13 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และจะกำหนดจำนวนรอบการหมุนของการทดสอบอยู่ที่ 100 500 และ 1,000 รอบ ซึ่งในการทดสอบแต่ละรอบการหมุนจะใช้ตัวอย่างเดิมในการทดสอบ

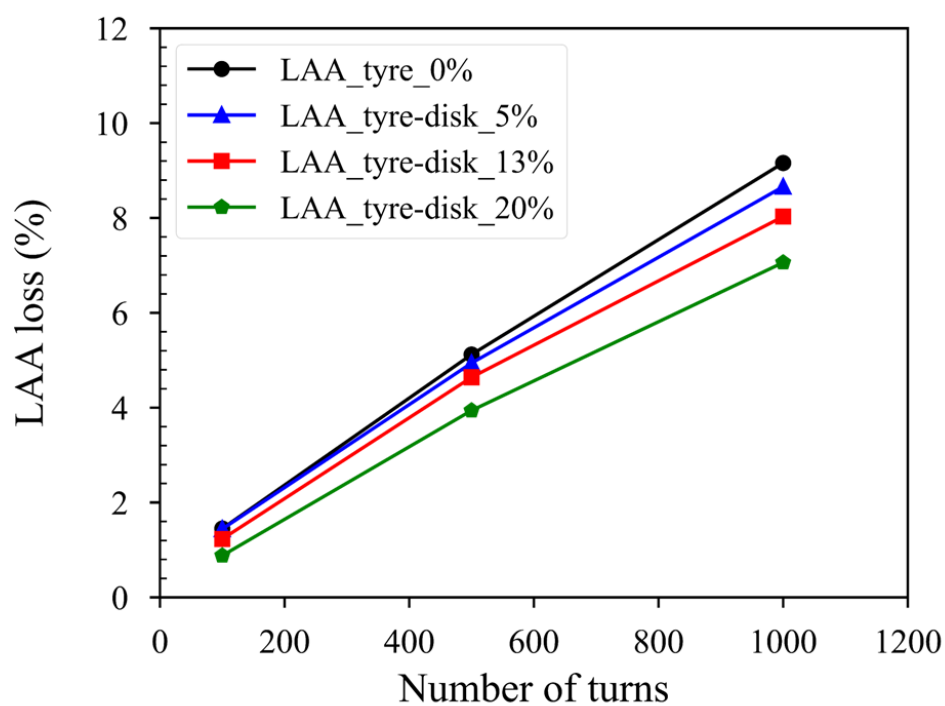
ภาพ 41 แสดงผลการสึกหรอของหินโรยทาง (% LAA loss) เทียบกับจำนวนรอบการหมุนของเครื่อง Los Angeles Abrasion (LAA) ซึ่งใช้ทดสอบความทนทานของวัสดุต่อการเสียดสีและการกระแทก โดยพบว่าเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ค่าการสึกหรอของมวลหินก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในการผสมเศษยางรถยนต์สามารถช่วยลดอัตราการสึกหรออย่างมีนัยสำคัญ โดยหินโรยทางที่ไม่มีเศษยาง (LAA_tyre_0%) มีค่าการสูญเสียสูงสุด ขณะที่หินที่ผสมเศษยางในสัดส่วน 5%, 13% และ 20% ตามลำดับมีค่าการสูญเสียลดลงเรื่อย ๆ โดยเฉพาะที่สัดส่วน 20% ให้ผลการลดลงของ LAA loss ที่ชัดเจนที่สุด แสดงให้เห็นว่าการเติมเศษยางช่วยลดแรงกระแทกและแรงเสียดสีที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ ทำให้หินแตกหักและสูญเสียมวลน้อยลง



a) ตัวอย่างการสึกหรอผสมเศษยางทรงลูกบาศก์



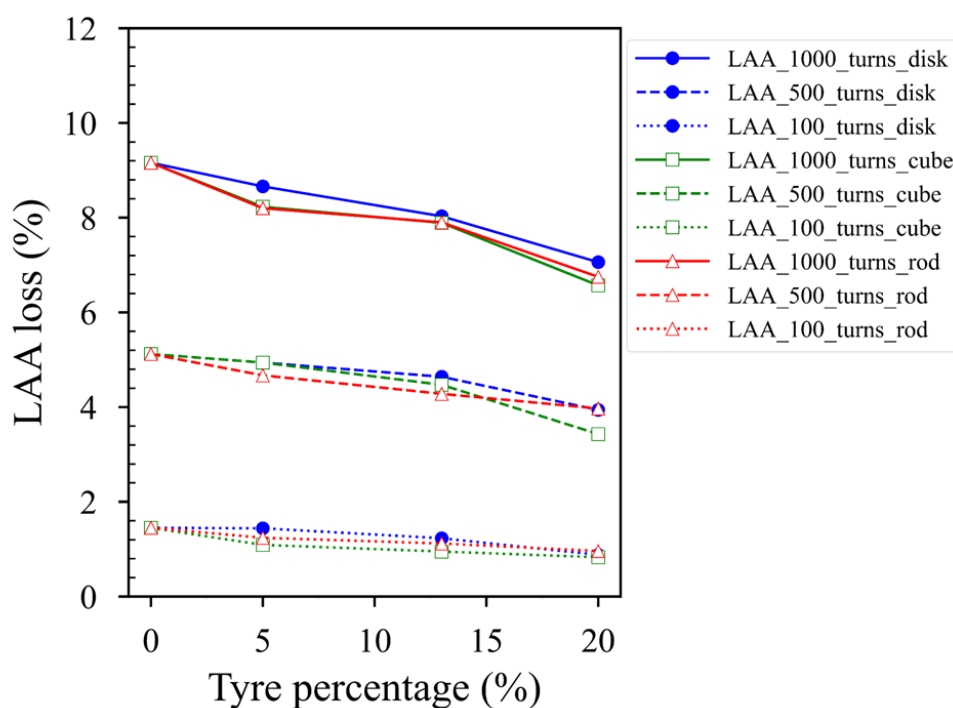
b) ตัวอย่างการฝึกหัดผสมเศษยางทรงแท่ง



c) ตัวอย่างการฝึกหัดผสมเศษยางทรงแผ่น

ภาพ 41 เปอร์เซนต์การฝึกหัด LAA เทียบกับจำนวนรอบการหมุน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของรูปทรงยางที่ผสมไปในการทดสอบ LAA แสดงดัง ภาพ 42 พบว่า ในช่วงรอบการหมุน 100-500 รอบ ค่าการสึกหรอของหินไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับแต่ละรูปแบบของเศษยาง ในช่วงรอบต้น ๆ การแตกหักของหินยังอยู่ในระดับที่ต่ำ เนื่องจากแรงกระแทกจาก LAA ยังไม่ทำให้หินแตกหักมากนัก ทำให้ความแตกต่างของการสึกหรอในช่วง 100-500 รอบไม่ชัดเจน เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นเป็น 1,000 รอบ เห็นความแตกต่างของค่าการสึกหรอชัดเจนขึ้น โดยหินเกิดการเสื่อมสภาพและแตกหักมากขึ้น จะเห็นได้ว่ายางรูปทรงแผ่น (disk) มีแนวโน้มให้ค่าการสึกหรอสูงกว่ารูปทรงอื่น ในขณะที่ยางทรงลูกบาศก์ และทรงแท่ง นั้น มีค่าการสึกหรอที่ต่ำกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างระหว่างยางทรงลูกบาศก์และทรงแท่งก็ยังไม่สามารถที่จะอธิบายถึงความสำคัญหรือสรุปได้ชัดเจนมากนัก



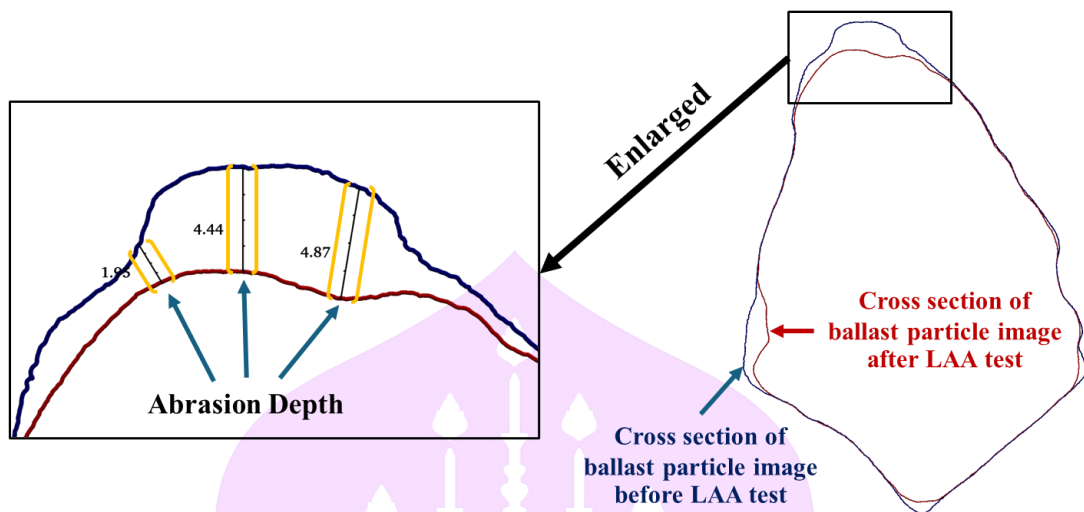
ภาพ 42 ผลกระทบของเศษยางแต่ละรูปแบบต่อการสึกหรอของหินโรยทาง

ผลการประเมินลักษณะพื้นฐานของหินโรยทาง

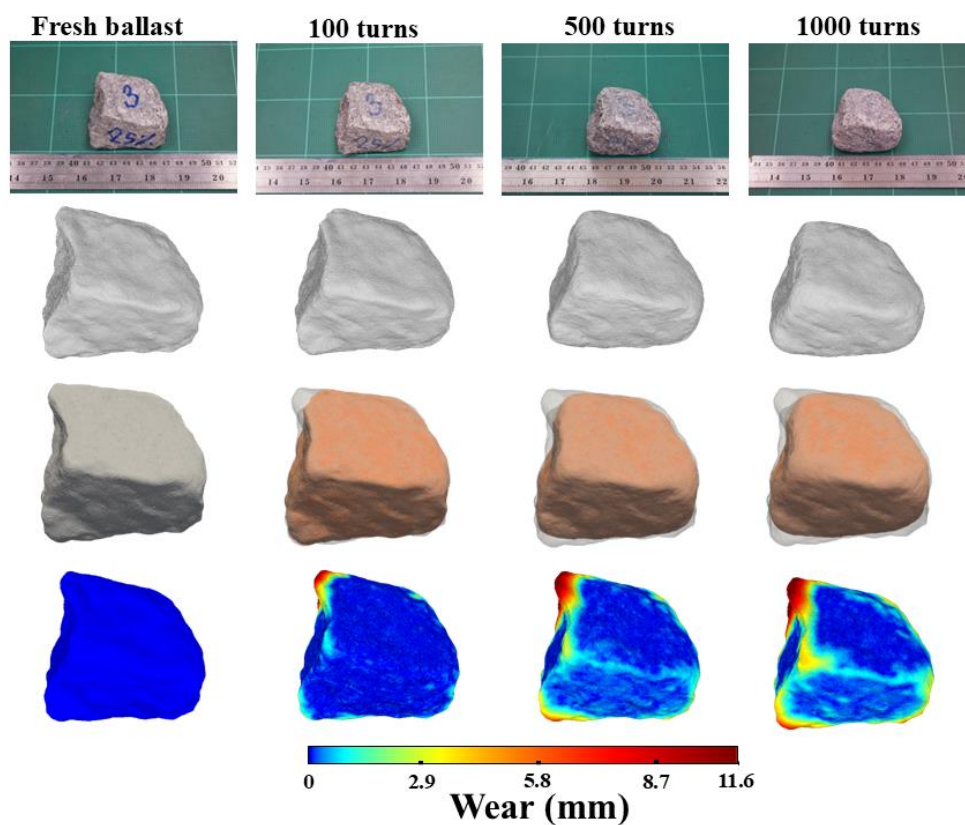
1. ผลการประเมินการสึกหรอด้วยภาพ 3 มิติ

ความลึกของการสึกหรอจะคำนวณโดยการเปรียบเทียบภาพทั้งสองภาพก่อนและหลังการทดสอบ LAA เพื่อให้ได้ค่าความแตกต่างที่คำนวณเป็นระยะทาง ดังที่แสดงภาพ 43

ภาพ 44 แสดงผลลัพธ์ของการพัฒนาการการสึกหรอของอนุภาคหินโรยทางหนึ่งอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพ 3 มิติ โดยเปรียบเทียบสภาพของอนุภาคตั้งแต่เริ่มต้น (fresh ballast) จนถึงหลังจากการทดสอบด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion (LAA) เป็นจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น ได้แก่ 100, 500 และ 1,000 รอบ ในแถวแรกของภาพ เป็นภาพถ่ายของหินจริงที่ใช้ในการทดลอง โดยแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของขนาดและรูปร่างของหินเมื่อผ่านการทดสอบหลายรอบ จะเห็นว่าหินมีการสึกหรอและมีขนาดเล็กลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น แถวที่สองเป็นแบบจำลอง 3 มิติของอนุภาคที่สร้างขึ้นจากการสแกน เพื่อแสดงโครงสร้างพื้นผิวของหินในแต่ละระยะของการสึกหรอ โดยแสดงรายละเอียดของพื้นผิวได้อย่างชัดเจน แถวที่สามแสดงถึงการเปรียบเทียบพื้นผิวก่อนและหลังการทดสอบ โดยใช้สีส้มเพื่อเน้นพื้นที่ที่มีการสึกหรอ ซึ่งจะเห็นได้ว่าพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบที่เพิ่มมากขึ้น และแถวสุดท้ายเป็นผลลัพธ์ความลึกของการสึกหรอจะแสดงระดับของการสึกหรอในโซนต่าง ๆ รวมทั้งมุมคม ขอบ และพื้นผิวเรียบ ซึ่งค่าของการสึกหรอ (wear map) ใช้ช่วงสีจากสีน้ำเงินถึงสีแดงเพื่อแสดงระดับความลึกของการสึกหรอ โดยสีน้ำเงิน หมายถึงบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยหรือไม่มีเลย ขณะที่สีแดงแสดงถึงบริเวณที่เกิดการสึกหรอมากที่สุด จะเห็นได้ว่าหลังจาก 100 รอบเริ่มมีพื้นที่สีแดงปรากฏขึ้น และเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อถึง 500 และ 1,000 รอบ แสดงให้เห็นถึงกระบวนการสึกหรอของอนุภาคหินโรยทางที่เกิดขึ้นตามจำนวนรอบของการทดสอบ โดยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพ 3 มิติ สามารถช่วยให้เข้าใจลักษณะของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของหินได้อย่างละเอียดมากขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาความทนทานและประสิทธิภาพของหินโรยทางในงานวิศวกรรมทางรถไฟ

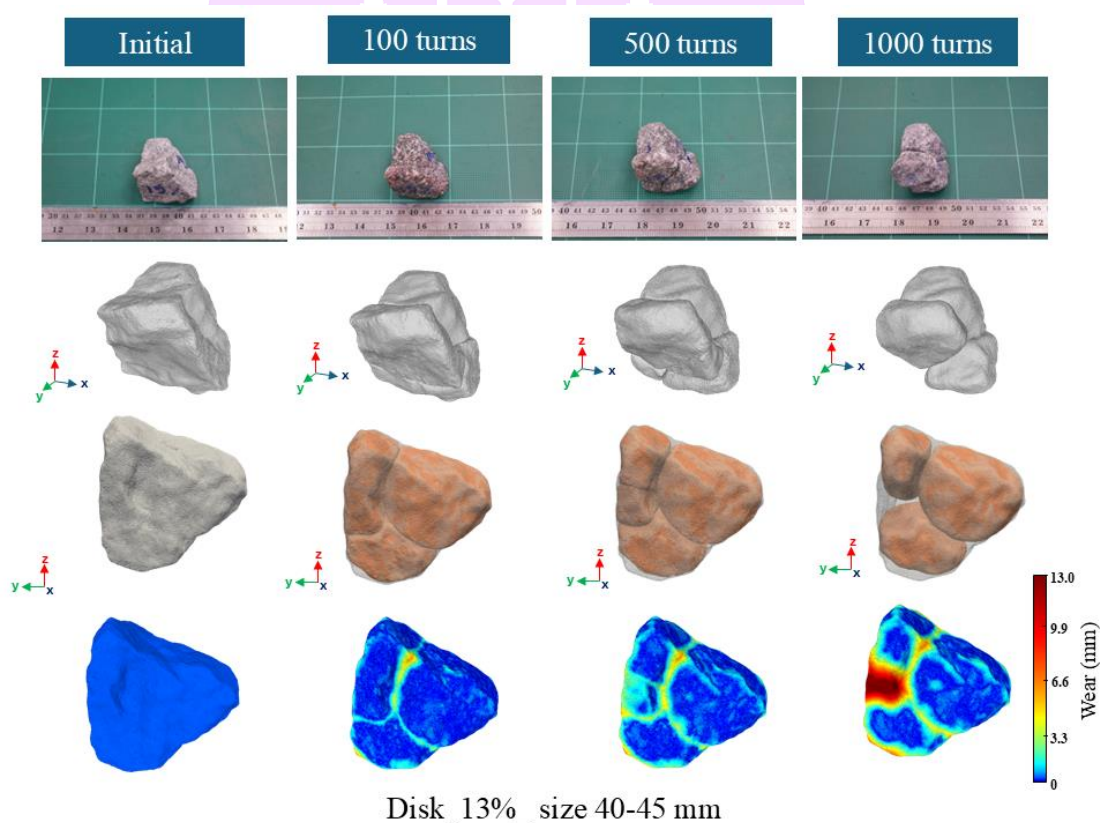


ภาพ 43 อธิบายการคำนวณความลึกของการสึกหรอ

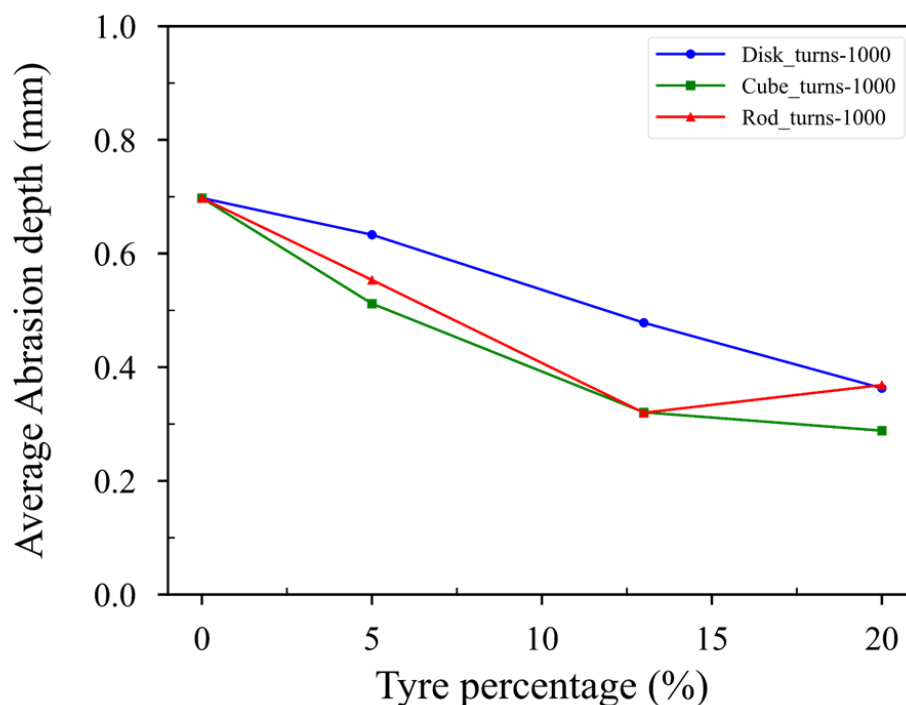


ภาพ 44 พัฒนาการความลึกการสึกหรอของอนุภาคหินโรยทางหนึ่งอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพ 3 มิติ

ในการประเมินค่าความสึกของการสึกหรอ จะพิจารณาเฉพาะอนุภาคของหินโรยทางที่ยังคงสภาพสมบูรณ์และไม่เกิดการแตกหัก เพื่อใช้ในการคำนวณเท่านั้น เนื่องจากอนุภาคที่เกิดการแตกหักออกเป็นชิ้นส่วนย่อยหลายชิ้น อาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของค่าความสึกของการสึกหรอที่วัดได้ อนุภาคที่แตกหักแสดงดังภาพ 45 และภาพ 46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสึกของการสึกหรอเฉลี่ยกับเปอร์เซ็นต์ของเศษยางรถยนต์ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณเศษยางช่วยลดความสึกของการสึกหรอในหินโรยทางได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วง 0–13% อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของเศษยางเกิน 13% ไปจนถึง 20% อัตราการลดลงของค่าความสึกของการสึกหรอกลับไม่แตกต่างกัน



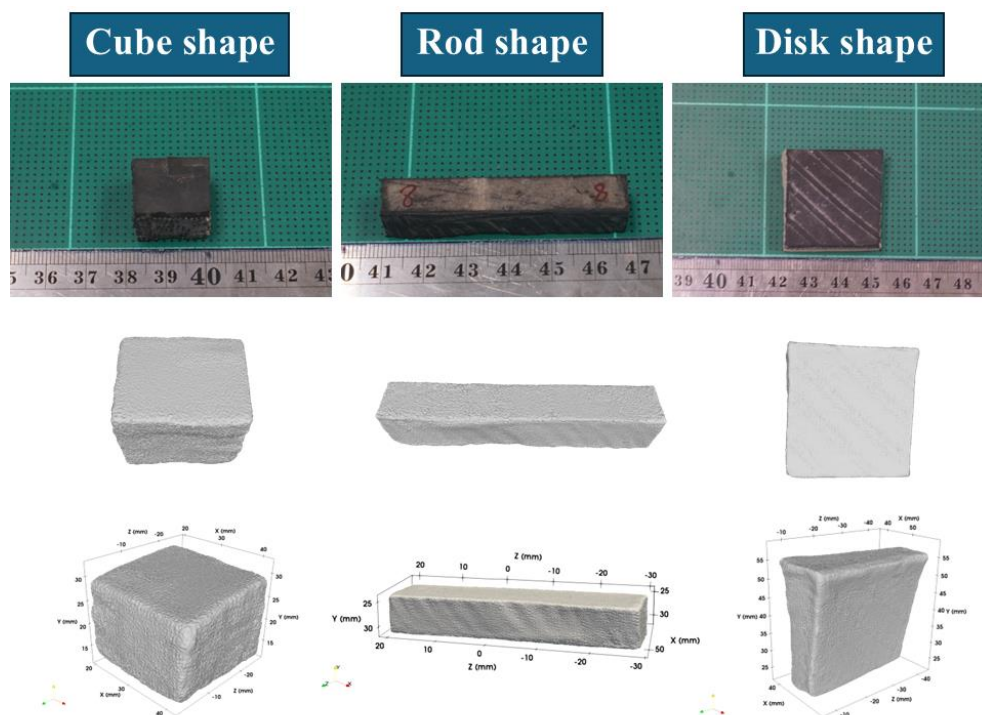
ภาพ 45 ตัวอย่างอนุภาคของหินโรยทางก่อนที่แตกหัก



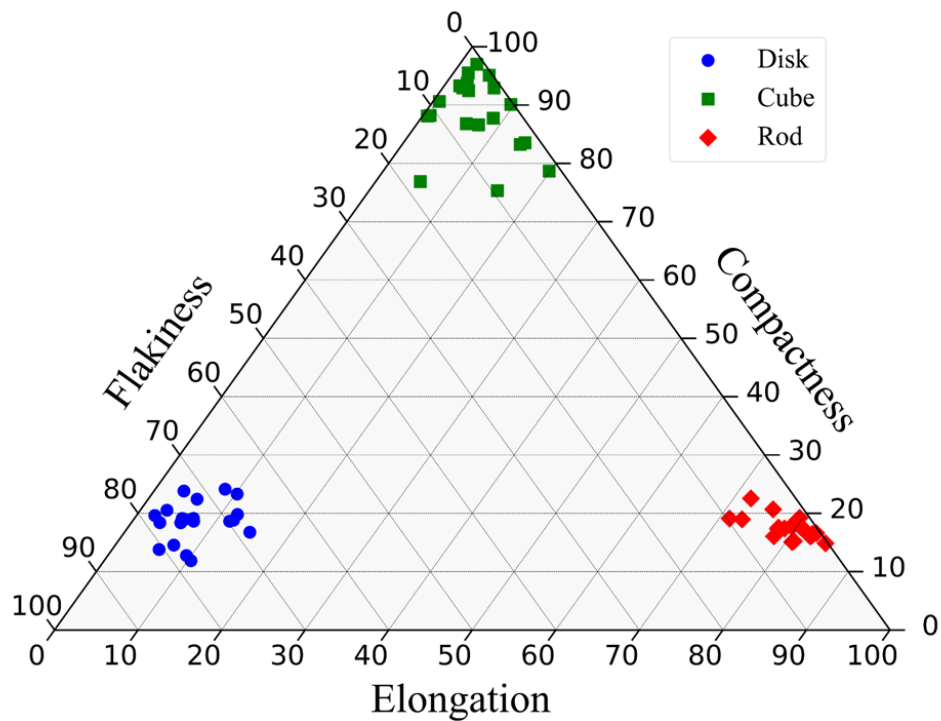
ภาพ 46 ความลึกของการสึกหรอโดยเฉลี่ยของหินโรยทางที่อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ของเศษยางรถยนต์

2. ผลการประเมินลักษณะพื้นฐานวิทยารูปร่างทั่วไปของหินโรยทาง

ในการพิจารณารูปร่างของยางทั้ง 3 รูปแบบ (ภาพ 47) เพื่อระบุลักษณะพื้นฐานวิทยาของยางที่แตกต่างกันชัดเจน โดยใช้เทนเซอร์ในแนวพื้นผิว (Surface Orientation Tensor, SOT) ในการพิจารณารูปร่างเรขาคณิตของอนุภาคจริง ภาพ 48 แผนภาพสามเหลี่ยมแสดงค่าความเป็นลูกบาศก์ ค่าความแบน และค่าความยาวของเศษยางทั้ง 3 รูปแบบ พบว่า พารามิเตอร์รูปร่างของเศษยางที่ใช้ SOT แตกต่างกันอย่างชัดเจน จะเห็นได้ว่ายางทรงลูกบาศก์จะอยู่มุมบนของกราฟ ส่วนยางทรงแท่งจะอยู่มุมล่างขวาของกราฟ และสุดท้ายยางทรงแผ่นจะอยู่มุมล่างซ้ายของกราฟ 3 เหลี่ยม แสดงให้เห็นว่ายางทั้ง 3 รูปแบบ ที่นำมาใช้ทดสอบครั้งนี้มีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

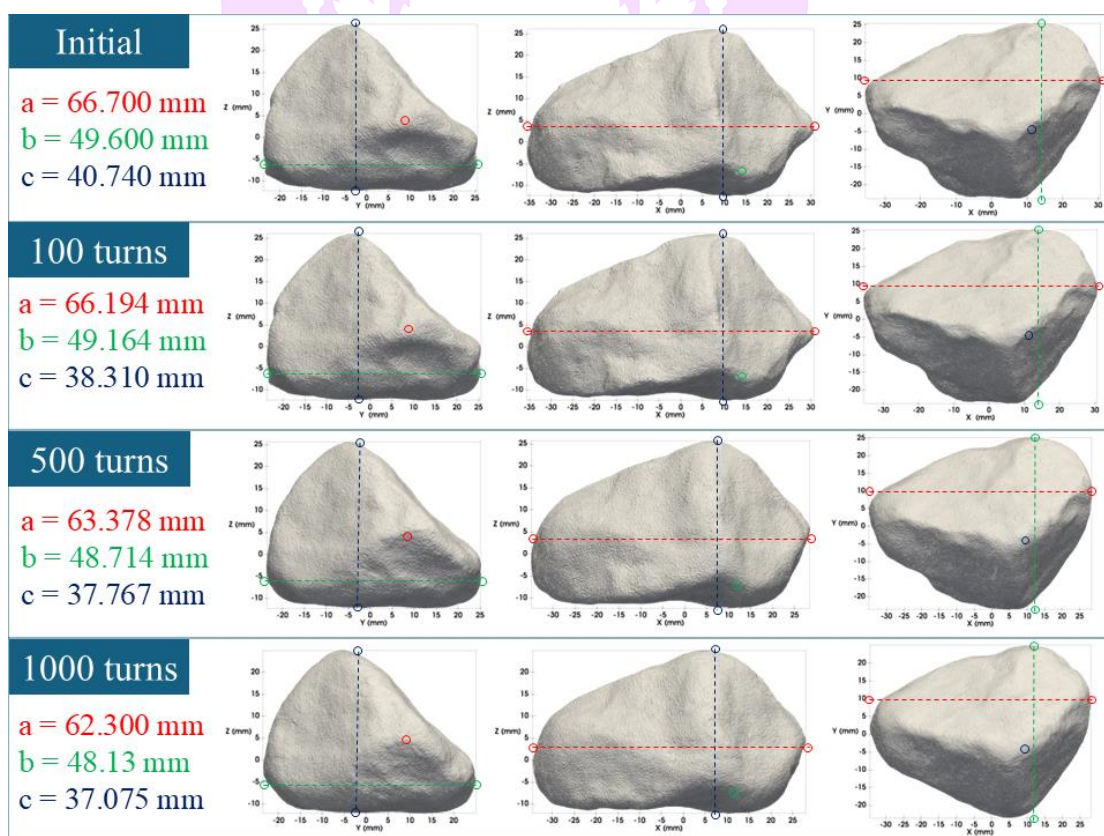


ภาพ 47 ลักษณะรูปร่างของเศษยางรถยนต์

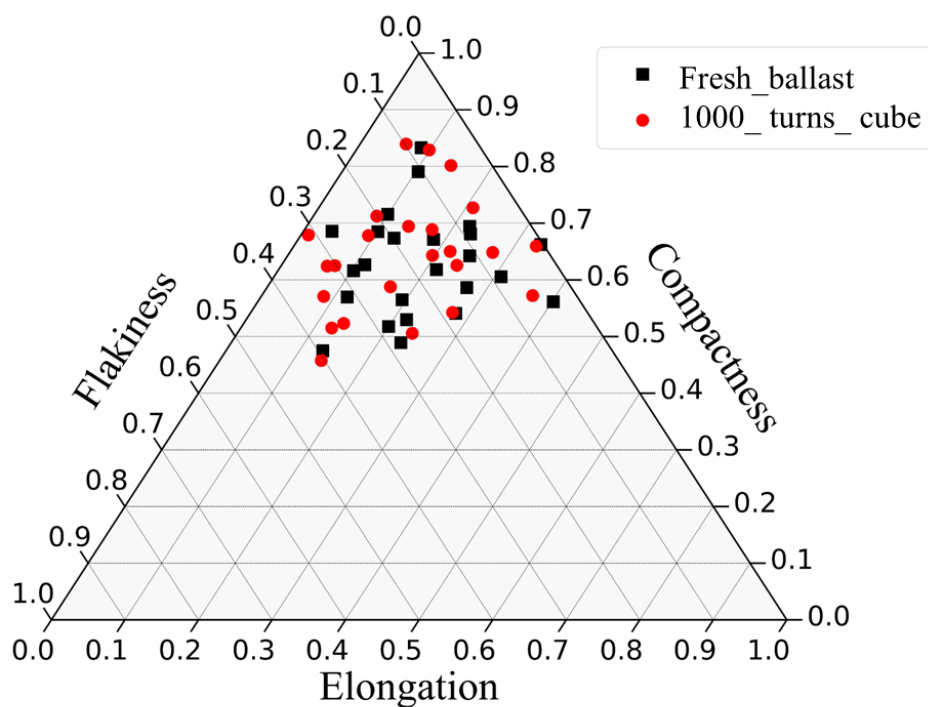


ภาพ 48 แผนภาพสามแกน (ternary) แสดงรูปร่างของตัวอย่างเศษยางรถยนต์

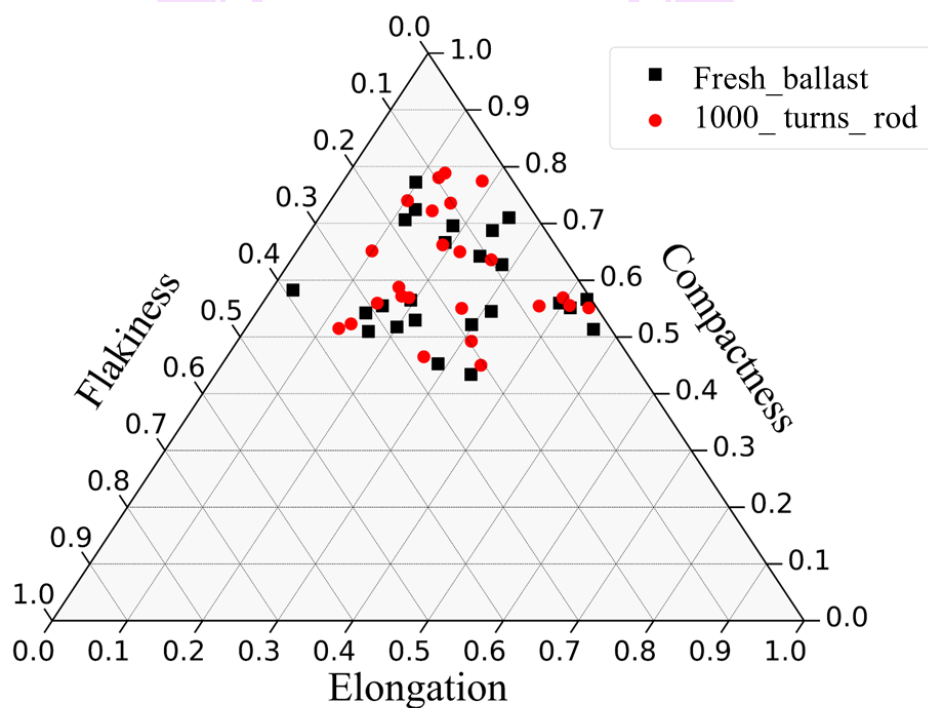
สัณฐานวิทยามักใช้เพื่ออธิบายวัสดุหินโรยทางในแง่ของลักษณะภายนอก รวมทั้งรูปร่างและพื้นผิว ภาพ 49 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์อนุภาคของหินโรยทางสำหรับการอธิบายรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ดโดยการกำหนดลักษณะของวัสดุแต่ละก้อนนั้นไม่ว่าจะเป็นความเป็นทรงกลม การยืดออกและความแบนเรียบ ซึ่งลักษณะรูปร่างของวัสดุชนิดเม็ดสามารถแสดงได้จากตำแหน่งบนแผนภาพสามแกน (ternary) ภาพ 50 แสดงแผนภาพสามแกน (ternary) สำหรับอธิบายรูปร่างของหินโรยทางก่อนและหลังการทดสอบ LAA จะเห็นได้ว่าการกระจายของตัวอย่างที่ผสมเศษยางทรงแผ่นหลังจากทดสอบ LAA ที่ 1,000 รอบการหมุน การกระจายของกราฟกว้างกว่ายางทรงลูกบาศก์และทรงแท่งเล็กน้อย อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่ได้นั้นยังไม่สามารถแสดงความแตกต่างระหว่างยางแต่ละรูปทรงได้อย่างชัดเจน แต่สามารถสังเกตได้ว่าเมื่อหินผ่านการทดสอบ LAA ที่ 1,000 รอบแล้ว โดยภาพรวมที่ค่าความเป็นลูกบาศก์หรือทรงกลม (Compactness) ตัวอย่างหินโรยทางที่ผสมเศษยางทรงแผ่นนั้นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นและมีระยะห่างระหว่างก่อนและหลังการทดสอบ LAA นั้น กว้างมากกว่าทรงลูกบาศก์และทรงแท่ง แสดงดังภาพ 51



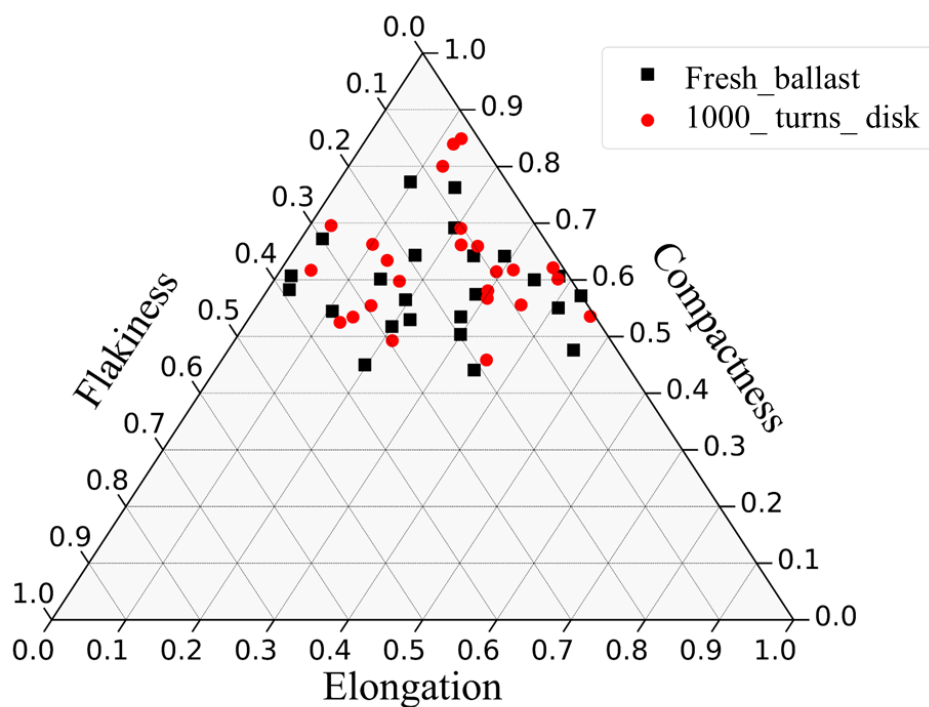
ภาพ 49 การวิเคราะห์อนุภาคของหินโรยทางระยะยาว (a) กลาง (b) และสั้น (c)



a) แผนภาพสามแกน (ternary) ของตัวอย่างหินโรยทางผสมยางทรงลูกบาศก์

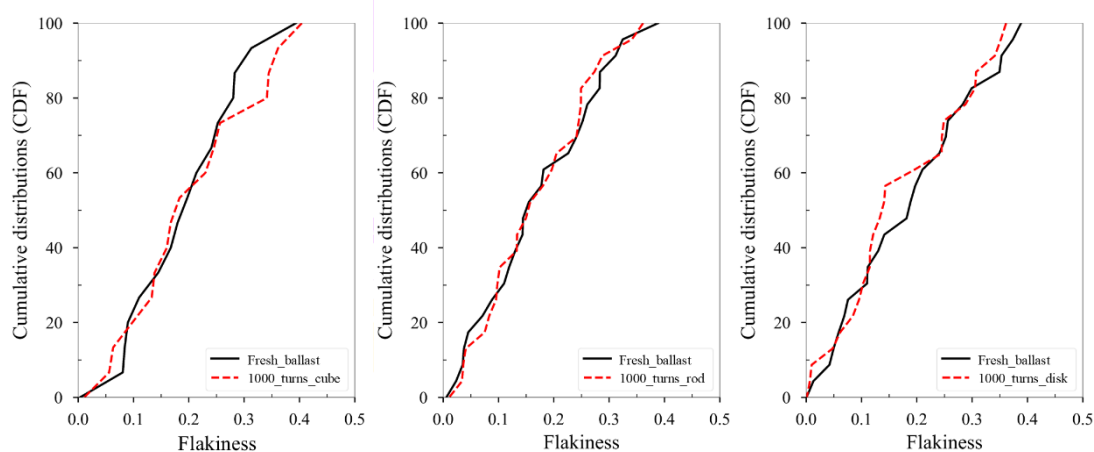


b) แผนภาพสามแกน (ternary) ของตัวอย่างหินโรยทางผสมยางทรงแท่ง

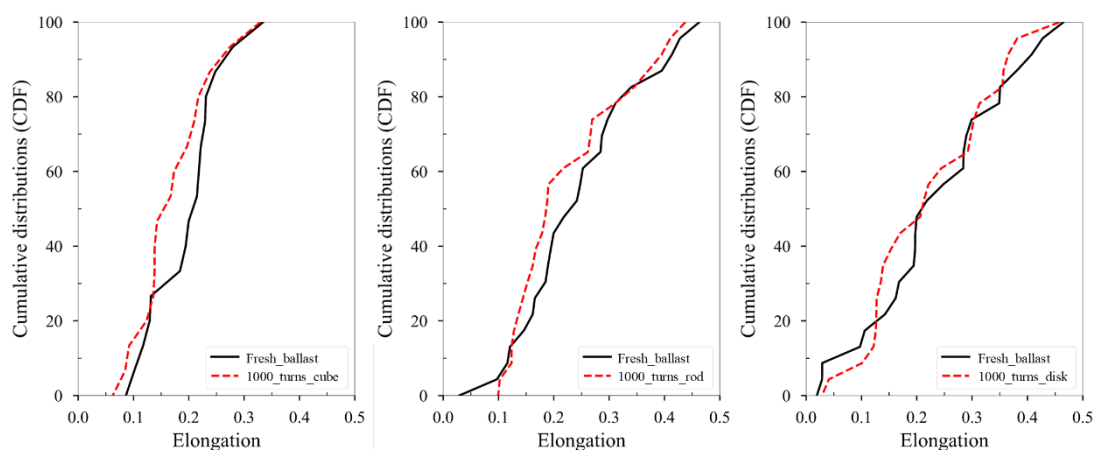


c) แผนภาพสามแกน (ternary) ของตัวอย่างหินโรยทางผสมยางทรงแผ่น

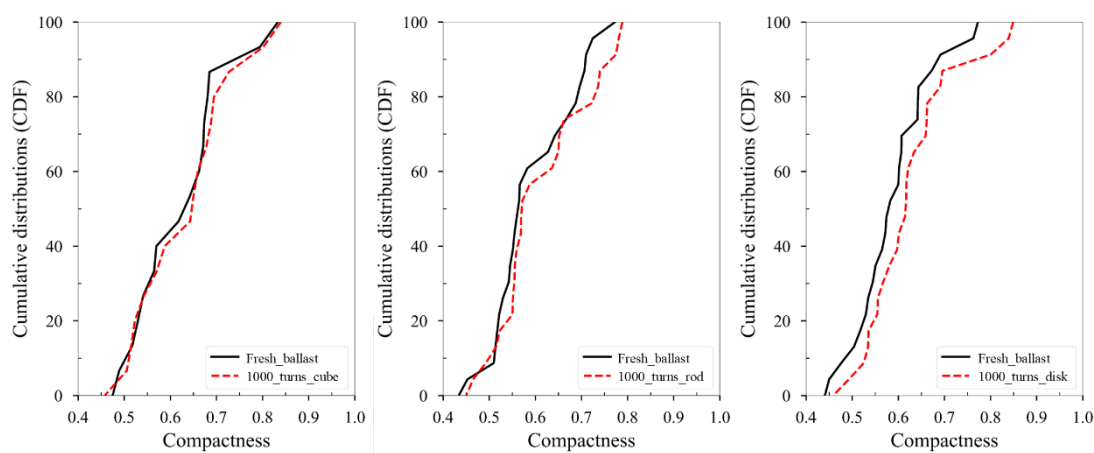
ภาพ 50 แผนภาพสามแกน (ternary) ของตัวอย่างหินโรยทางก่อนและหลังการทดสอบ LAA



a) ค่าความแบนเรียบ (Flakiness: F)



b) ค่าความยาว (Elongation: E)

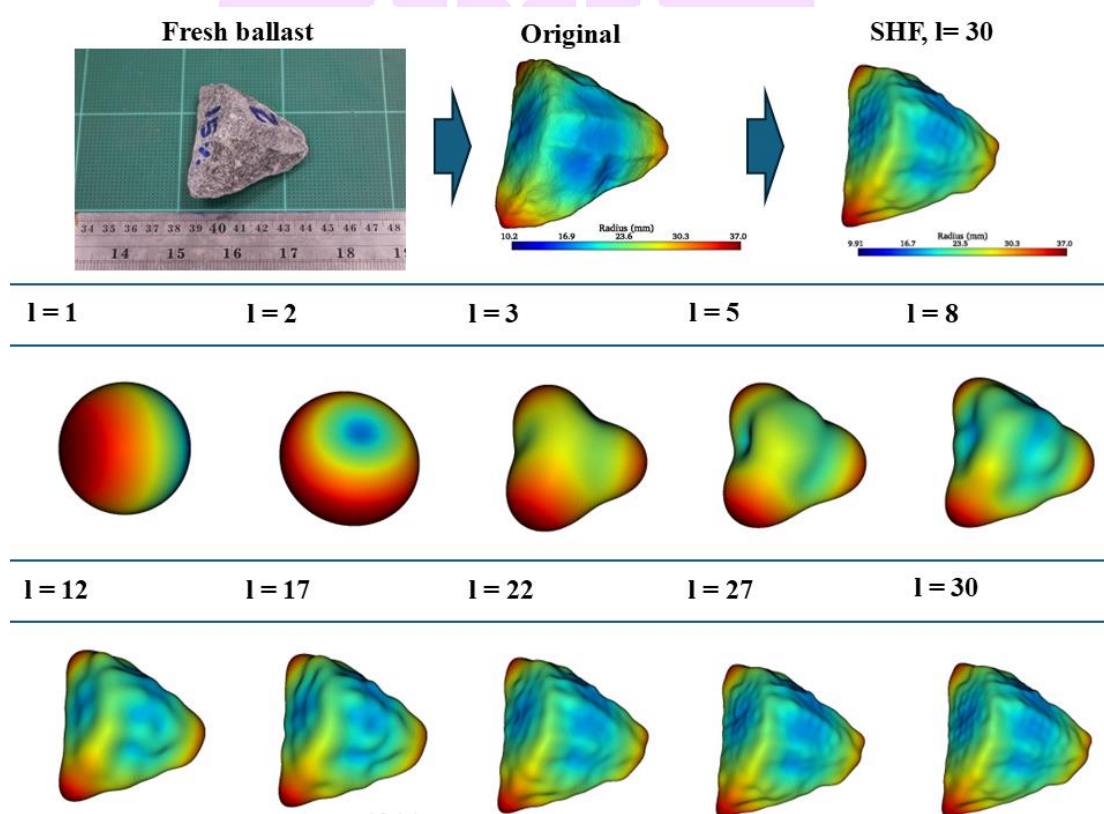


c) ค่าความเป็นลูกบาศก์หรือทรงกลม (Compactness: C)

ภาพ 51 กราฟแสดงค่าดัชนีค่าความแบนเรียบ (F) ความยาว (E) และความเป็นลูกบาศก์หรือทรงกลม (C)

การวิเคราะห์ฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical Harmonics Function, SHF)

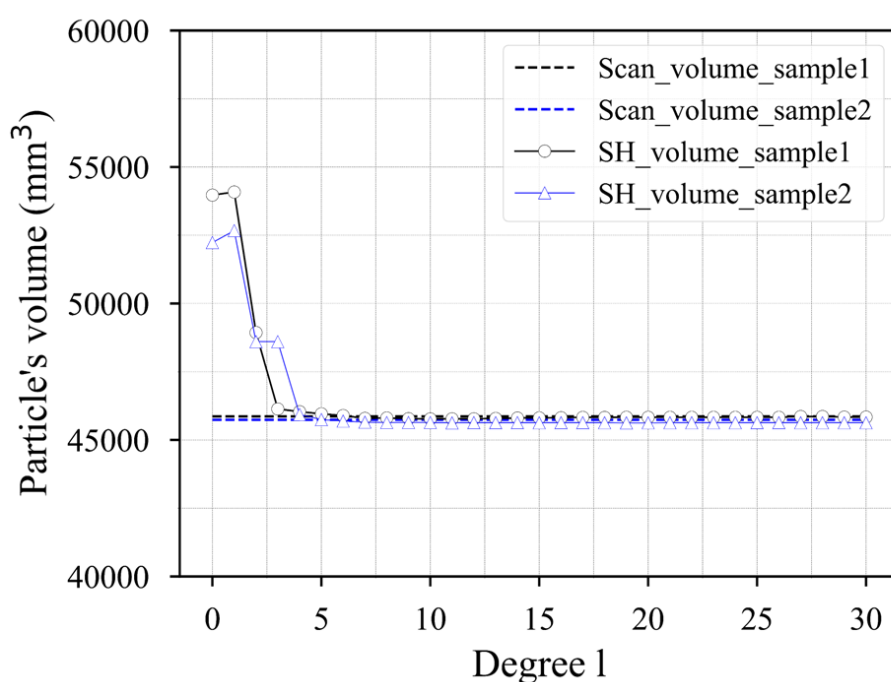
การวิเคราะห์ SHF จะถูกนำมาใช้เพื่อสร้างพื้นผิวของอนุภาคขึ้นใหม่ ภาพ 52 แสดงตัวอย่างผลของการสะสมระดับ l ของฮาร์มอนิกทรงกลมตั้งแต่ระดับ $l=1$ ถึง $l=30$ จะเห็นได้ว่า เมื่อระดับ l มีค่าน้อย โมเดลที่ได้จะมีลักษณะเป็นทรงกลมหรือรูปร่างที่มีความเรียบง่าย ขณะที่เมื่อค่าของระดับ l เพิ่มขึ้น รายละเอียดของพื้นผิวจะมีความซับซ้อนและใกล้เคียงกับโครงสร้างของอนุภาคต้นแบบมากขึ้น กระบวนการนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถของฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลมในการสร้างแบบจำลองของอนุภาคที่มีลักษณะไม่เป็นระเบียบและมีความซับซ้อนสูง โดยระดับของฟังก์ชันถูกกำหนดโดยพารามิเตอร์ l ซึ่งมีผลต่อความละเอียดและความถูกต้องของโมเดลที่สร้างขึ้น



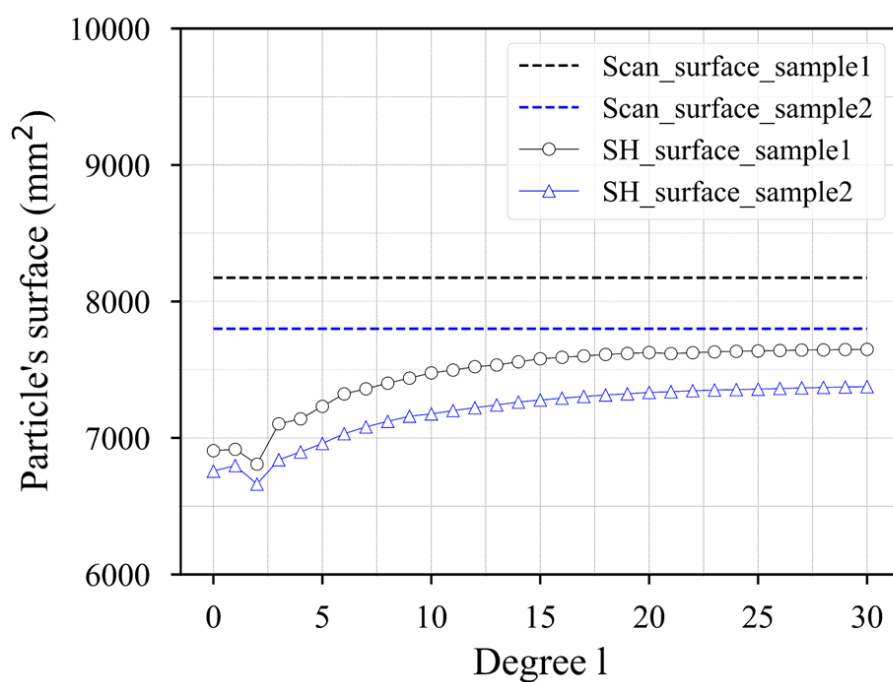
ภาพ 52 ตัวอย่างผลของการสะสมระดับ l ของฮาร์มอนิกทรงกลมตั้งแต่ระดับ $l=1$ ถึง $l=30$

ภาพ 53 แสดงการเปรียบเทียบปริมาตรและพื้นที่ผิวระหว่างอนุภาคที่ได้จากการสแกนและอนุภาคที่สร้างขึ้นใหม่โดยใช้ SHF ที่ระดับ l เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 30 พบว่า หาก l มีค่ามากกว่า 5 ความแตกต่างของปริมาตรระหว่างอนุภาคสแกนกับอนุภาคที่สร้างขึ้นจะน้อยกว่า 1% ขณะที่พื้นที่ผิวจะเริ่มคงที่ที่ระดับ $l=22$ โดยความแตกต่างของพื้นที่ผิวจะน้อยกว่า 7% และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระดับ l เพิ่มขึ้น ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการเพิ่มค่า l ส่งผลให้อนุภาคที่สร้างขึ้น

มีความใกล้เคียงกับอนุภาคต้นแบบมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ของปริมาตรและพื้นที่ผิวของอนุภาคสแกนกับอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ SHF แสดงดังภาพ 54 พบว่าค่าความลาดชันของเส้นระหว่างผลลัพธ์ของปริมาตรและพื้นที่ผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ SH และอนุภาคสแกนอยู่ที่ 1.007 และ 1.058 ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองค่าใกล้เคียงกับ 1 แสดงให้เห็นว่า อนุภาคที่สร้างขึ้นใหม่โดยใช้ SHF สามารถจำลองลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคสแกนได้อย่างแม่นยำ

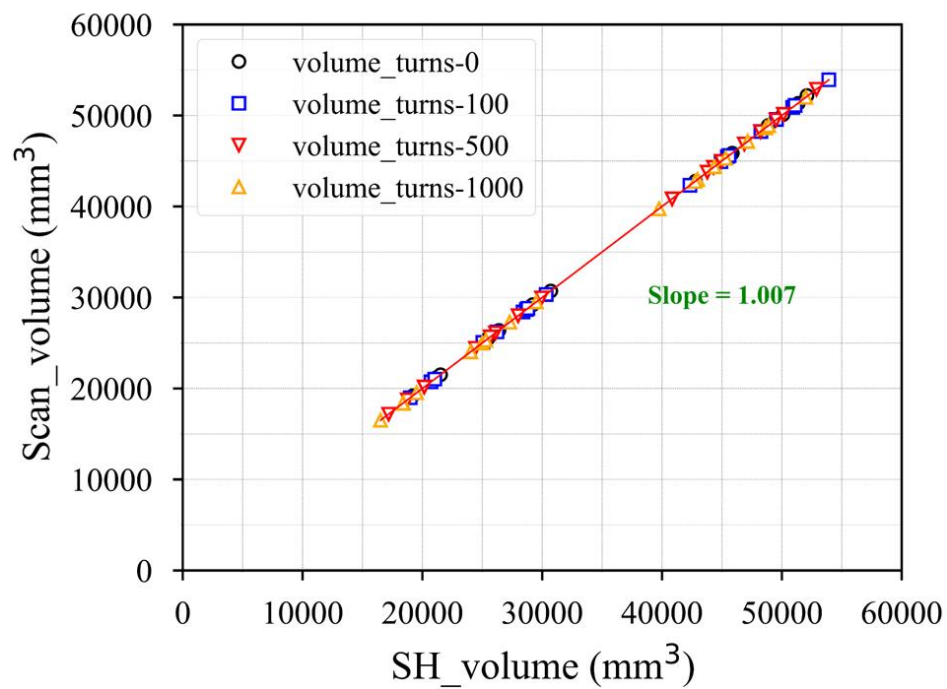


a) ปริมาตรของอนุภาคระหว่างอนุภาคสแกนเทียบกับอนุภาค SHF

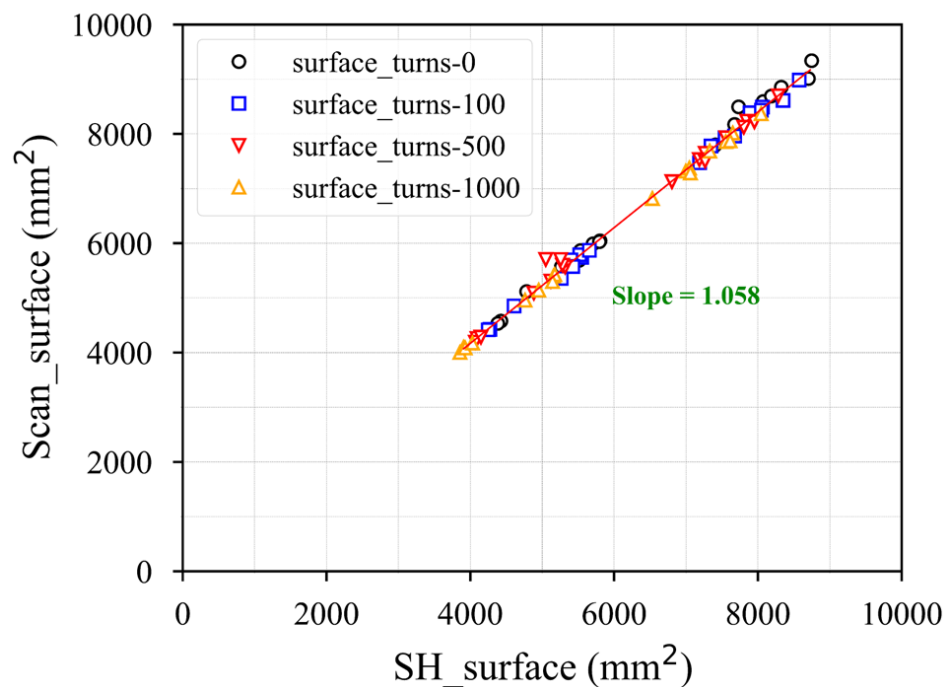


b) พื้นที่ผิวของอนุภาคระหว่างอนุภาคสแกนเทียบกับอนุภาค SHF

ภาพ 53 การเปรียบเทียบปริมาตรและพื้นที่ผิวระหว่างของอนุภาคสแกนและอนุภาคที่สร้างใหม่โดย SHF ของระดับ l ที่เพิ่มขึ้น



a) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของอนุภาคสแกนกับอนุภาคจากการวิเคราะห์ SHF

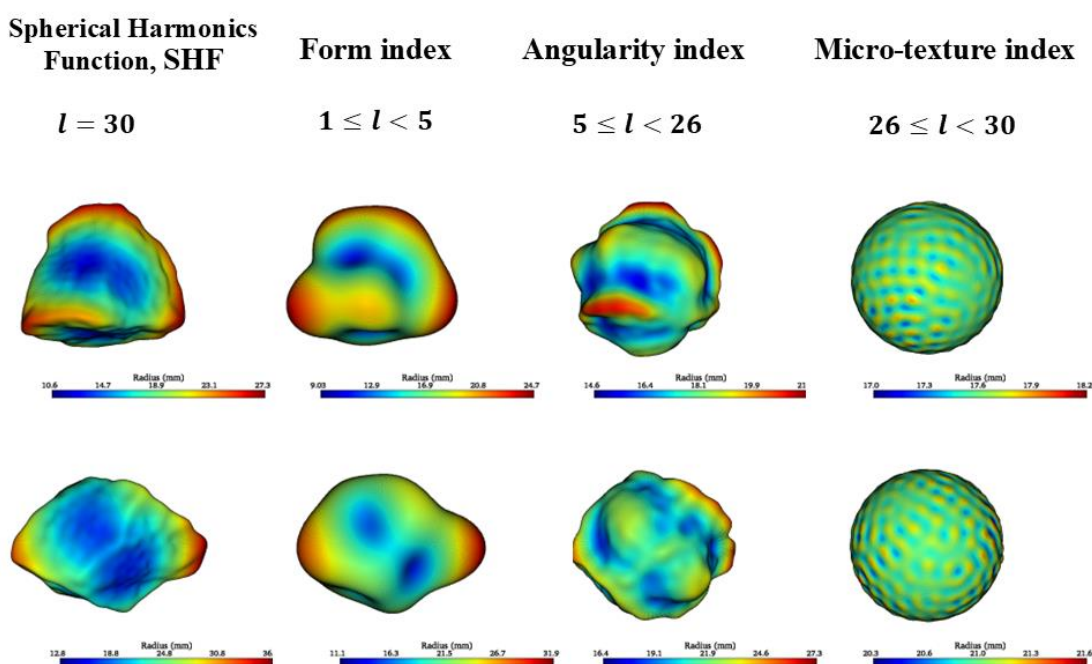


b) ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของอนุภาคสแกนกับอนุภาคจากการวิเคราะห์ SHF

ภาพ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ของปริมาตรและพื้นที่ผิวของอนุภาคสแกนกับอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ SHF

การสร้างพื้นผิวของอนุภาคหินโรยทางชั้นใหม่โดย 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)

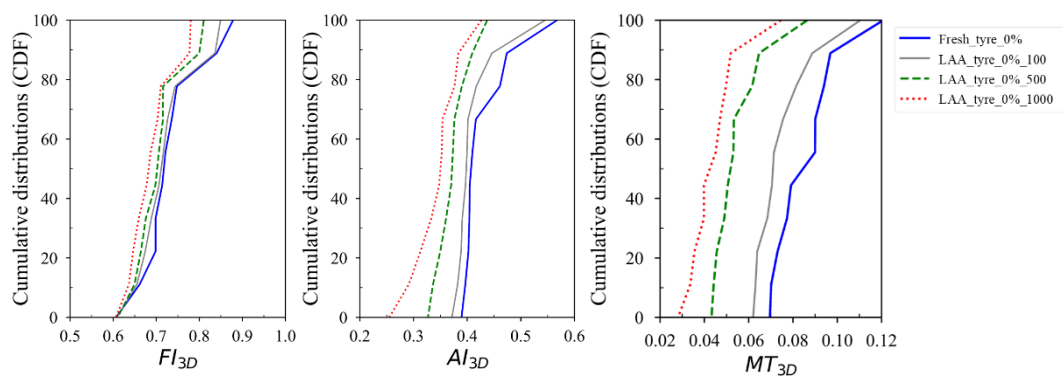
ภาพ 55 แสดงการสร้างใหม่ของ SHF ของอนุภาคหินโรยทางในช่วงขอบเขตของระดับฮาร์มอนิกทรงกลมที่ต่างกันอย่างชัดเจน 2 ตัวอย่าง พบว่า มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันระหว่างการสะสมของ SHF ในช่วงระดับ l ที่แตกต่างกันกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคในระดับมาตราส่วนที่ต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ช่วง l_1 ถึง l_4 เป็นตัวแทนของรูปร่างโดยรวมของอนุภาคในระดับมาตราส่วนทั่วไปหรือระดับมหภาค ช่วง l_5 ถึง l_{25} เป็นตัวแทนของลักษณะมุมและความโค้งมนของอนุภาคในระดับมาตราส่วนที่เล็กลงหรือระดับปานกลาง และช่วง l_{26} ถึง l_{30} เป็นตัวแทนของลักษณะพื้นผิวและความหยาบของอนุภาคในระดับมาตราส่วนที่ละเอียดมากหรือระดับจุลภาค



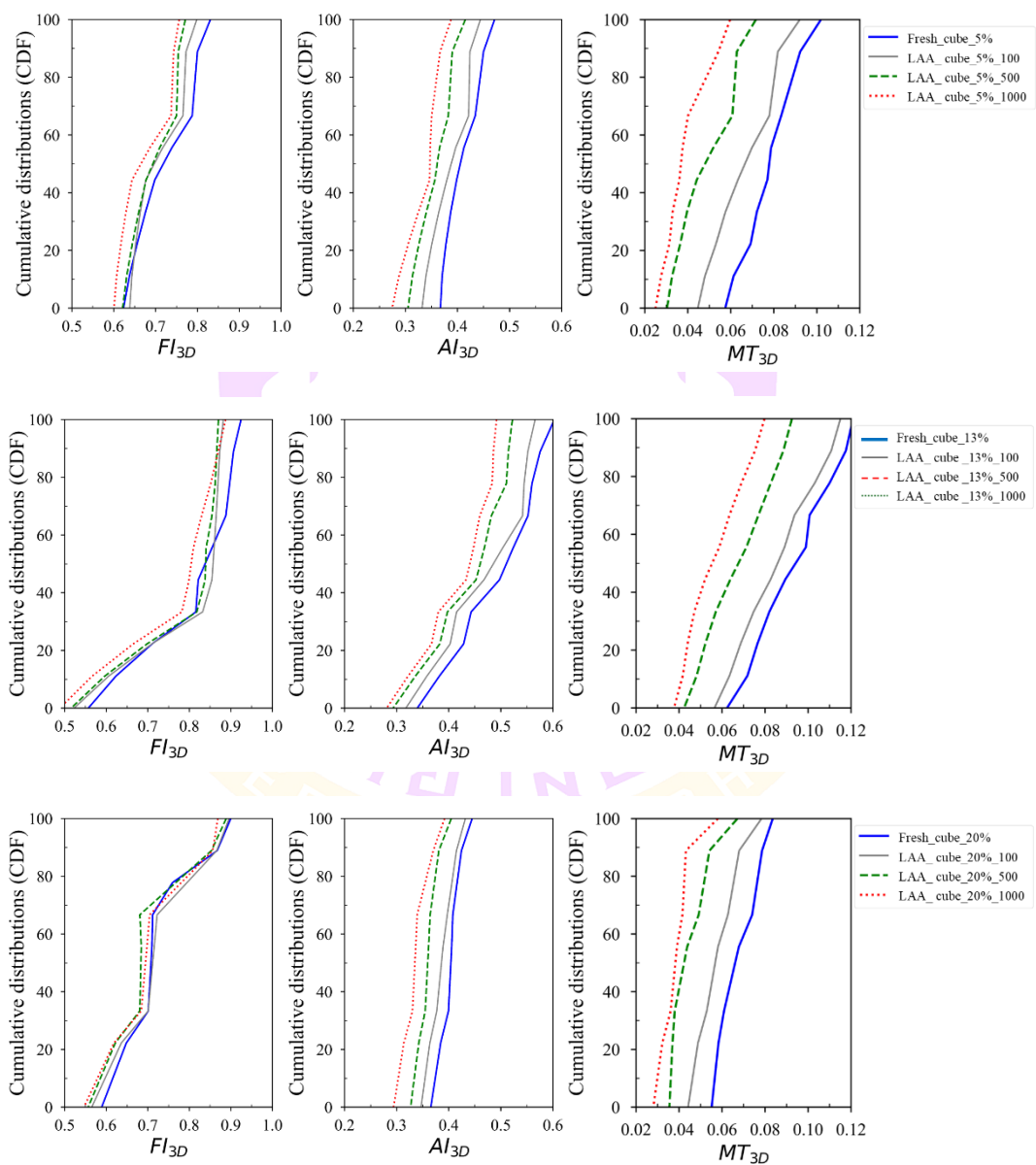
ภาพ 55 การสร้างใหม่ของ SHF ของอนุภาคหินโรยทาง 2 ตัวอย่าง ในช่วงขอบเขตของระดับฮาร์มอนิกทรงกลมที่ต่างกัน

ภาพ 56 แสดงการกระจายสะสม (Cumulative Density Function, CDF) ของดัชนีรูปร่าง (FI) ดัชนีความเป็นเหลี่ยมมุม (AI) และดัชนีพื้นผิว (MT) กรณีไม่ผสมเศษยาง ที่คำนวณได้จาก 3 ขั้นตอนของการทดสอบ LAA ได้แก่ 0, 100, 500 และ 1,000 รอบ ของสัดส่วนและขนาดของยางที่แตกต่างกัน สังเกตได้ว่าค่า FI3D จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยสำหรับแต่ละอนุภาคตลอดกระบวนการทดสอบ LAA เนื่องจากรูปร่างโดยรวมของอนุภาคยังคงอยู่ แม้ว่าจะมีการเสียดสีและการสึกกร่อนเกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ แต่โครงสร้างหลักของอนุภาคยังไม่เปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ อนุภาคยังคงมีสัดส่วนทางเรขาคณิตและลักษณะเชิงมิติที่ใกล้เคียงกับสภาพก่อนการทดสอบ อย่างไรก็ตามค่า AI3D และ MT3D มีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนรอบของการทดสอบเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคถูกกระแทกและเสียดสีซ้ำ ๆ ทำให้ขอบคมและพื้นผิวขรุขระค่อย ๆ ถูกขัดให้เรียบขึ้น ส่งผลให้รายละเอียดของพื้นผิวและความซับซ้อนของโครงสร้างจุลภาคลดลง เมื่อพื้นผิวของอนุภาคเริ่มสูญเสียความขรุขระและร่องลึกที่เคยมีมาก่อนหน้านี้ ความละเอียดของโครงสร้างก็ลดลงตามไปด้วย แม้ว่าโครงสร้างโดยรวมของอนุภาคจะยังคงอยู่ แต่การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับมุมและขอบจากแรงเสียดสีทำให้ค่าดัชนีเหล่านี้ลดลง เนื่องจากค่าดัชนี AI3D และ MT3D เป็นการคำนวณจากการวิเคราะห์ความเป็นเหลี่ยมมุมในระดับกลางและพื้นผิวในระดับจุลภาคทำให้ค่าที่ได้มีแนวโน้มลดลงตลอดช่วงของการทดสอบ

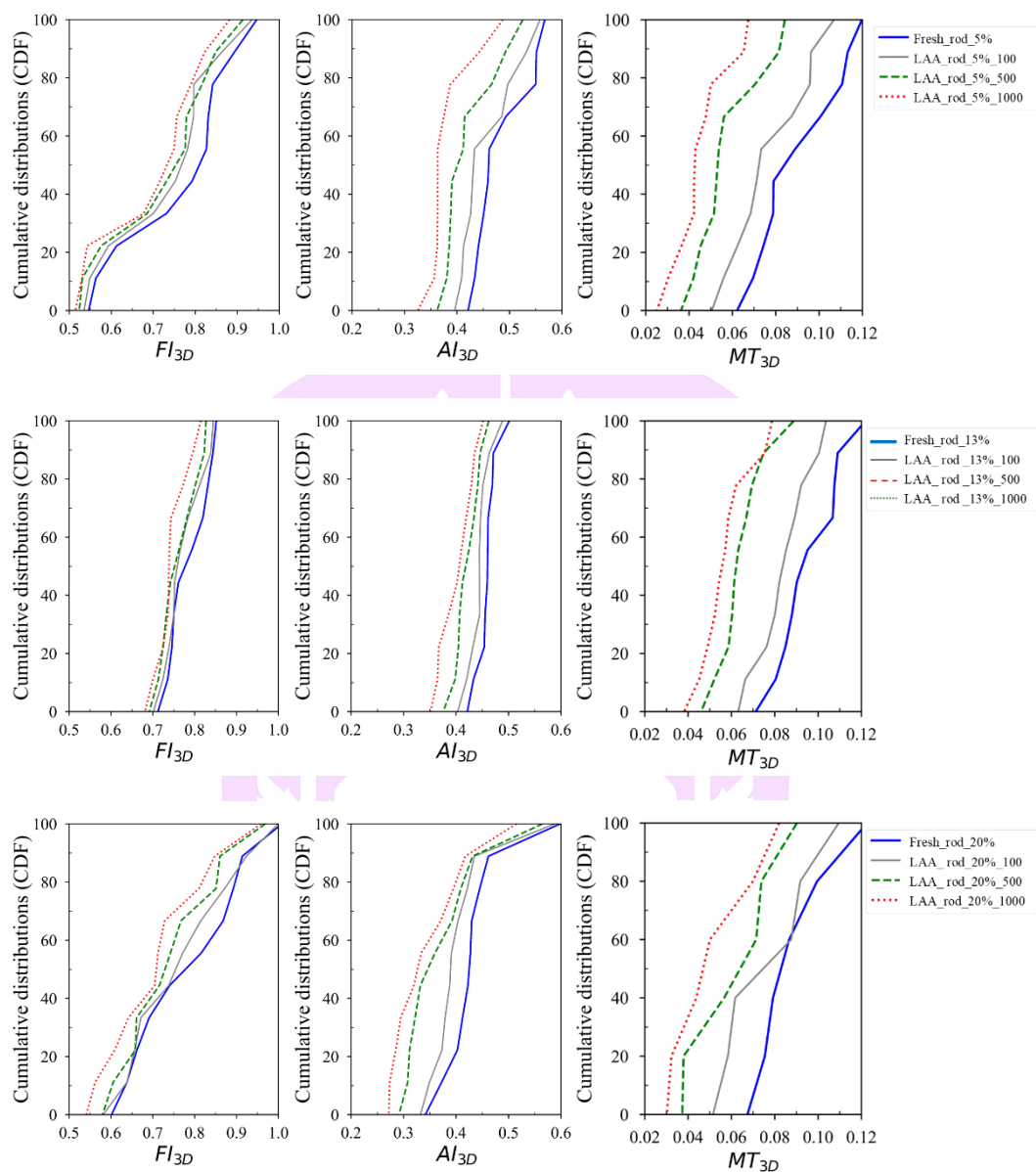
เมื่อพิจารณารูปร่างของยางทั้ง 3 รูปทรง พบว่า FI3D ที่ระดับรูปร่างของทรงแต่ละรูปทรง ไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน และเมื่อพิจารณาที่ระดับความเป็นมุม (AI3D) จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างจากก่อนและหลังการทดสอบที่ชัดเจนขึ้น แต่อย่างไรก็ตามยังไม่เห็นความแตกต่างจะผลกระทบของรูปร่างยางแต่ละรูปแบบ แต่เมื่อพิจารณาถึงระดับพื้นผิว (MT3D) ของอนุภาค จะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างก่อนและหลังการทดสอบ 1,000 รอบ ของยางทรงลูกบาศก์ (ภาพ 57) แคบกว่ายางทรงแท่ง และทรงแผ่น ในทุกอัตราส่วนผสม รองลงมาคือ ยางทรงแท่ง (ภาพ 58) และท้ายสุดคือ ยางทรงแผ่น (ภาพ 59)



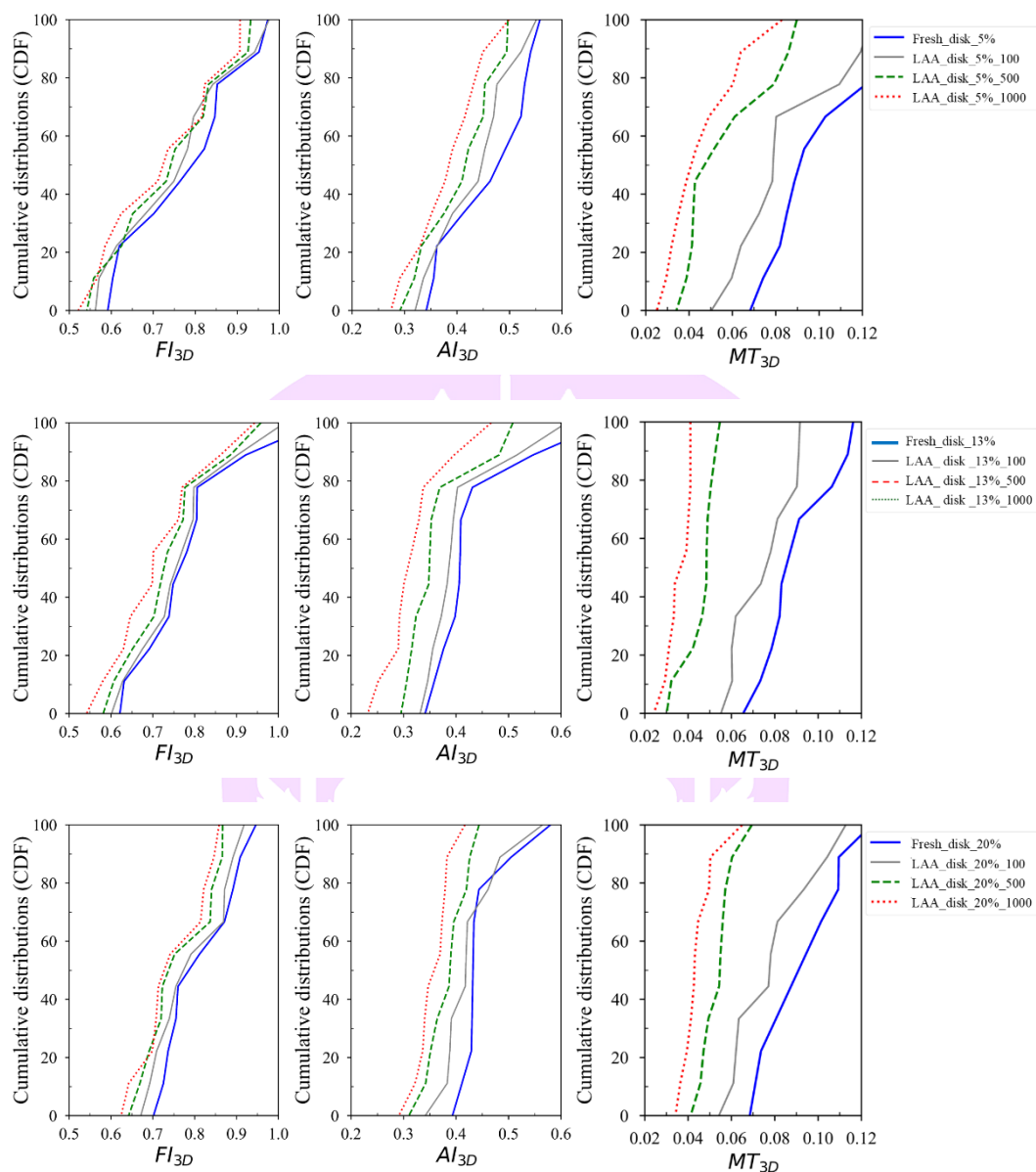
ภาพ 56 การกระจายสะสม (CDF) ของดัชนี FI_{3D} , AI_{3D} และ MT_{3D} กรณีไม่ผสมยาง



ภาพ 57 การกระจายสะสม (CDF) ของดัชนี FI_{3D} , AI_{3D} และ MT_{3D} ส่วนผสมยางทรงลูกบาศก์



ภาพ 58 การกระจายสะสม (CDF) ของดัชนี FI_{3D} , AI_{3D} และ MT_{3D} ส่วนผสมยางทรงแท่ง

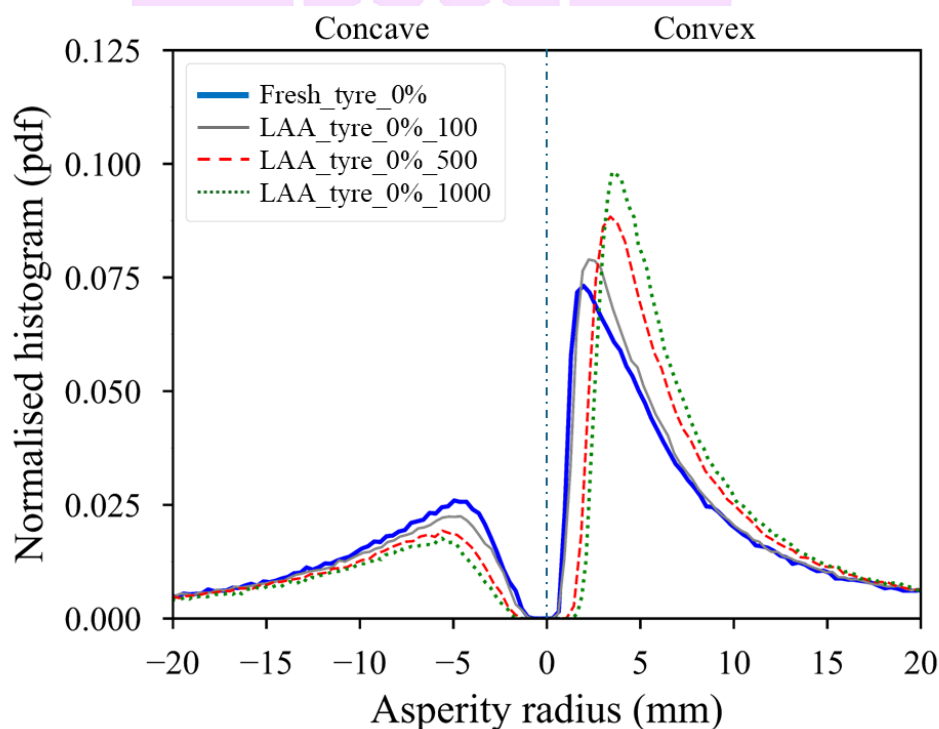


ภาพ 59 การกระจายสะสม (CDF) ของดัชนี FI_{3D} , AI_{3D} และ MT_{3D} ส่วนผสมยางทรงแผ่น

การวิเคราะห์การพัฒนาการของความโค้งและรัศมีความขรุขระในอนุภาคของหินโรยทาง

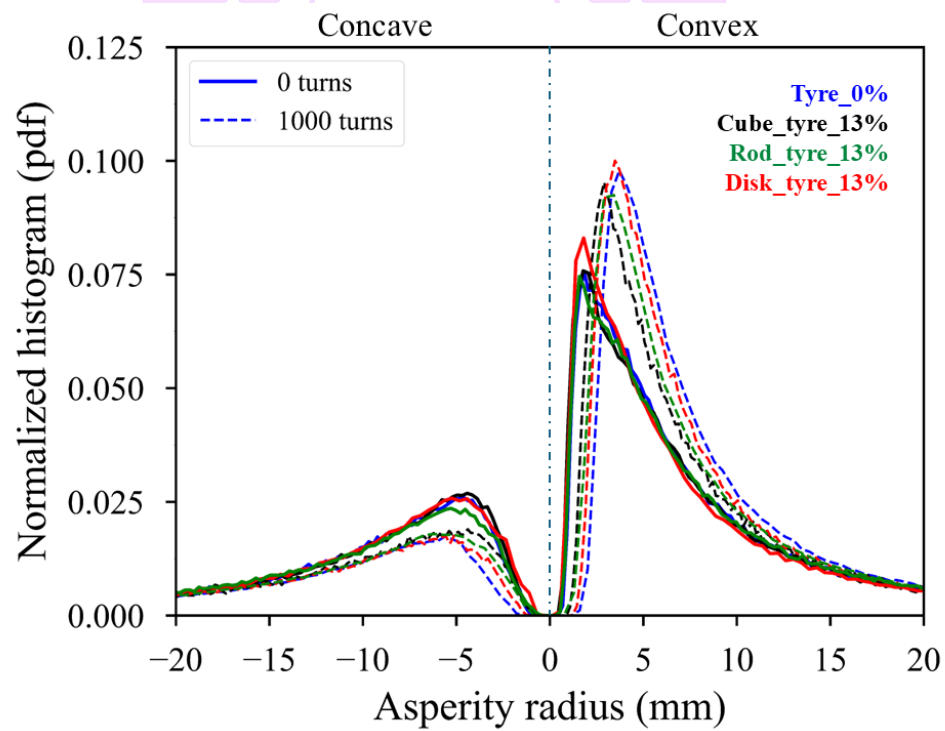
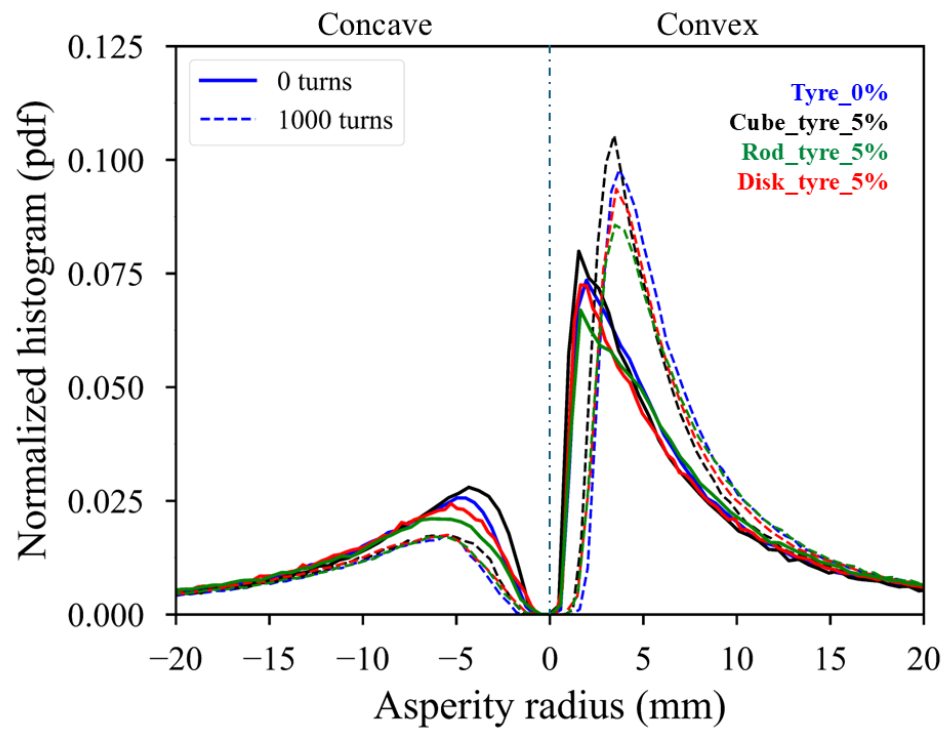
วิธีหนึ่งในการสังเกตการพัฒนาการของรัศมีความขรุขระตลอดการทดสอบคือการเปรียบเทียบแจกแจงความถี่ (histogram) ของรัศมีความขรุขระก่อนและหลังการสึกหรอ โดยค่าลบแสดงถึงความขรุขระเว้า (concave) และค่าบวกแสดงถึงความขรุขระนูน (convex) ภาพ 60 แสดงการเปลี่ยนแปลงของการแจกแจงความถี่ที่ปรับมาตรฐาน (normalized histogram, pdf) ของรัศมีความขรุขระ ก่อนการทดสอบ (0 รอบ) และหลังการทดสอบ LAA ที่รอบการหมุน 100, 500 และ 1,000 รอบ ซึ่งสะท้อนถึงพัฒนาการของพื้นผิวหินโรยทางภายใต้กระบวนการสึกหรอ จากกราฟ

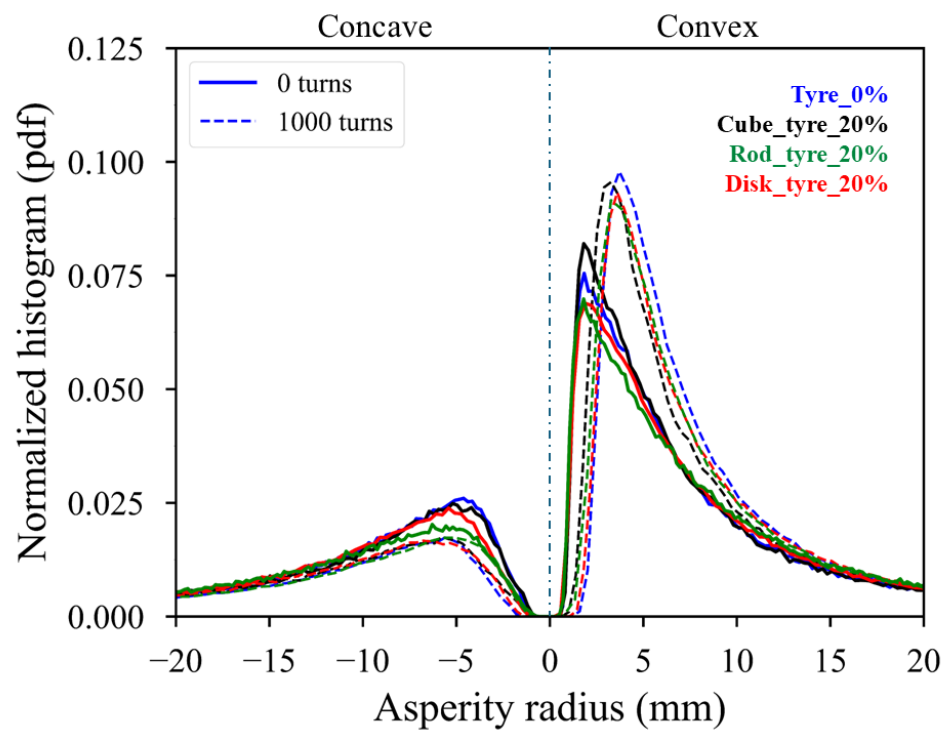
พบว่า ความถี่ของรัศมีมีความขรุขระเว้า (concave asperity radii) มีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นผิวที่มีลักษณะเว้าจำเป็นต้องล้อมรอบด้วยลักษณะของความนูน เมื่อพื้นผิวโดยรอบเกิดการสึกหรอ ความเว้าก็จะลดลงโดยอัตโนมัติ ส่งผลให้โครงสร้างของหินเปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่จำนวนรัศมีและค่ารัศมีมีความขรุขระนูนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดการทดสอบ เนื่องจากส่วนที่นูนของหินเป็นบริเวณที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมมากที่สุด ทำให้เกิดการกระแทกและขัดสีอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม บริเวณที่นูนเหล่านี้มักเป็นจุดอ่อนของหินรอยทาง เนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดเล็กและรับแรงกระทำโดยตรง เมื่อจำนวนรอบของการหมุนเพิ่มขึ้น ทำให้บริเวณโดยรอบได้รับการสัมผัสมากขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากการสึกหรอขยายกว้างมากขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงกระบวนการปรับโครงสร้างของพื้นผิวหินจากลักษณะขรุขระไปสู่รูปทรงที่มีพื้นผิวเรียบขึ้นตามลำดับ



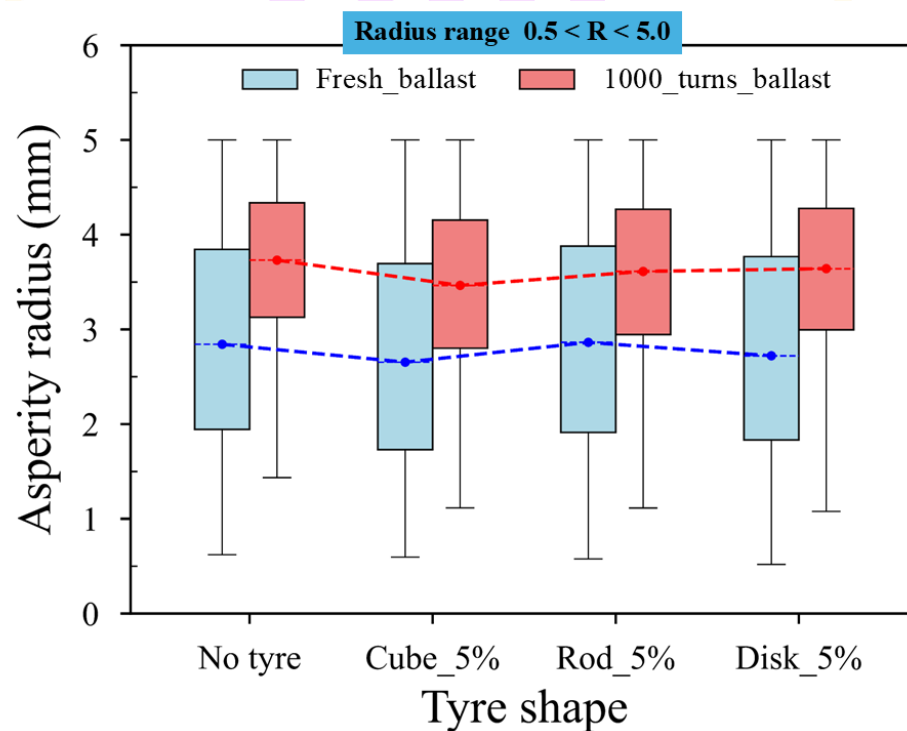
ภาพ 60 Normalized histogram (Probability Density Function: PDF) ของรัศมี
ความขรุขระตัวอย่างหินรอยทางที่ไม่ผสมเศษยางสำหรับการทดสอบ LAA ที่ 0 100
500 และ 1,000 รอบการหมุน

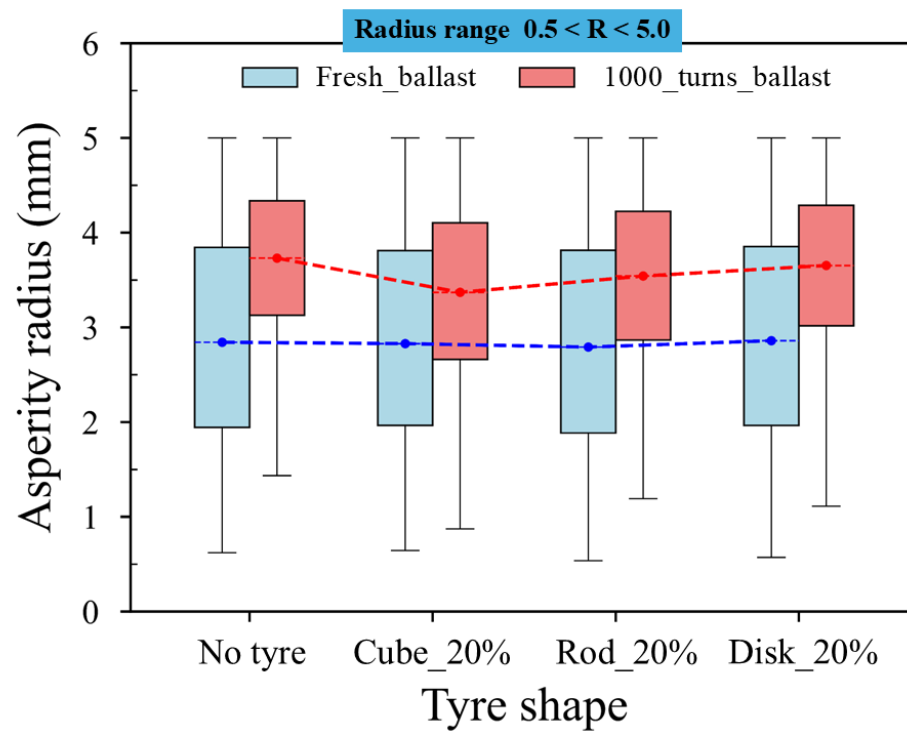
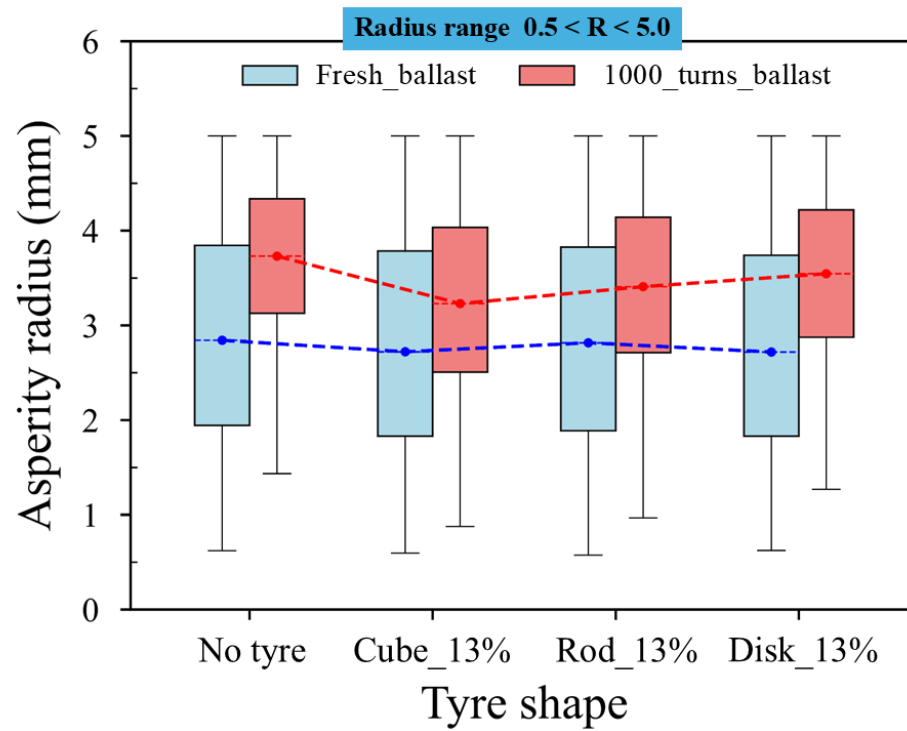
ภาพ 61 แสดงการเปลี่ยนแปลงของการแจกแจงความถี่ที่ปรับมาตรฐาน (Normalized histogram, pdf) ของรัศมีความขรุขระเทียบระหว่างยางทั้ง 3 รูปแบบ ที่ก่อนการทดสอบ และหลังการทดสอบ 1,000 รอบ จะเห็นได้ว่า ความขรุขระของยางที่รอบการหมุน LAA 1,000 รอบ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับค่าก่อนการทดสอบ LAA ทุกส่วนผสมของยาง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลรูปร่างของเศษยางทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าการทดสอบที่ผสมเศษยาง 5 เปอร์เซ็นต์ รัศมีความขรุขระของการทดสอบ 1,000 รอบ ใกล้เคียงกับการทดสอบที่ไม่ผสมเศษยาง ในขณะที่ส่วนผสมยาง 13 และ 20 เปอร์เซ็นต์จะเห็นความแตกต่างที่ชัดเจนมากขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากอนุภาคของวัสดุชนิดเดียวกันจะมีการกระจายของข้อมูลที่คล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณารัศมีความขรุขระที่ผสมเศษยางทั้ง 3 รูปแบบ จะเห็นได้ว่าตัวอย่างยางทรงลูกบาศก์มีแนวโน้มของค่ารัศมีความขรุขระที่น้อยกว่าตัวอย่างยางทรงอื่นในทุกส่วนผสม เพื่อให้สามารถอธิบายถึงอิทธิพลของเศษยางทั้ง 3 รูปแบบ ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ภาพ 62 แสดงการกระจายของข้อมูลเชิงสถิติของรัศมีความขรุขระที่ 0.5 ถึง 5.0 มม. ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวรัศมีมากที่สุด เส้นประแทนค่ามัธยฐานของแต่ละส่วนผสม กล่อง (box) กำหนดขอบเขตระหว่างเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25 และ 75 ขณะที่ค่ามากที่สุด-ต่ำสุด สอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 10 และ 90 ของช่วงรัศมีความขรุขระที่กำหนด จากกราฟพบว่าค่ามัธยฐานของยางทรงลูกบาศก์มีค่าต่ำที่สุด รองลงมาคือ ทรงแท่ง และสูงสุดคือ ยางทรงแผ่น





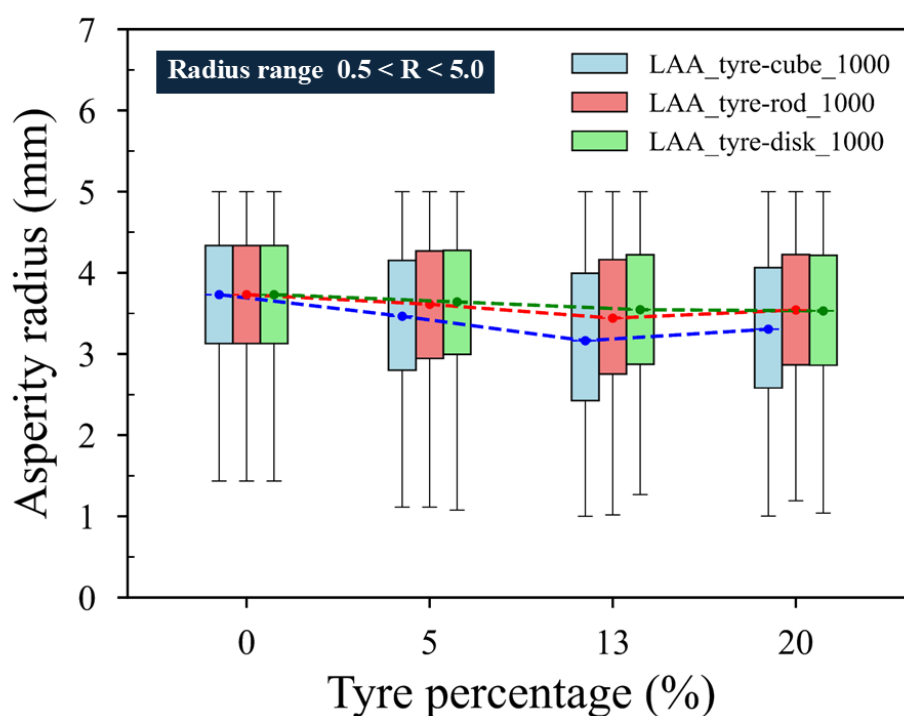
ภาพ 61 การเปลี่ยนแปลงของการแจกแจงความถี่ที่ปรับมาตรฐานของรัศมีความขรุขระ
เทียบระหว่างยางทั้ง 3 รูปแบบ ที่ 0 และ 1,000 รอบ





ภาพ 62 แสดงการกระจายของรัศมีความขรุขระในช่วง 0.5 ถึง 5.0 มม. ก่อนและหลังการทดสอบ 1,000 รอบ ที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ

ภาพ 63 แสดงการกระจายของรัศมีความขรุขระในช่วง 0.5 ถึง 5.0 มม. หลังจากการทดสอบ LAA ที่ 1,000 รอบ โดยพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนผสมของเศษยางทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าในส่วนผสมที่ใช้ยางทรงลูกบาศก์ หินมีค่ารัศมีความขรุขระน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น นอกจากนี้ เมื่อใช้เศษยางในอัตราส่วน 13% พบว่า การเปลี่ยนแปลงของรัศมีความขรุขระน้อยที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมยางในสัดส่วนดังกล่าวสามารถช่วยลดการสึกหรอของหินได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพ 63 การกระจายของรัศมีความขรุขระในช่วง 0.5 ถึง 5.0 มม. หลังจากการทดสอบ LAA ที่ 1,000 รอบ ที่สัดส่วนผสมของยางทั้ง 3 รูปแบบ

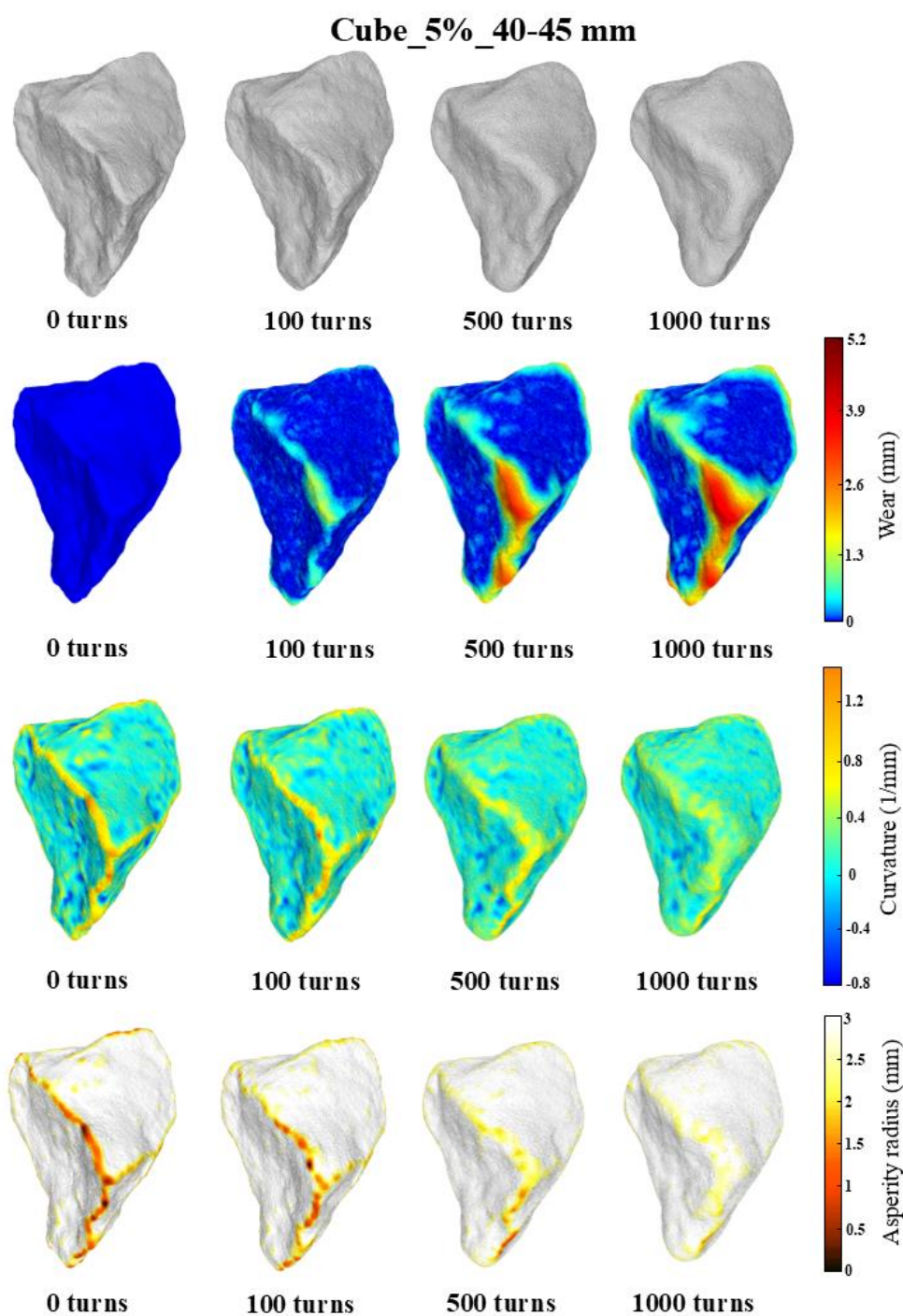
จากภาพ 64 แสดงผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของหินโรยทางที่ใช้ในการทดสอบ LAA โดยเปรียบเทียบหินในสภาพเริ่มต้นและหลังจากผ่านการทดสอบที่จำนวนรอบการหมุนแตกต่างกัน ได้แก่ 100, 500 และ 1,000 รอบ ซึ่งแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างและลักษณะพื้นผิวของหิน โดยใช้ตัวชี้วัดหลักสามประเภท ได้แก่ ค่าการสึกหรอ (wear), รัศมีความโค้ง (curvature) และรัศมีความขรุขระ (asperity radius) ในแถวแรกเป็นภาพ 3 มิติของหินที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง เมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าหินมีลักษณะคมและขรุขระในช่วงเริ่มต้น และเมื่อผ่าน

การทดสอบ หินจะค่อย ๆ สูญเสียขอบแหลมและมีพื้นผิวที่เรียบขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงการสึกหรอของมุมและขอบของหิน อันเนื่องมาจากแรงกระแทกและแรงเสียดทานระหว่างการหมุนของเครื่อง LAA

แถวที่สองแสดงค่าการสึกหรอโดยใช้แผนที่สี เพื่อแสดงระดับของการสึกหรอบนพื้นผิวของหินเป็นระยะทาง โดยพื้นที่สีน้ำเงินหมายถึงบริเวณที่มีการสึกหรอน้อยหรือไม่มีเลย ขณะที่พื้นที่สีแดงหมายถึง บริเวณที่มีการสึกหรอมากที่สุด เมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มขึ้น การสึกหรอของหินจะเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณขอบและมุมของหิน ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าหลังจาก 100 รอบแรก มีเพียงบางส่วนของพื้นผิวที่ได้รับผลกระทบ แต่เมื่อถึง 500 และ 1,000 รอบ การสึกหรอเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในจุดที่มีแรงกระแทกสูง

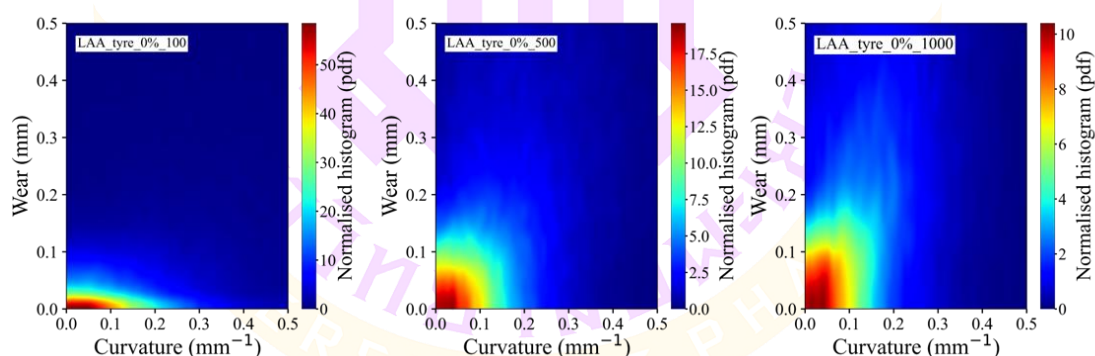
แถวที่สามเป็นการแสดงแผนที่สีของค่ารัศมีความโค้ง (curvature) บนพื้นผิวหิน โดยบริเวณที่มีสีเหลืองและส้มหมายถึงพื้นที่ที่เป็นความโค้งนูน ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นขอบและมุมของหิน ในขณะที่บริเวณที่มีสีฟ้าหรือเขียวเป็นพื้นที่ที่เป็นความโค้งเว้า เมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มขึ้น บริเวณที่มีความโค้งนูนจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขอบและมุมของหินถูกขัดให้มนขึ้น ทำให้ค่าความโค้งลดลงไปตามกระบวนการสึกหรอ

แถวสุดท้ายแสดงรัศมีความขรุขระนูน (asperity radius) ของพื้นผิว โดยใช้แผนที่สีที่แสดงค่าความขรุขระนูนของหินในหน่วยมิลลิเมตร โดยบริเวณที่มีสีแดงและส้ม หมายถึง จุดที่มีรัศมีความขรุขระนูนน้อย ความขรุขระนูนเหล่านี้ส่วนใหญ่อยู่ตามขอบและมุมเป็นพื้นที่ที่มีขอบและคมแคบ เมื่อรอบการหมุนเพิ่มขึ้น จะเห็นว่าบริเวณที่มีขอบและมุมจะถูกสึกอย่างรวดเร็วจนทำให้ค่ารัศมีความขรุขระนูนขยายใหญ่ขึ้น ซึ่งหมายความว่า หินโรยทางมีลักษณะพื้นผิวเรียบขึ้นจากแรงกระแทกและการเสียดสีในระหว่างการทดสอบ นอกจากนี้ จุดที่มีความขรุขระนูนในช่วงต้นจะค่อย ๆ ลดลง โดยมีแถบของจุดนูนที่มีรัศมีระหว่าง 1.5 ถึง 2.5 มม. ปรากฏมากขึ้นเรื่อย ๆ บนขอบ ซึ่งบ่งบอกถึงการเสื่อมสภาพของความแหลมคมของหิน

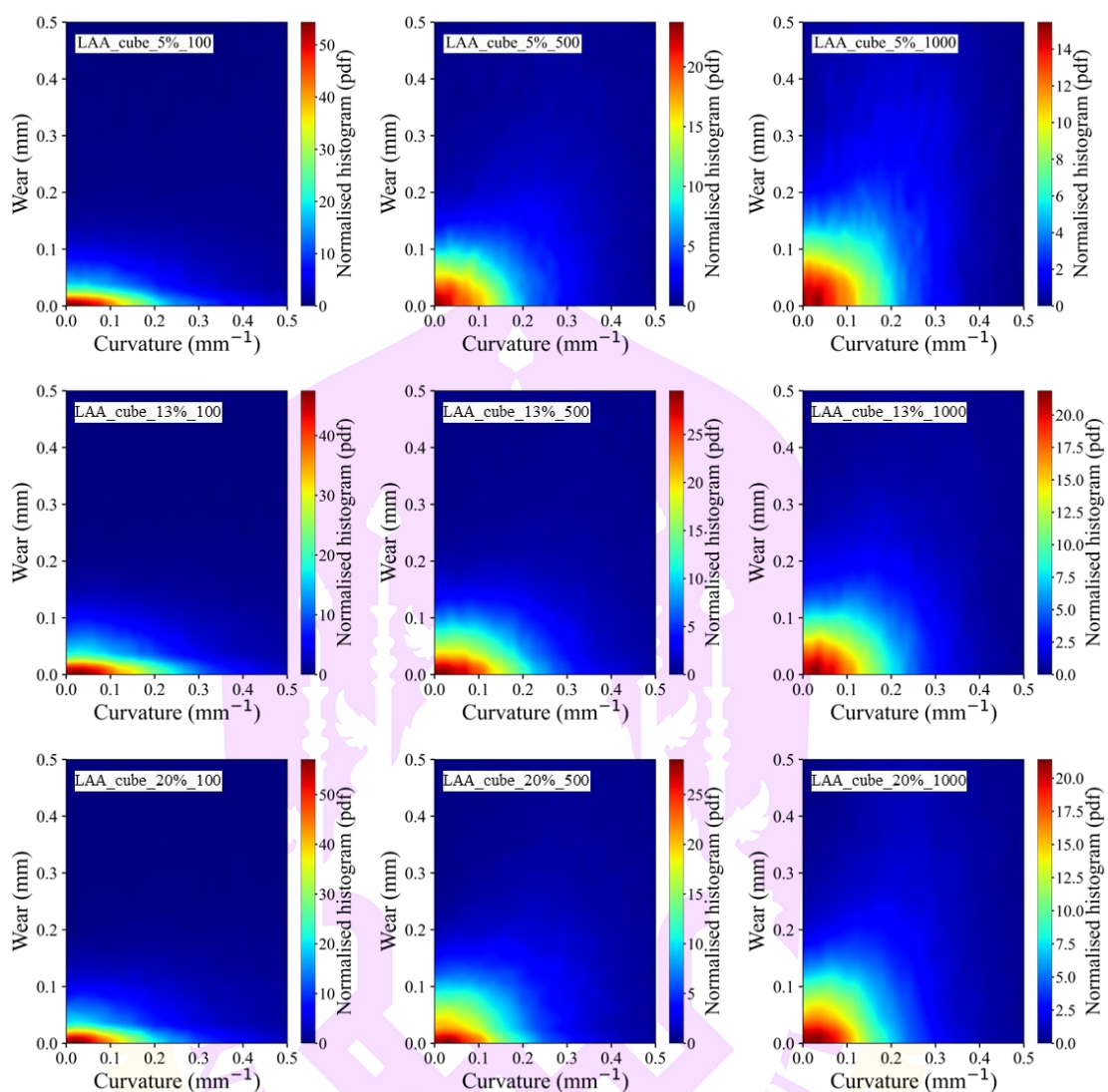


ภาพ 64 ภาพ 3 มิติ วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของหินโรยทางที่ใช้ในการทดสอบ Los Angeles Abrasion (LAA) ค่าการสึกหรอ (wear), รัศมีความโค้ง (curvature) และรัศมี
ความขรุขระ (asperity Radius)

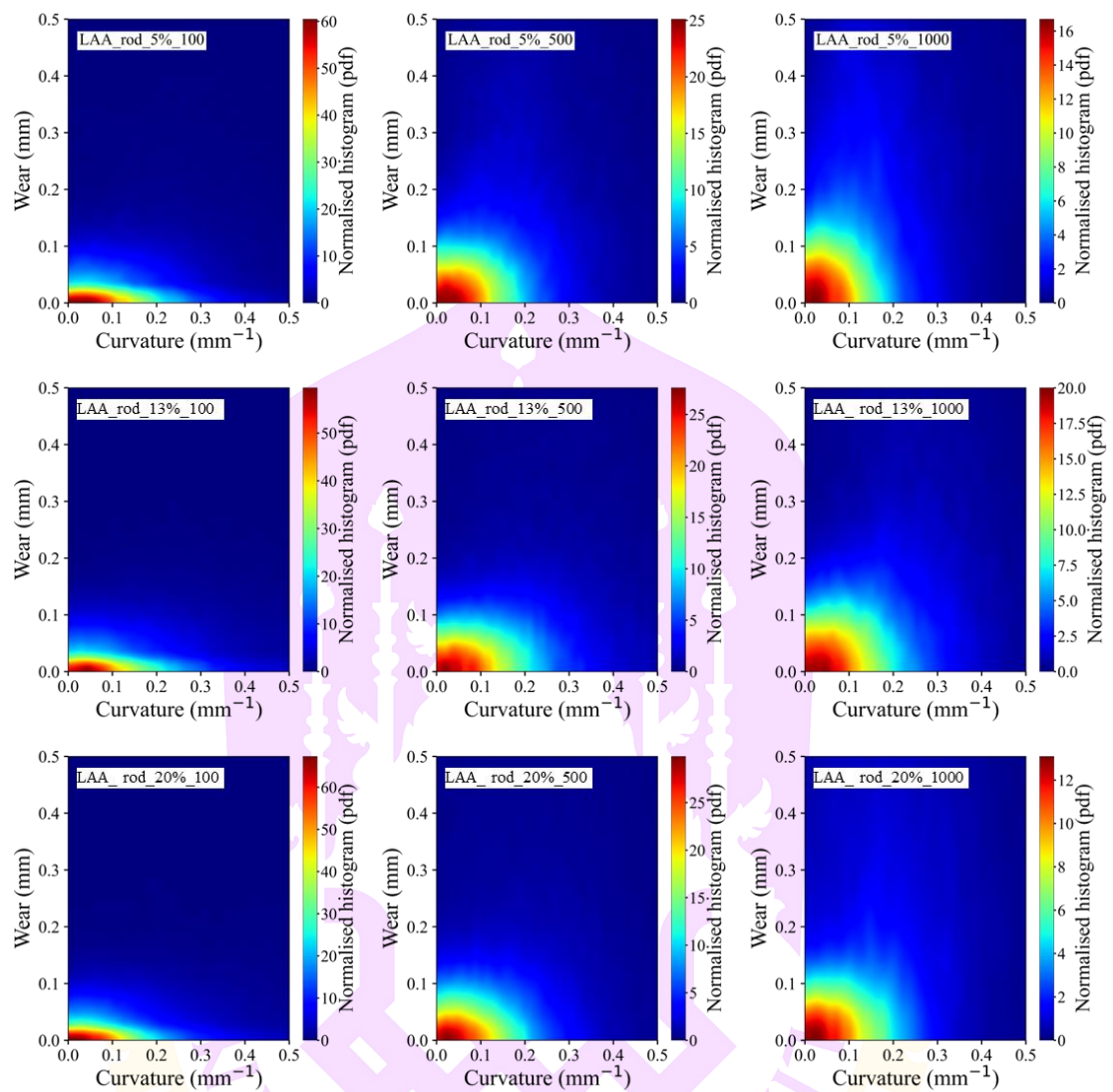
จากการศึกษาพื้นฐานวิทยาของหินโรยทางโดยภาพถ่าย 3 มิติ สามารถพิจารณาการวิเคราะห์ผลลัพธ์ โดยใช้การแจกแจงความถี่ที่ปรับมาตรฐาน (normalised histograms) 2 มิติ แสดงเจตสีความหนาแน่นของข้อมูล (Probability Density Function: PDF) ภาพ 65 แสดงการแจกแจงความถี่ 2 มิติ ระหว่างความโค้งของพื้นผิวเทียบกับการสึกหรอหลังจากผ่านการทดสอบ LAA ที่รอบการหมุน 100 500 และ 1,000 รอบ ในสัดส่วนผสมของเศษยางต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของอนุภาคที่ผสมเศษยางรูปทรงต่าง ๆ ส่วนใหญ่จะเกิดการสึกหรอน้อยกว่า 0.05 มม. ใน 100 รอบแรก ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งที่แสดงถึงความโค้งของพื้นผิวประมาณ 0 ถึง 0.2 มม. หลังจาก 500 รอบ พื้นผิวของอนุภาคส่วนใหญ่จะสึกหรอมากขึ้นถึง 0.1 มม. แต่พอสิ้นสุดการทดสอบที่ 1,000 รอบ อนุภาคส่วนใหญ่จะสึกหรอเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยประมาณ 0.11 ถึง 0.13 มม. ซึ่งช่วงของความโค้งพื้นผิวส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงประมาณเดียวกัน เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของรูปร่างเศษยางต่อหินโรยทาง พบว่ายังไม่เห็นถึงความแตกต่างของการสึกหรอที่ชัดเจนอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์บ่งชี้ว่าการกระจายการสึกหรอของอนุภาคที่ไม่ผสมเศษยางมีค่ามากกว่าอนุภาคที่ผสมเศษยางในทุกส่วนผสม ซึ่งแสดงโดยบริเวณสีน้ำเงินอ่อนที่ขยายขึ้นไป และชัดเจนยิ่งขึ้นที่รอบการหมุน 1,000 รอบ ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าเศษยางรถยนต์สามารถช่วยลดการสึกหรอ การแตกหัก และการสูญเสียขอบมุมบนพื้นผิวของอนุภาคหินโรยทางได้ แต่ยังไม่สามารถอธิบายถึงความแตกต่างระหว่างผลกระทบของรูปร่างเศษยางรถยนต์ได้อย่างมีนัยสำคัญ



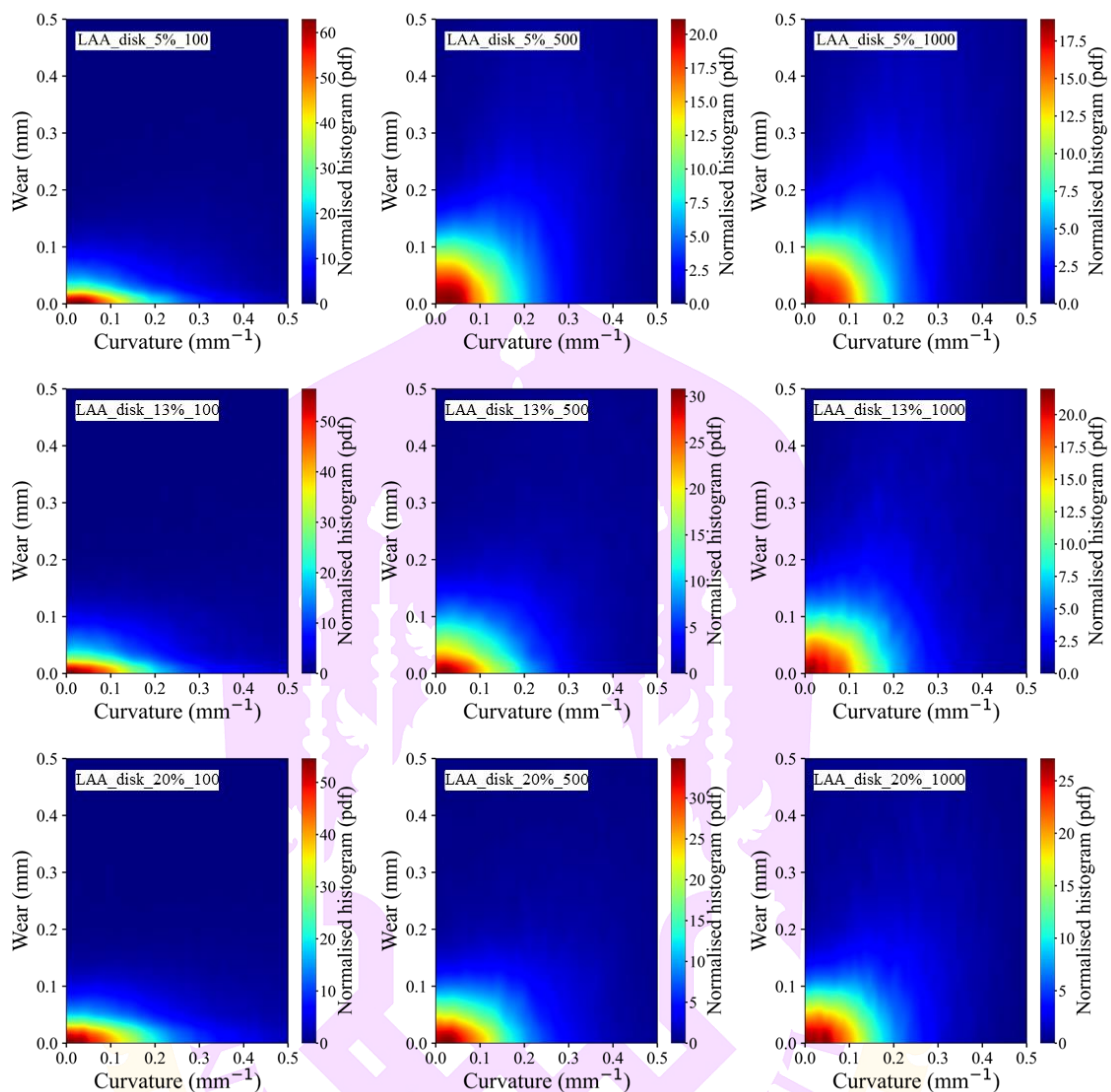
a) การแจกแจงความถี่ 2 มิติระหว่างความโค้งของพื้นผิวเทียบกับการสึกหรอที่ไม่ผสมเศษยาง



b) การแจกแจงความถี่ 2 มิติระหว่างความโค้งของพื้นผิวเทียบกับการสึกหรอที่ผสมเศษยางทรงลูกบาศก์



c) การแจกแจงความถี่ 2 มิติระหว่างความโค้งของพื้นผิวเทียบกับการสึกหรอที่ผสมเศษยางทรงแท่ง

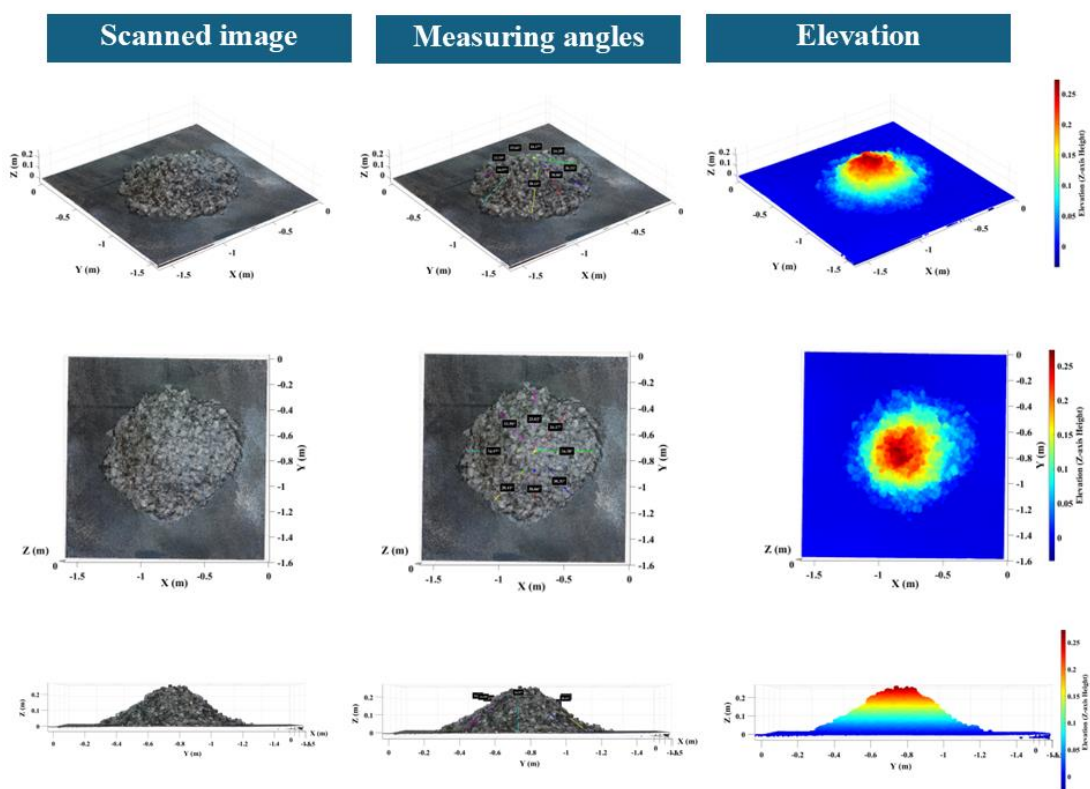


d) การแจกแจงความถี่ 2 มิติระหว่างความโค้งของพื้นผิวเทียบกับการสึกหรอที่ผสมเศษยางทรงแผ่น

ภาพ 65 การแจกแจงความถี่ (Normalised Histograms : PDF) 2 มิติ ระหว่างความโค้งของพื้นผิวเทียบกับการสึกหรอ

การวิเคราะห์มุมการกองของหินโรยทาง

การทดสอบมุมการกองสามารถพิจารณาสมบัติทางกลของหินโรยทาง การทดสอบมุมการกอง จึงถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาพารามิเตอร์การสัมผัสของหินโรยทาง ภาพ 66 แสดงการวิเคราะห์มุมลาดเอียงของหินโรยทางผ่านกระบวนการสแกน โดยภาพแรกเป็นภาพสแกน 3 มิติ ที่แสดงรูปร่างและโครงสร้างของกองหิน ภาพที่สองเป็นการวัดมุมลาดเอียง โดยวัดจากมุมบนสุดของกองหินจนถึงขอบมุมล่างสุด ซึ่งทำการวัดมุมทั้งหมด 8 ด้านด้วยกัน แล้วหาค่าเฉลี่ยให้เป็นตัวแทนของการทดลองแต่ละครั้ง ๆ ซึ่งช่วยตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลของหินโรยทางและเสถียรภาพของกองหิน สุดท้ายเป็นการวิเคราะห์ระดับความสูงโดยใช้เฉดสี แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของระดับความสูงของพื้นผิวกองหิน โดยสีแดงแสดงจุดที่สูงที่สุดและสีน้ำเงินแสดงจุดที่ต่ำที่สุด

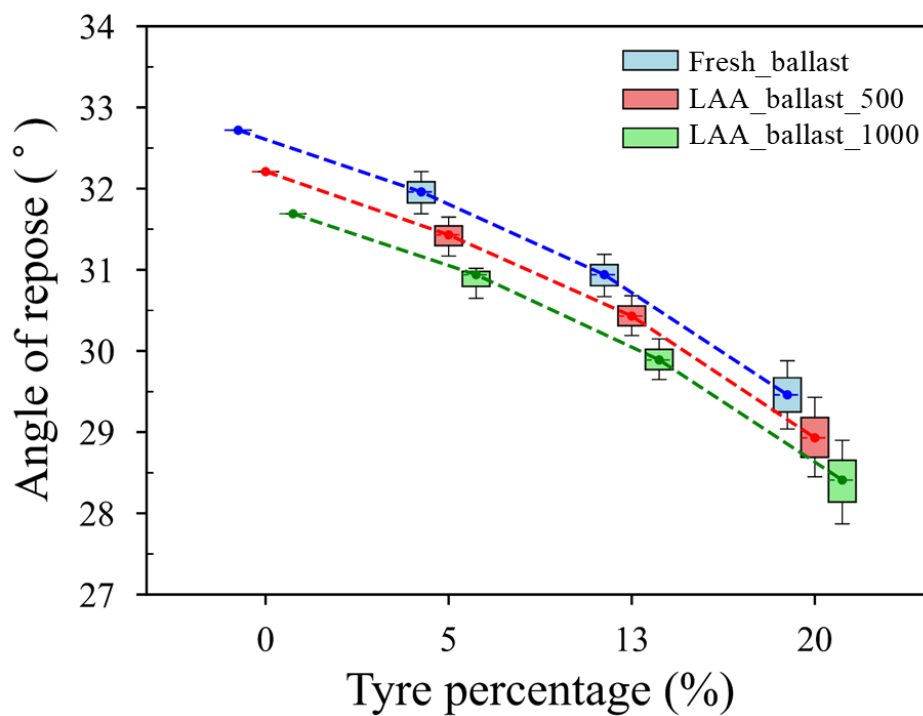


ภาพ 66 มุมลาดเอียงของหินโรยทางที่ได้จากการประมวลผลด้วยภาพ 3 มิติ

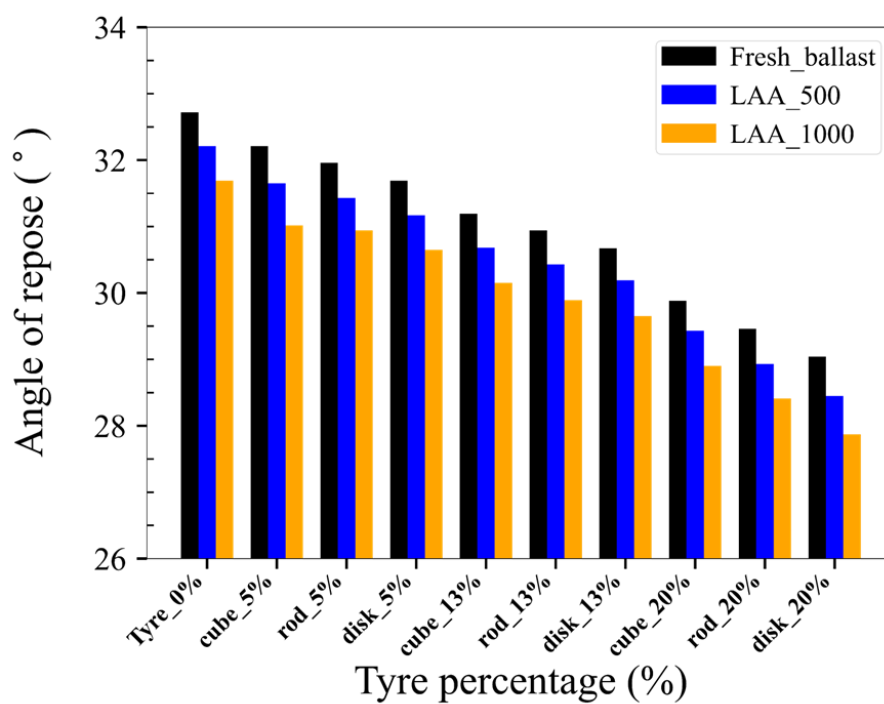
จากผลการทดสอบ ดังแสดงในภาพ 67 พบว่า มุมการกองของวัสดุมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมของยางเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ตัวอย่างหินโรยทางที่ไม่ผสมเศษยางมีมุมลาดเอียงที่สูงกว่าในทุกการทดสอบ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของยาง จะเห็นได้ว่ามุมของกองหินโรยทางจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการลดลงของแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคทำให้วัสดุไหลตัวได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของมุมการกองที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยาง จะพบว่าอัตราส่วนผสมของยางที่มากกว่า 13% มุมลาดเอียงของหินโรยทางจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด

เมื่อทดสอบมุมลาดเอียงของตัวอย่างหินโรยทางที่ผ่านการทดสอบด้วยเครื่อง LAA ที่ 500 และ 1,000 รอบ พบว่ามุมลาดเอียงจะลดลงเมื่อรอบการหมุนเพิ่มขึ้นและจะลดลงเรื่อย ๆ ตามอัตราส่วนผสมของเปอร์เซ็นต์เศษยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มจาก 500 เป็น 1,000 ซึ่งอาจเป็นผลจากอนุภาคถูกแรงกระแทกและการขัดสีระหว่างการทดสอบ LAA ทำให้ขอบคมของอนุภาคลดลง และพื้นผิวของวัสดุเรียบขึ้น การลดลงของขอบคมและความขรุขระของพื้นผิวส่งผลโดยตรงต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค เนื่องจากอนุภาคที่มีขอบคมและพื้นผิวขรุขระมักจะสามารสร้างแรงเสียดทานและแรงสอดประสานระหว่างกันได้สูงกว่า เมื่อพื้นผิวของอนุภาคเรียบขึ้นแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคลดลง ทำให้วัสดุสูญเสียความสามารถในการล็อกตัวกัน ส่งผลให้โครงสร้างของกองวัสดุหลวมขึ้นและมีแนวโน้มที่จะไหลตัวได้ง่ายขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของรูปร่างของยางแสดงดัง ภาพ 68 พบว่า ยางรูปทรงลูกบาศก์มีค่ามุมการกองสูงที่สุดในทุกกรณี รองลงมาคือ ยางรูปทรงแท่ง และต่ำสุดคือยางรูปทรงแผ่น ซึ่งบ่งชี้ว่ายางที่มีลักษณะเป็นทรงเหลี่ยม ลักษณะที่ใกล้เคียงกับหินโรยทางมากที่สุด สามารถสร้างแรงต้านทานการไหลตัวของวัสดุได้ดีกว่า ทำให้สามารถล็อกตัวกันได้ดี ลดการเลื่อนตัวของอนุภาค ในทางกลับกันยางรูปทรงแผ่นมีมุมการกองต่ำที่สุด เนื่องจากมีพื้นผิวแบนราบ ทำให้เกิดการเรียงตัวแบบซ้อนทับกันลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค ส่งผลให้วัสดุไหลตัวได้ง่ายขึ้น



ภาพ 67 การกระจายของมุมการกองของหินโรยทางกับร้อยละเศษยางในสัดส่วนผสมต่าง ๆ



ภาพ 68 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการกองของหินโรยทางกับร้อยละเศษยางในแต่ละสัดส่วนผสม

บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการศึกษาสถาณวิทยาของหินโรยทาง

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลของการผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน (0%, 5%, 13% และ 20%) และผลกระทบของรูปร่างเศษยาง (ลูกบาศก์, แท่ง และแผ่น) ต่อการสึกหรอของหินโรยทางภายใต้การทดสอบการสึกหรอ Los Angeles Abrasion (LAA) รวมถึงการประเมินการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอนุภาคผ่านการวิเคราะห์ภาพ 3 มิติ เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของอนุภาคในระดับมหภาคและระดับจุลภาค โดยใช้เทนเซอร์ในแนวพื้นผิว (Surface Orientation Tensor, SOT) และฟังก์ชันฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical Harmonics Function, SHF) มีผลสรุปดังนี้

1. ในการประเมินลักษณะพื้นผิวของอนุภาคในระดับมหภาคด้วยเทนเซอร์ในแนวพื้นผิว (SOT) พบว่า ตัวอย่างที่ผสมเศษยางทรงแผ่นหลังจากทดสอบ LAA ที่ 1,000 รอบ ตัวอย่างอนุภาคจะมีค่าความเป็นทรงกลม (compactness) มากกว่ายางทรงลูกบาศก์และทรงแท่ง แสดงให้เห็นว่ายางทรงลูกบาศก์และทรงแท่งสามารถช่วยลดการสึกหรอของเหลี่ยมมุมได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่ได้นั้น ยังไม่สามารถแสดงความแตกต่างระหว่างยางทรงลูกบาศก์และแท่งได้ชัดเจน

2. จากการศึกษาลักษณะทางสถณวิทยาโดยใช้ SHF สร้างพื้นผิวของอนุภาคขึ้นใหม่พบว่า ค่าดัชนีรูปร่างเชิงมิติ FI3D ไม่พบความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างแต่ละรูปทรง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าดัชนีความเป็นมุม AI3D พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดระหว่างก่อนและหลังการทดสอบ LAA ซึ่งบ่งบอกถึงการสึกหรอหรือการเปลี่ยนแปลงของขอบและมุมของอนุภาคหลังผ่านการทดสอบ แต่ยังไม่สามารถสรุปได้ว่า รูปทรงของเศษยางแต่ละแบบส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ค่าดัชนีพื้นผิว MT3D พบว่า มีความแตกต่างที่ชัดเจนมากขึ้น โดยระยะห่างระหว่างค่าก่อนและหลังการทดสอบ 1,000 รอบ ของส่วนผสมยางทรงลูกบาศก์มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งหมายความว่าพื้นผิวของอนุภาคเปลี่ยนแปลงน้อยกว่ายางรูปทรงอื่น รองลงมาคือยางทรงแท่ง และท้ายสุดคือยางทรงแผ่น ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า รูปร่างของเศษยางมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวในระดับจุลภาค

3. เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของรัศมีความขรุขระหลังการทดสอบ LAA พบว่า เศษยางทรงลูกบาศก์มีค่ารัศมีความขรุขระต่ำกว่ารูปทรงอื่นในทุกอัตราส่วนผสม นอกจากนี้ อัตราส่วนเศษยาง 13% ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ซึ่งบ่งชี้ว่าในสัดส่วนนี้ เศษยางอาจช่วยลดการสึกหรอของหินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สรุปผลการศึกษามุมการกอง

การประเมินกระทบของเศษยางรถยนต์ต่อมุมการกองของหินโรยทางที่ผสมเศษยางรถยนต์ในสัดส่วนและรูปทรงที่ต่างกัน โดยเปรียบเทียบระหว่างหินโรยทางใหม่และหินโรยทางที่ผ่านการทดสอบ LAA ที่รอบการหมุน 500 และ 1,000 รอบ การศึกษารังนี้แสดงให้เห็นว่า รูปทรงของเศษยางมีผลกระทบโดยตรงต่อมุมการกองของวัสดุ โดยยางทรงลูกบาศก์ให้มุมการกองสูงสุดเนื่องจากมีลักษณะใกล้เคียงกับหินโรยทางมากที่สุด ทำให้สามารถล็อกตัวกันได้ดีและลดการไหลตัวของวัสดุ รองลงมาคือยางทรงแท่ง ซึ่งยังคงมีความสามารถในการต้านทานการไหลตัวในระดับหนึ่ง ส่วนยางทรงแผ่นให้มุมการกองต่ำที่สุด เนื่องจากมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ ส่งผลให้วัสดุจัดเรียงตัวแบบซ้อนทับกัน และลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค ทำให้วัสดุไหลตัวได้ง่ายขึ้น

ในด้านอัตราส่วนผสมของเศษยาง พบว่า การเพิ่มสัดส่วนยางส่งผลให้มุมการกองลดลง สะท้อนถึงการลดลงของแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค โดยเฉพาะเมื่อสัดส่วนยางเกิน 13% มุมการกองลดลง อย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าวัสดุเริ่มสูญเสียความสามารถในการล็อกตัวกัน

ดังนั้น อัตราส่วนผสมของเศษยางที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 13% โดยเลือกใช้เศษยางรูปทรงลูกบาศก์ เนื่องจากสามารถช่วยเสริมแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคได้ดีที่สุด ลดการไหลตัวของวัสดุ และยังคงรักษาเสถียรภาพของกองหินได้ดี

อภิปรายผลการวิจัย

ผลการศึกษานี้สะท้อนให้เห็นอย่างชัดเจนว่า รูปร่างและสัดส่วนของเศษยางรถยนต์ที่ผสมกับหินโรยทาง มีอิทธิพลต่อการสึกหรอและพฤติกรรมทางกลของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ยางทรงลูกบาศก์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับหินโรยทางธรรมชาติ ส่งผลให้วัสดุที่ได้มีคุณสมบัติในการต้านทานการไหลตัวและการสึกหรอได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Fu, et al. (2020) เนื่องจากรูปร่างที่มีเหลี่ยมมุมช่วยเพิ่มแรงเสียดทานภายในและการยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค ส่งผลให้วัสดุสามารถต้านทานการไหลตัวได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่ามุมการกองที่สูงที่สุดในกลุ่มการทดลอง

จากการประเมินในระดับมหภาคด้วยเทนเซอร์ในแนวพื้นผิว (SOT) พบว่า การเพิ่มสัดส่วนของยางทรงแผ่นแม้จะเพิ่มค่าความเป็นทรงกลมของอนุภาคหลังการสึกหรอ แต่ก็ยังสะท้อนถึงการสูญเสียเหลี่ยมมุมของหินอย่างรวดเร็วเมื่อเจอกับแรงเสียดสีในระหว่างการหมุนของเครื่อง LAA ซึ่งอาจไม่พึงประสงค์ในแง่ของเสถียรภาพของชั้นทาง นอกจากนี้ยังพบว่า เศษยางทรงแผ่นส่งผลให้มุมการกองต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างการจัดเรียงตัวของอนุภาคมีแนวโน้มไหลตัวมากกว่ายางรูปทรงอื่น ซึ่งอาจลดประสิทธิภาพในการรองรับน้ำหนักหรือแรงกระแทกจากการใช้งานจริง

ในระดับจุลภาค การประเมินด้วยฟังก์ชันฮาร์โมนิกทรงกลม (SHF) ช่วยให้เห็นการเปลี่ยนแปลงเชิงรูปทรงได้อย่างละเอียด โดยเฉพาะค่าดัชนีความเป็นมุม (AI3D) และดัชนีพื้นผิว (MT3D) ที่แสดงความแตกต่างระหว่างก่อนและหลังการทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ตามการศึกษาของ Quintanilla, et al. (2019); Paixão (2021) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดถึงระดับของการสึกหรอและการสูญเสียลักษณะผิวตามแนวขอบและมุมอย่างชัดเจน ทั้งนี้ การที่เศษยางทรงลูกบาศก์แสดงการเปลี่ยนแปลงของ MT3D น้อยที่สุด เป็นอีกหลักฐานหนึ่งที่ยืนยันว่ารูปทรงนี้สามารถลดการเสียดสีระหว่างอนุภาคได้ดี

เมื่อพิจารณาร่วมกับประสิทธิภาพการสึกหรอที่วัดได้จากอนุภาคหลังการทดสอบ พบว่า อัตราส่วนยางที่เหมาะสมที่สุด คือ 13% โดยเฉพาะเมื่อใช้ยางทรงลูกบาศก์ ซึ่งสามารถลดระดับความสึกหรอและรักษาความสมบูรณ์ของพื้นผิวอนุภาคได้ดีที่สุด กล่าวคือเป็นสัดส่วนที่สมดุลระหว่างการลดการสึกหรอของหินและการคงไว้ซึ่งโครงสร้างของกองหินให้มั่นคง ทั้งในเชิงกลศาสตร์และเชิงเรขาคณิตของอนุภาค

อย่างไรก็ตาม ยังไม่สามารถสรุปผลอย่างเด็ดขาดถึงความแตกต่างเชิงสถิติระหว่างยางทรงลูกบาศก์และทรงแท่งในหลายค่าดัชนี ซึ่งแสดงถึงความจำเป็นในขยายการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อให้ได้ข้อเสนอแนะที่ครอบคลุมมากขึ้นสำหรับการนำยางรีไซเคิลมาใช้ในการทางวิศวกรรมโยธา

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของหินโรยทางภายใต้การทดสอบด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion (LAA) ที่จำนวนรอบการหมุนเพียง 3 ระดับ ได้แก่ 100, 500 และ 1,000 รอบ ซึ่งถือเป็นช่วงต้นของการสึกหรอในระยะเริ่มต้นของวัสดุเท่านั้น อย่างไรก็ตามในการใช้งานจริง หินโรยทางจะต้องรองรับแรงกระแทกและแรงเสียดทานจากการจราจรของรถไฟอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ดังนั้น จึงควรมีการขยายช่วงของจำนวนรอบการทดสอบให้มากยิ่งขึ้น เช่น 1,500 รอบ หรือ 2,000 รอบ เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการสึกหรอในระยะยาว

แม้ว่าสัดส่วนของเศษยางที่ 13% จะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในแง่ของการลดการสึกหรอของหินโรยทางในงานวิจัยนี้ แต่อย่างไรก็ตาม ช่วงของสัดส่วนที่ทำการศึกษายังมีระยะห่างที่กว้างระหว่างแต่ละระดับ (0%, 5%, 13% และ 20%) ซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถระบุจุดที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างแม่นยำ เพื่อเพิ่มความละเอียดและความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์ จึงควรมีการขยายช่วงของสัดส่วนเศษยางในการศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงระหว่าง 9% ถึง 17% ซึ่งเป็นช่วงที่มีแนวโน้มให้ผลลัพธ์ที่ดี เพื่อสร้างความต่อเนื่องของแนวโน้มและตรวจสอบว่าค่าสัดส่วนที่ 13% เป็นจุดที่เหมาะสมจริง หรืออาจมีสัดส่วนอื่นในช่วงใกล้เคียงที่ให้ผลดียิ่งกว่า

นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาการเร่งการเสื่อมสภาพของหินโรยทางชนิดอื่นเพิ่มเติมด้วย เนื่องจากในประเทศไทยมีการใช้หินโรยทางจากแหล่งกำเนิดที่หลากหลาย ซึ่งมีลักษณะทางธรณีวิทยา สมบัติเชิงกล และพฤติกรรมการสึกหรอที่แตกต่างกันไปในแต่ละภูมิภาค การศึกษาจำเพาะเจาะจงกับ หินโรยทางชนิดเดียวอาจไม่ครอบคลุมพฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้นในภาคสนาม จึงควรขยายขอบเขตการวิจัย ไปยังหินชนิดอื่น เพื่อประเมินผลกระทบของการเติมเศษยางในบริบทที่หลากหลายมากขึ้น รวมถึง เพื่อให้สามารถประยุกต์ผลการวิจัยไปใช้ได้อย่างเหมาะสมในแต่ละพื้นที่ของประเทศ ซึ่งจะส่งผลให้ การใช้งานวัสดุผสมเศษยางมีประสิทธิภาพสูงสุดและตรงกับความต้องการของงานก่อสร้างระบบราง ในบริบทของประเทศไทย

อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกที่ครอบคลุมยิ่งขึ้นเกี่ยวกับพฤติกรรมทางวิศวกรรมของ วัสดุผสมดังกล่าว ควรมีการศึกษาต่อไปโดยดำเนินการศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของชั้นวัสดุเฉพาะ พฤติกรรมหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้นหินโรยทางกับชั้นรองหินโรยทาง (sub-ballast) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการรับแรงและถ่ายแรงในระบบทางรถไฟ โดยการศึกษาอาจดำเนินการ ผ่านการทดสอบแรงเฉือนขนาดใหญ่ เพื่อประเมินพฤติกรรมแรงเฉือนภายใต้สภาวะการใช้งานจริง การศึกษานี้จะช่วยให้เข้าใจกลไกการถ่ายแรงระหว่างชั้นวัสดุต่าง ๆ ได้ดียิ่งขึ้น และสามารถใช้เป็น ข้อมูลประกอบในการออกแบบชั้นโครงสร้างทางรถไฟที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งในด้านความมั่นคง และความยั่งยืนของวัสดุทางวิศวกรรม



บรรณานุกรม

- กรมการขนส่งทางบก. (2566). รายงานสถิติการขนส่งปีงบประมาณ 2562–2566. กรุงเทพฯ: กรมการขนส่งทางบก.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2563). มยผ.1281-63 ถึง มยผ.1288-63 ชุดมาตรฐานการทดสอบวัสดุ **สังเคราะห์ทางปฐพี**. กรุงเทพฯ: กรมโยธาธิการและผังเมือง.
- ณัฐพัชร์ ฤกษ์ชัยศรี, อภินิติ โชติสังกาศ (2559). การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างดินกับแผ่นใยสังเคราะห์ในสถานะอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ. ใน **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 54**.
- Afrazi, M., Lin, Q., & Fakhimi, A. (2022). Physical and numerical evaluation of Mode II fracture of quasi-brittle materials. **International Journal of Civil Engineering**, 20, 993–1007. <https://doi.org/10.1007/s40999-022-00718-z>.
- Ahn, I. S., Cheng, L. (2014). Tire derived aggregate for retaining wall backfill under earthquake loading. **Const Build Mat**, 57, 105–116.
- Ahn, I. S., Cheng, L. (2017). Seismic analysis of semi-gravity RC cantilever retaining wall with TDA backfill. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, 11(4), 455–469.
- Akbarimehr, D., Eslami, A., & Aflaki, E. (2020). Geotechnical behaviour of clay soil mixed with rubber waste. **Journal of Cleaner Production**, 122632. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122632>.
- Arachchige, C. M. K., Rujikiatkamjorn, C., Indraratna, B., Qi, Y., & Vinod, J. S. (2022). Geotechnical characteristics of a rubber intermixed ballast system. **Acta Geotechnica**, 17(5), 1847–1858. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01342-2>.
- ASTM, A. (2017). “**D6270 Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications.**”
- Banasiak L, Chiaro G, Palermo A, Granello G. (2019). **Recycling of end-of-life tyres in civil engineering applications: environmental implications**. WasteMINZ 2019 Conf Hamilton, New Zealand 15.

- Bandyopadhyay, T. S., Chakraborty, P., & Hegde, A. (2023). Interaction between geogrid and sand-crumb rubber mixtures in laboratory pullout conditions. **Innovative Infrastructure Solutions**, 8, 141. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01112-x>.
- Basel Convention Working Group. (1999). **Technical Guidelines on the Identification and Management of Used Tyres, Basel Convention on the control of transboundary movements of hazardous wastes and their disposal, Document No. 10.**
- Bergado D, Youwai S, Rittirong A (2005.) Strength and deformation characteristics of flat and cubical rubber tyre chip-sand mixtures. **Geotechnique**, 55(8), 603-606.
- Correia NS, Zornberg JG (2018). Strain distribution along geogrid-reinforced asphalt overlays under traffic loading. **Geotext Geomembr**, 46(1), 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2017.10.0022>
- Chiaro G, Tasalloti A, Banasiak L, Palermo A, Granello G, Rees S. (2020). Sustainable recycling of end-of-life tyres in civil (geotechnical) engineering applications: turning issues into opportunities in the New Zealand context. **NZ Geomech. News**, 99, 38–47.
- Christ M, Park JB, Hong SS. (2010). Laboratory observation of the response of a buried pipeline to freezing rubber-sand backfill. **J Mater Civ Eng**, 22(9), 943–950. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000090](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000090).
- Cui MJ, Zheng JJ, Dahal BK, Lai HJ, Huang ZF, Wu CC. (2021). Effect of waste rubber particles on the shear behaviour of biocemented calcareous sand. **Acta Geotech**, 16(5), 1429–1439.
- Dabic-Miletic, S., Simic, V., & Karagoz, S. (2021). End-of-life tire management: A critical review. **Environmental Science and Pollution Research**, 28(45), 68053–68070. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16263-6>.
- Das S, Bhowmik D. (2020). Small-Strain Dynamic Behavior of Sand and Sand-Crumb Rubber Mixture for Different Sizes of Crumb Rubber Particle. **J Mat Civil Eng**, 32(11), 4020334.
- Ding Y, Zhang J, Chen X, Wang X, Jia Y (2021). Experimental investigation on static and dynamic characteristics of granulated rubber-sand mixtures as a new railway subgrade filler. **Const Build Mat**, 273, 121955.

- Edinçliler, A., & Cagatay, A. (2013). Weak subgrade improvement with rubber fibre inclusions. **Geosynthetics International**, 20(1), 39–46.
<https://doi.org/10.1680/gein.12.00038>.
- Fareghian, M., Afrazi, M., & Fakhimi, A. (2023). Soil reinforcement by waste tire textile fibers: Small-scale experimental tests. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 35(2), 1–14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004574](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004574).
- Farooq, M. A., & Nimbalkar, S. (2024). Static and cyclic performance of polyurethane foam adhesive bound soil–rubber mixtures under drained conditions. **Acta Geotechnica**, 19, 561–589. <https://doi.org/10.1007/s11440-023-01896-3>.
- Feng, Z. K., Xu, W.J., Lubbe, R. (2020). Three-dimensional morphological characteristics of particles in nature and its application for DEM simulation. **Pow Tech**, 364, 635–646. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.022>.
- Fonseca J, Riaz A, Bernal-Sanchez J, Barreto Gonzalez D, McDougall J, Miranda Manzanares M, Dimitriadi V (2019). Particle-scale interaction in sand-rubber mixtures and their influence on energy dissipation mechanisms. **Geotech Lett**, 9(4), 1–6. <https://doi.org/10.1680/jgele.18.00221>.
- Foose, G. J., Benson, C. H., & Bosscher, P. J. (1996). Sand reinforced with shredded waste tires. **Journal of Geotechnical Engineering**, 122(9), 760–767.
- Fu, J.-J., Chen, C., Ferrellec, J.-F., & Yang, J. (2020). Effect of particle shape on repose angle based on hopper flow test and discrete element method. **Advances in Civil Engineering**, 2020, 8811063, 10. <https://doi.org/10.1155/2020/8811063>.
- Guo, F.-q., Zhang, H., Yang, Z.-j., Huang, Y.-j., & Withers, P. J. (2023). Aspherical harmonic-random field coupled method for efficient reconstruction of CT-image based 3D aggregates with controllable multiscale morphology. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 406, 115901. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.115901>.
- Han B, Ling J, Shu X, Song W, Boudreau RL, Hu W, Huang B (2019). Quantifying the effects of geogrid reinforcement in unbound granular base. **Geotext Geomembr**, 47(3), 369–376. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.01.009>.

- Hudson, A., Watson, G., Le Pen, L., & Powrie, W. (2016). Remediation of mud pumping on a ballasted railway track. **Procedia Engineering**, 143, 1043–1050. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.103>.
- Indraratna, B., Ferreira, F. B., Qi, Y., & Ngo, T. N. (2018). Application of geoinclusions for sustainable rail infrastructure under increased axle loads and higher speeds. **Innovative Infrastructure Solutions**, 3(69), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0174-z>.
- Indraratna, B., Hussaini, S. K. K., & Vinod, J. S. (2013). The lateral displacement response of geogrid-reinforced ballast under cyclic loading. **Geotextiles and Geomembranes**, 39, 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.07.007>.
- Indraratna, B., Qi, Y., Arachchige, C. M. K., Jayasuriya, C., & Rujikiatkamjorn, C. (2021). Use of recycled rubber inclusions with granular waste for enhanced track performance. **Transportation Engineering**, 6, 100093. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2021.100093>.
- Jahandari, S., Tao, Z., Saberian, M., Shariati, M., Li, J., Abolhasani, M., et al. (2021). Geotechnical properties of lime-geogrid improved clayey subgrade under various moisture conditions. **Road Materials and Pavement Design**, 22(sup1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1876751>.
- Kutay, M. E., Ozturk, H. I., Abbas, A. R., & Hu, C. (2011). Comparison of 2D and 3D image-based aggregate morphological indices. **Int J Pav Eng**, 12(4), 421-431. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2011.575137>.
- Liang, H., Shen, Y., Xu, J., & Shen, X. (2021). Multiscale Three-dimensional morphological characterization of Calcareous sand particles using spherical harmonic analysis. **Front Phys**, 9, 744319. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.744319>.
- Liu, F. C., Wu, M. T., Liu, N., Zhang, Y. F., & Chen, J. L. (2017). Experimental study on Poisson's ratio of rubber-sand mixtures. **Chin J Rock Mech Eng**, 36(S1), 3596–3606.
- Liu, F. Y., Ying, M. J., Yuan, G. H., Wang, J., & Ni, J. F. (2021). Particle shape effects on the cyclic shear behaviour of the soil-geogrid interface. **Geotext Geomembr**, 49(4), 991–1003. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2021.01.008>.

- Liu, H. S., Mead, J. L., & Stacer, R. G. (2000). Environmental effects of recycled rubber in light-fill applications. **Rubber Chem Technol**, 73(3), 551–564.
- Li, X., Xu, H., Gao, Y., & Tao, Y. (2010). Comparison of end-of-life tire treatment technologies: A Chinese case study. **Waste Management**, 30(11), 2235–2246. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.06.006>.
- Lynch, P., Gabolinscy, C., Tyler, M., Turner, N., Caldwell, J., Kim, N., et al. (2017). Guidance for storage and stockpiling end of life tyres for local government, Report 5629. **Waikato Regional Council**, 14.
- Madhusudhan, B. R., Boominathan, A., & Banerjee, S. (2020). Cyclic simple shear response of sand–rubber tire chip mixtures. **Int J Geomech**, 20(9), 04020136. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001761](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001761)
- Manohar, D. R., & Anbazhagan, P. (2021) Shear strength characteristics of geosynthetic reinforced rubber-sand mixtures. **Geotext Geomembr**, 49(4), 910–920. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.12.015>.
- Masad, E., Saadeh, S., Al-Rousan, T., Garboczi, E., & Little, D. (2005). Computations of particle surface characteristics using optical and X-ray CT images. **Comp Mat Sci**, 34, 406–424. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2005.01.010>.
- Mehrjardi, G. T., Tafreshi, S. M., & Dawson, A. R. (2015). Numerical analysis on buried pipes protected by combination of geocell reinforcement and rubber-soil mixture. **Int J Civ Eng**, 13(2), 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). Fundamentals of soil behavior (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Mohajerani, A., Burnett, L., Smith, J. V., Markovski, S., Rodwell, G., Rahman, M. T., Maghool, F. (2020). Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: a review. **Resour Conserv Recycl**, 155, 104679. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>.
- Ngo, N. T., Indraratna, B., & Rujikiatkamjorn, C. (2016). Modelling geogrid-reinforced railway ballast using the discrete element method. **Transportation Geotechnics**, 6, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.04.005>.

- Orosz, A., Angelidakis, V., & Bagi, K. (2021). Surface orientation tensor to predict preferred contact orientation and characterize the form of individual particles. **Pow Tech**, 394, 312-325.
- Patil, U., Valdes, J. R., & Evans, T. M. (2011). Swell mitigation with granulated tire rubber. **J Mater Civ Eng**, 23(5), 721-727.
- Paixao, A., & Fortunato, E. (2021). Abrasion evolution of steel furnace slag aggregate for railway ballast: 3D morphology analysis of scanned particles by close-range photogrammetry. **Const Build Mat**, 267, 121255. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121225>.
- Pitilakis, K., Karapetrou, S., & Tsagdi, K. (2015). Numerical investigation of the seismic response of RC buildings on soil replaced with rubber-sand mixtures. **Soil Dyn Earthq Eng**, 79:237-252. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.09.018>.
- Quintanilla, I. D., Comb, G., Emeriault, F., Voivret, C., & Ferrellec, J. F. (2017). X-ray CT analysis of the evolution of ballast grain morphology along a Micro-Deval test: key role of the asperity scale. **Gran Matt**, 21, 30. <https://doi.org/10.1007/s10035-019-0881-y>.
- Reddy, S. B., & Krishna, A. M. (2015). Recycled tire chips mixed with sand as lightweight backfill material in retaining wall applications: an experimental investigation. **Int J Geosynth Ground Eng**, 1(4), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s40891-015-0036-0>.
- Rowhani, A., & Rainey, T., (2016). Scrap Tyre Management Pathways and Their Use as a Fuel—A Review. **Energies**, 9, 888, <https://doi.org/10.3390/en9110888>.
- Sadeghi, J., Tolou Kian, A. R., Ghiasinejad, H., Fallah, M. M., & Motevalli, S. (2020). Effectiveness of geogrid reinforcement in improvement of mechanical behavior of sand-contaminated ballast. **Geotextiles and Geomembranes**, 48, 663-675. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.05.007>.
- Selig, E. T., & Waters, J. M. (1994). **Track geotechnology and substructure management**. New York: Thomas Telford Publications.
- Shah, S. N. R., Sulong, N. H. R., Khan, R., Jumaata, M. Z., & Shariati, M. (2016). Behavior of industrial steel rack connections. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 72, 89-102. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.08.026>.

- Soltani-Jigheh, H., Asadzadeh, M., & Marefat, V. (2014). Effects of tire chips on shrinkage and cracking characteristics of cohesive soils. **Turk J Eng Environ Sci**, 37(3), 259–271. <https://doi.org/10.3906/kim-1208-19>.
- Sweta, K., & Hussaini, S. K. K. (2019). Behavior evaluation of geogrid-reinforced ballast–subballast interface under shear condition. **Geotextiles and Geomembranes**, 47(1), 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2018.09.002>.
- Tafreshi, S. M., Mehrjardi, G. T., & Dawson, A. R. (2012). Buried pipes in rubber-soil backfilled trenches under cyclic loading. **J Geotech Geoenviron Eng**, 138(11), 1346–1356. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000710](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000710).
- Tasalloti, A., Chiaro, A., Banasiak, L., & Palermo, A. (2021). Experimental investigation of the mechanical behaviour of gravel-granulated tyre rubber mixtures. **Const Build Mat**, 273, 121749.
- Tasalloti, A., chiaro, A., Banasiak, L., & Palermo, A. (2021). Experimental investigation of the mechanical behaviour of gravel-granulated tyre rubber mixtures. **Const Build Mat**, 273, 121749.
- Tiwari, B., Ajmera, B., Moubayed, S., Lemmon, A., Styler, K., & Guerrero, M. J. (2014). Improving geotechnical behavior of clayey soils with shredded rubber tires—Preliminary study. In **Geo-Congress 2014 Technical Papers** (p. 362). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784413272.362>.
- Tran, T. Q., Thomas, B. S., Zhang, W., Ji, B., Li, S., & Brand, A. S. (2022). A comprehensive review on treatment methods for end-of-life tire rubber used for rubberized cementitious materials. **Construction and Building Materials**, 359, 129365. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129365>.
- Trani, L. D. O., & Indraratna, B. (2010). Assessment of subballast filtration under cyclic loading. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 136(11), 1519–1528. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000384](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000384).
- Tsang HH (2008). Seismic isolation by rubber–soil mixtures for developing countries. **Earthq Eng Struct Dyn**, 37(2), 283–303. <https://doi.org/10.1002/eqe.756>.
- Tweedie, J. J., Humphrey, D. N., & Sandford, T. C. (1998) Tire shreds as lightweight retaining wall backfill: active conditions. **J Geotech Geoenviron Eng**, 124(11), 1061–1070. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:11\(1061\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:11(1061)).

- Venkateswarlu, H., Ujjawal, K. N., & Hegde, A. (2018). Laboratory and numerical investigation of machine foundations reinforced with geogrids and geocells. **Geotext Geomembr**, 46(6), 882–896.
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.08.006>.
- Wang, J. Q., Zhang, L. L., Xue, J. F., Tang, Y. (2018). Load-settlement response of shallow square footings on geogrid-reinforced sand under cyclic loading. **Geotext Geomembr**, 46(5), 586–596.
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.04.009>.
- Wu, A. X., Sun, Y. Z., & Liu, X. P. (2002). **Granular dynamic theory and its applications. Metallurgical Industry Press.** (In Chinese).
- Wu, H., Zhu, L., Song, W., Xu, Z., Xu, F., & Gong, H. (2021). Impact performance of ballast by incorporating waste tire-derived aggregates. **Construction and Building Materials**, 288, 122992.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122992>.
- 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\(0](https://doi.org/10.1007/s11440-023-01868-7(0).
- 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>.
- 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>.
- Xiao, M., Bowen, J., Graham, M., & 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
- Yang, Z., Zhang, Q., Shi, W., Lv, J., Lu, Z., & Ling, X. (2020). Advances in properties of rubber reinforced soil. **Advances in Civil Engineering**, 2020, 6629757.
<https://doi.org/10.1155/2020/6629757>.

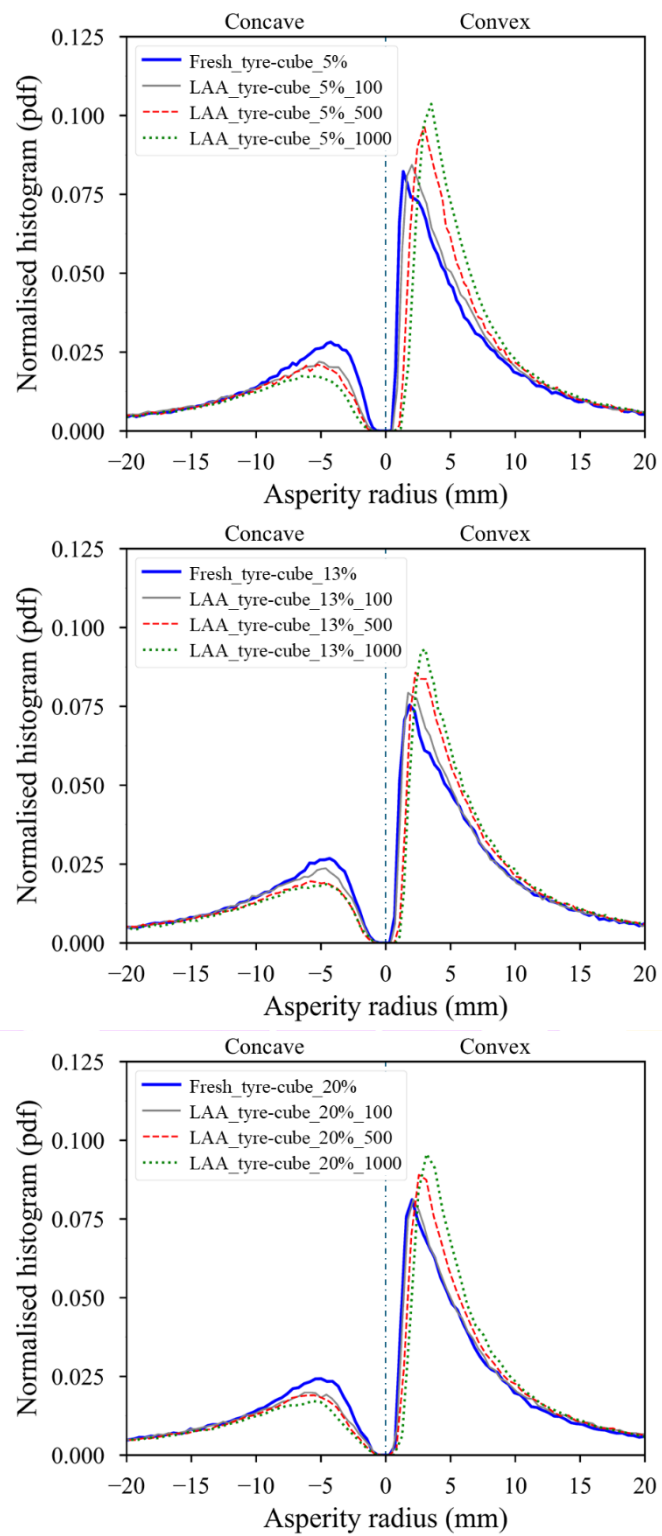
- Yoon, S., Prezzi, M., Siddiki, N. Z., & Kim, B. (2006). Construction of a test embankment using a sand–tire shred mixture as fill material. **Waste Manag**, 26(9), 1033–1044. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.10.009>.
- Zhou, B., Wang, J., & Zhao, B. (2015). Micromorphology characterization and reconstruction of sand particles using micro X-ray tomography and spherical harmonics. **Eng Geo**, 184, 126-137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.11.009>.
- Zingg, T. (1935). “**Beitrag zur Schotteranalyse**”. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Zornberg, J. G., Cabral, A. R., & Viratjandr, C. (2004). Behaviour of tire shred sand mixtures. **Can Geotech J**, 41(2), 227–241. <https://doi.org/10.1139/t03-086>.
- Zhou, B., Wang, J., & Zhao, B. (2018). Three-dimensional sphericity, roughness and fractal dimension of sand particles. **Geotech**, 68(1), 18-30.



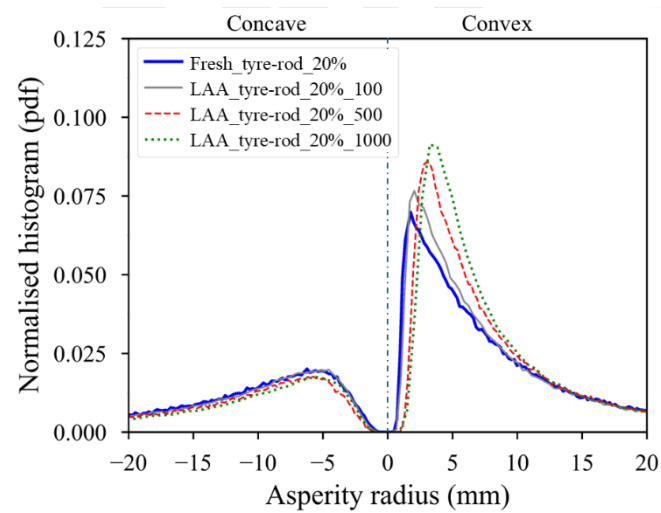
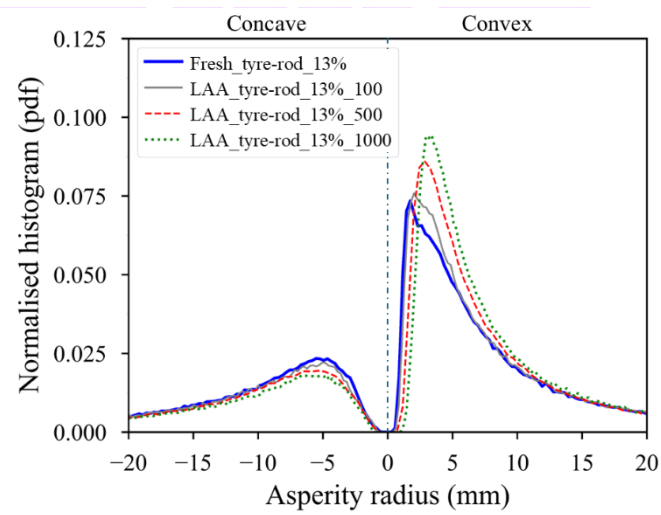
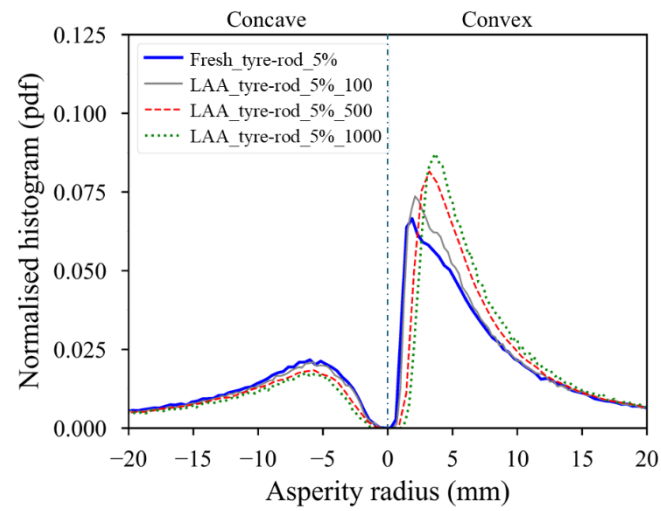


ภาคผนวก

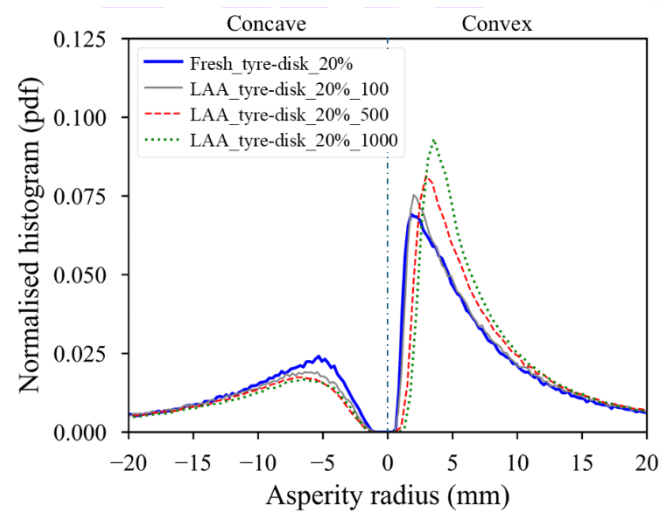
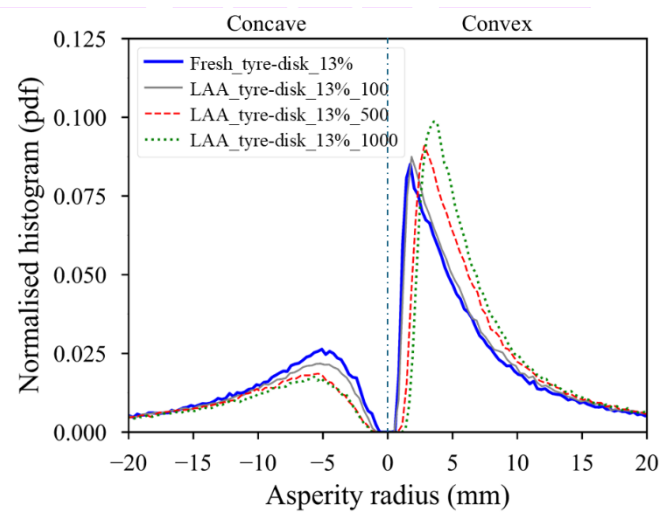
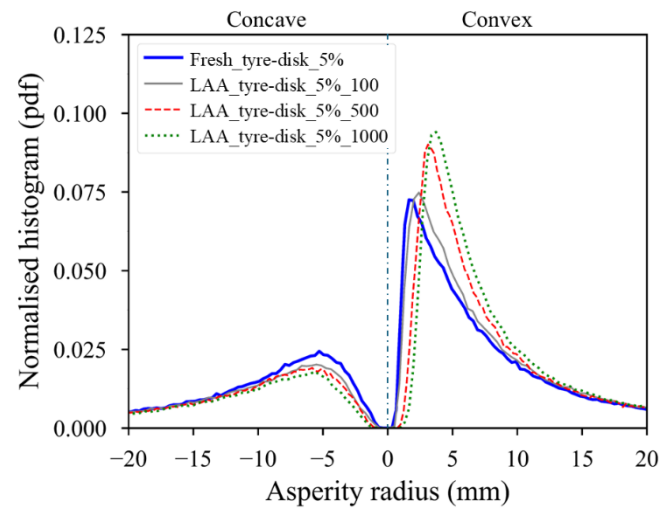
ภาคผนวก ก รัศมีความขรุขระของหินโรยทาง



รัศมีความขรุขระของหินโรยทางผสมเศษยางทรงลูกบาศก์

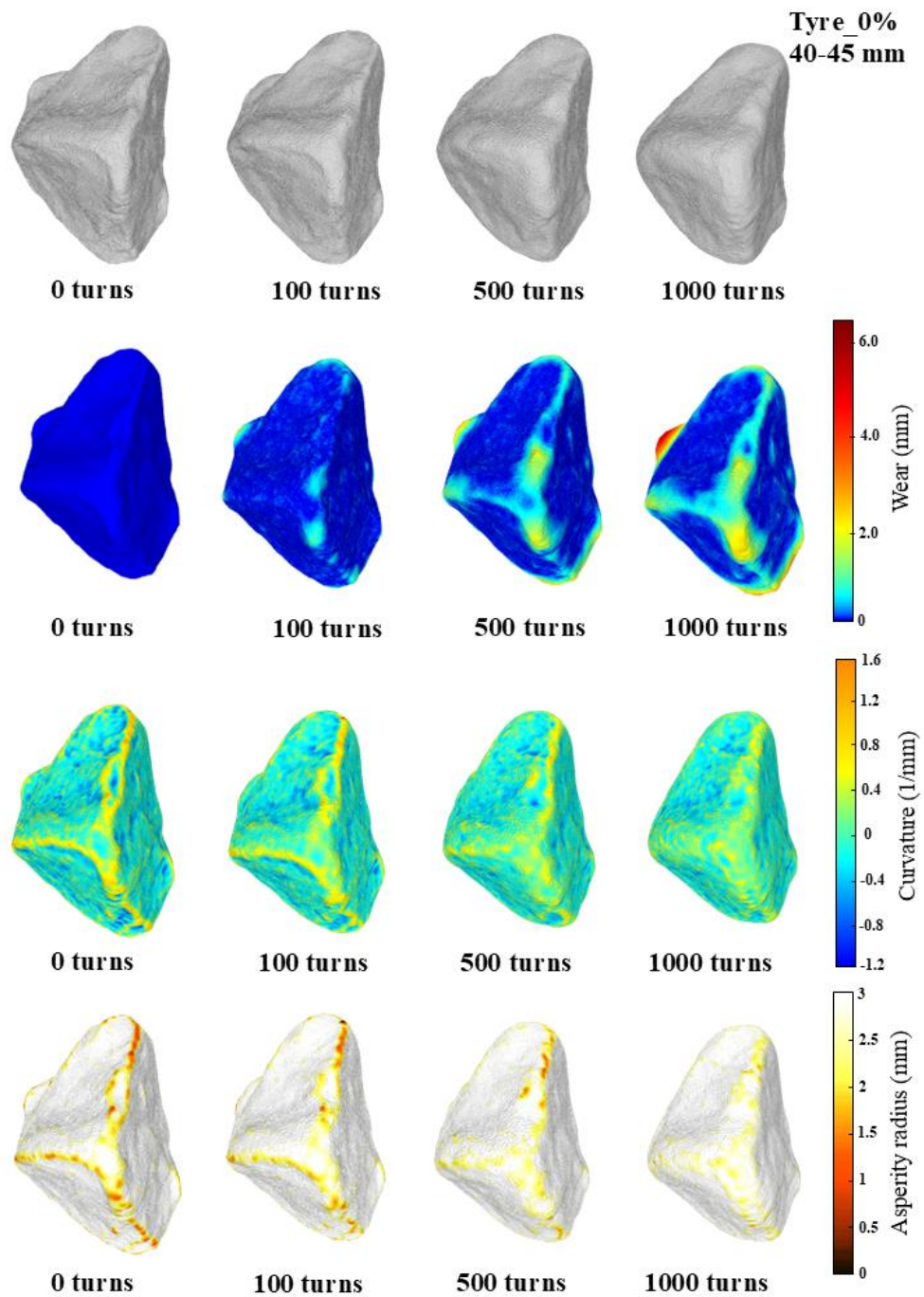


รัศมีความขรุขระของหินโรยทางผสมเศษยางทรงแท่ง

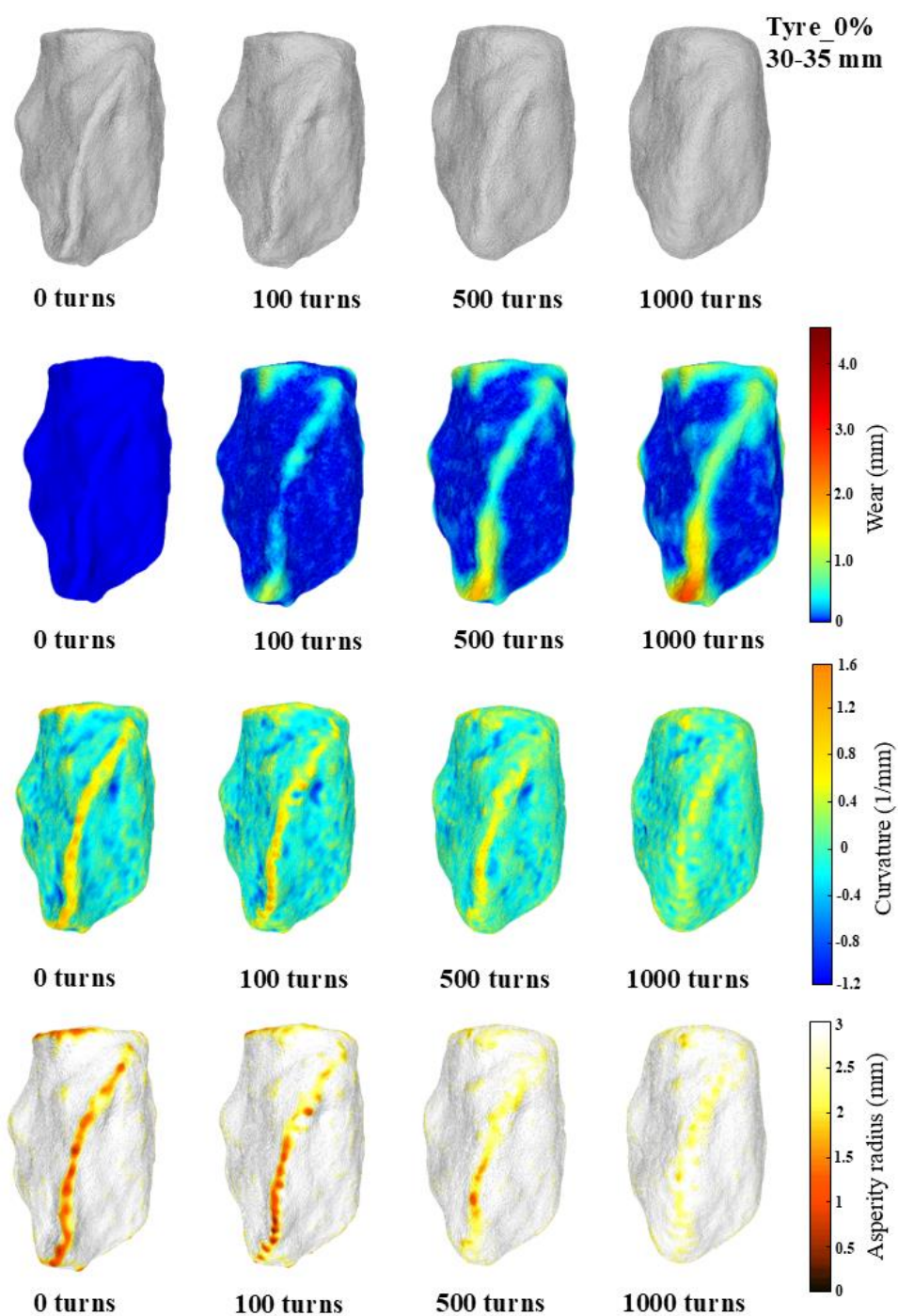


รัศมีความขรุขระของหินโรยทางผสมเศษยางทรงแผ่น

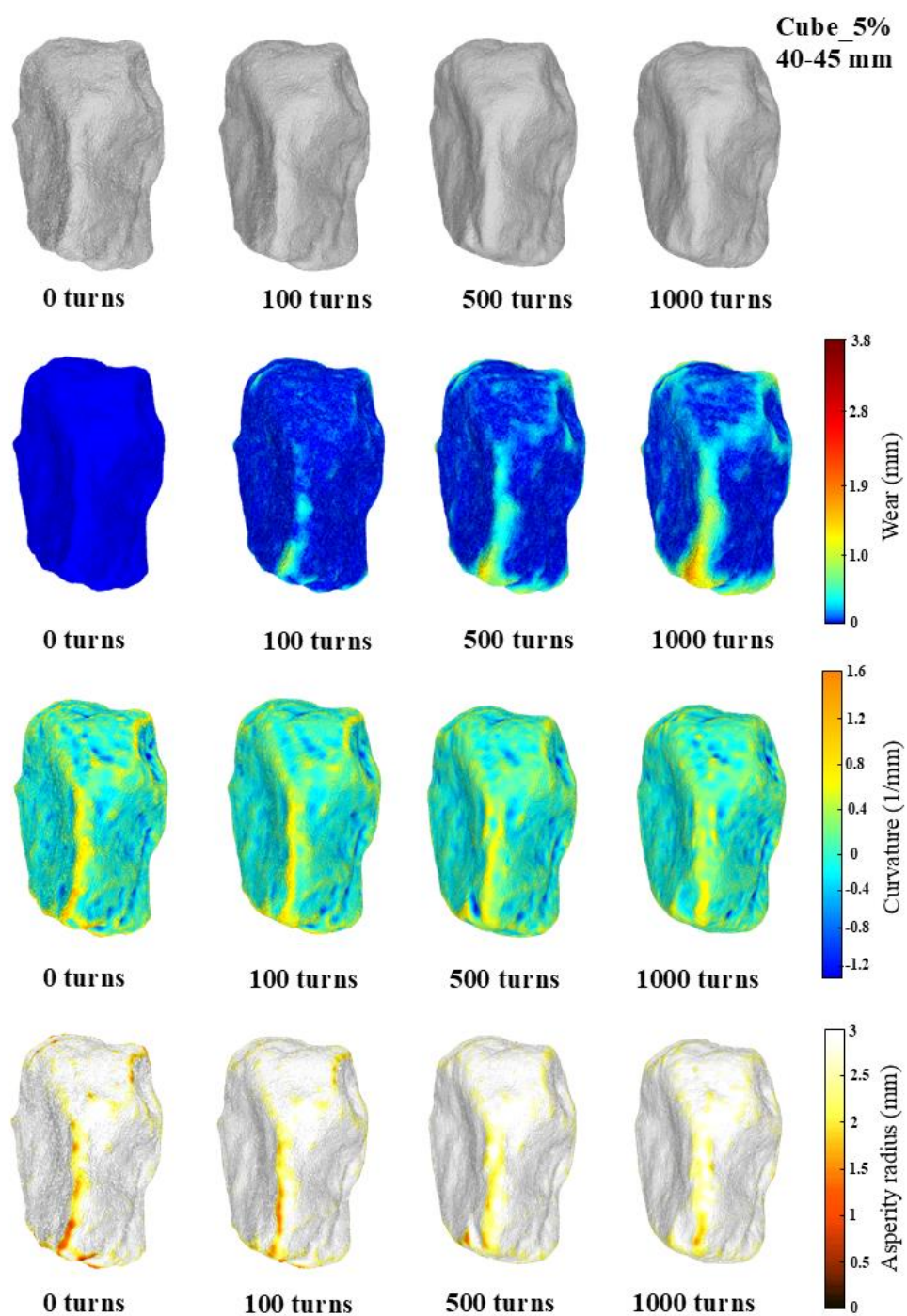
ภาคผนวก ข ภาพ 3 มิติ แสดงการพัฒนาการของการสึกหรอ รัศมีความโค้ง และรัศมี
ความขรุขระของหินโรยทาง



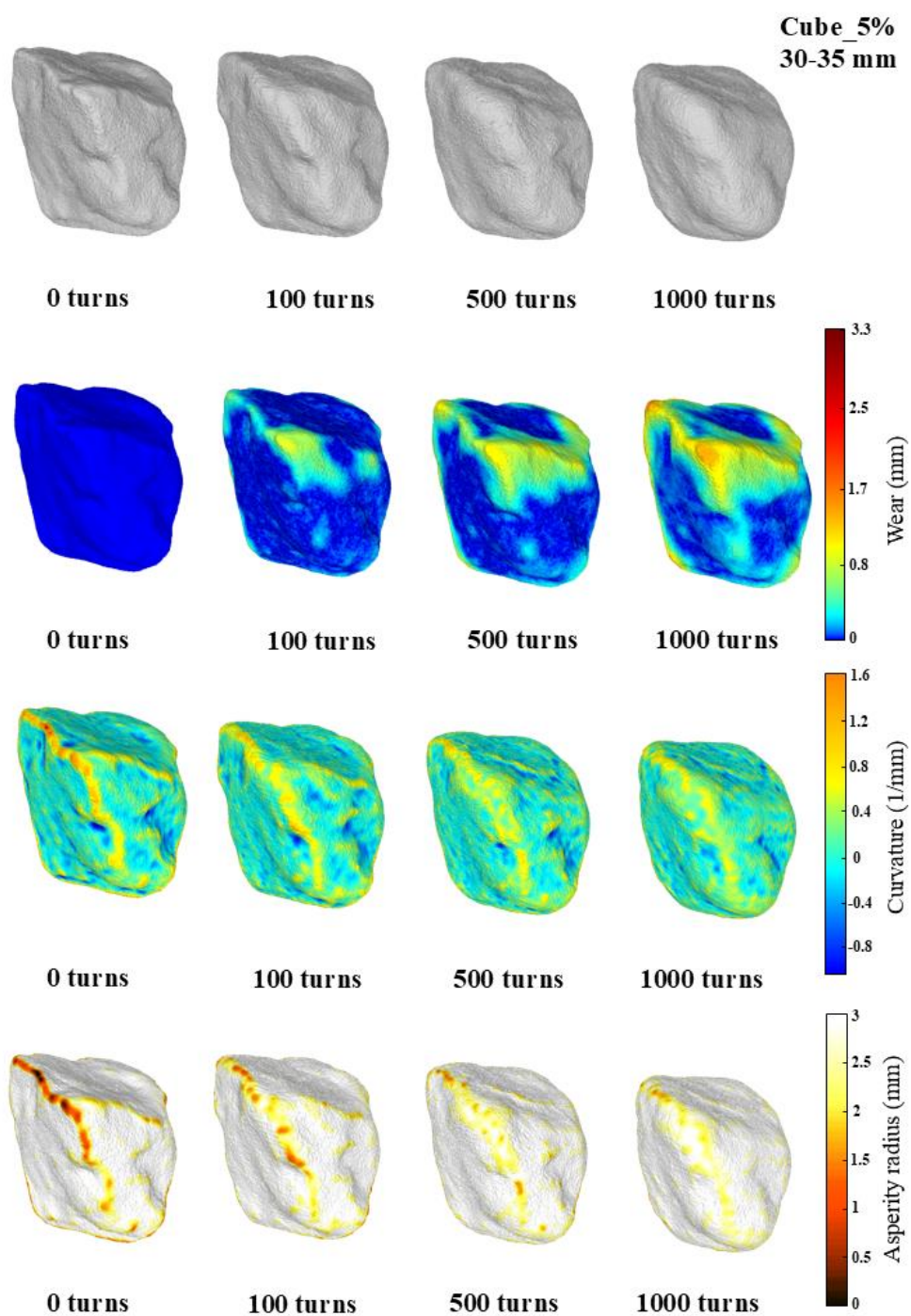
ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ
(Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 40-45 มม. ไม่ผสมเศษยาง



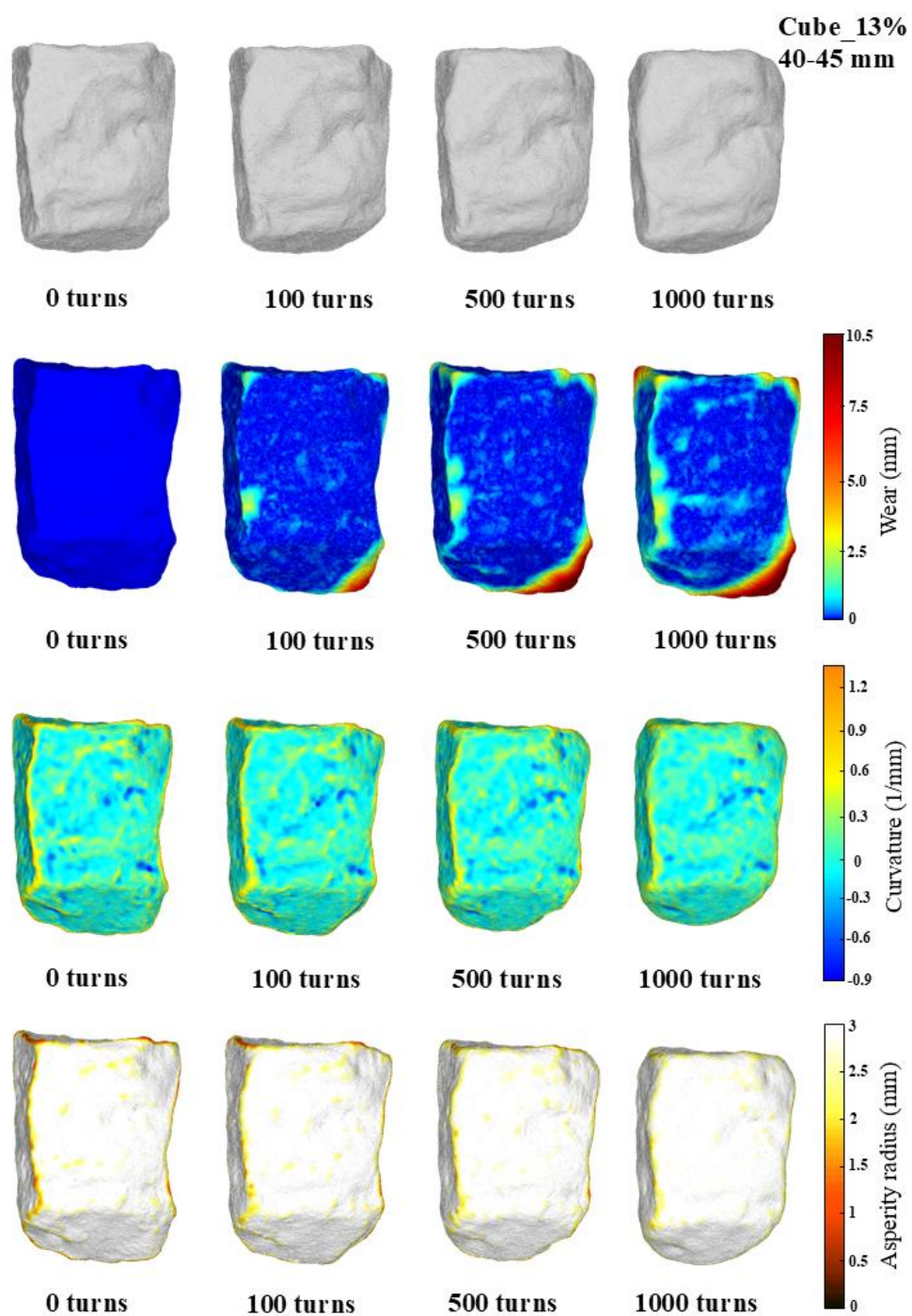
ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 30-35 มม. ไม่ผสมเศษยาง



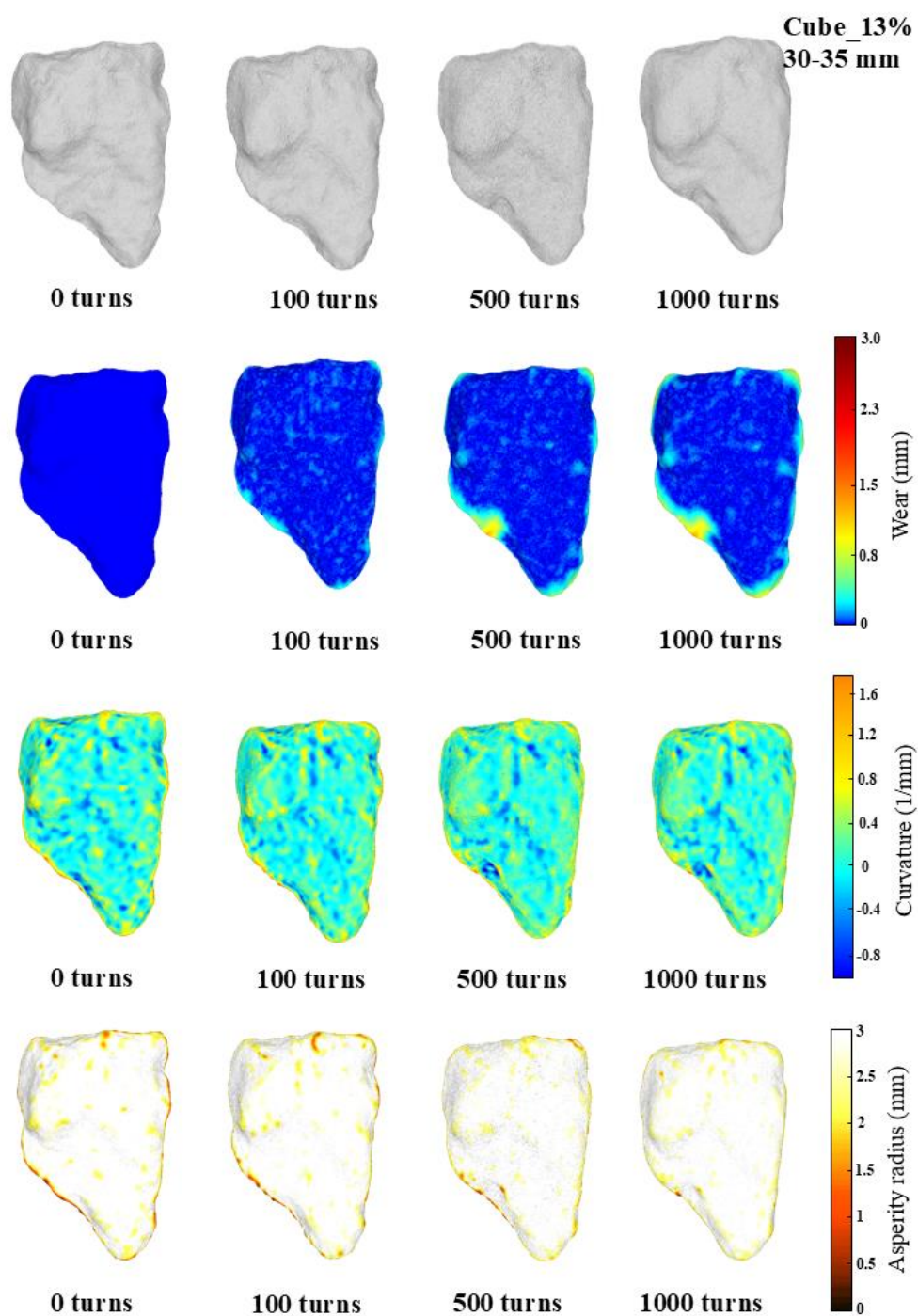
ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 40-45 มม. ผสมเศษยางลูกบาศก์ร้อยละ 5



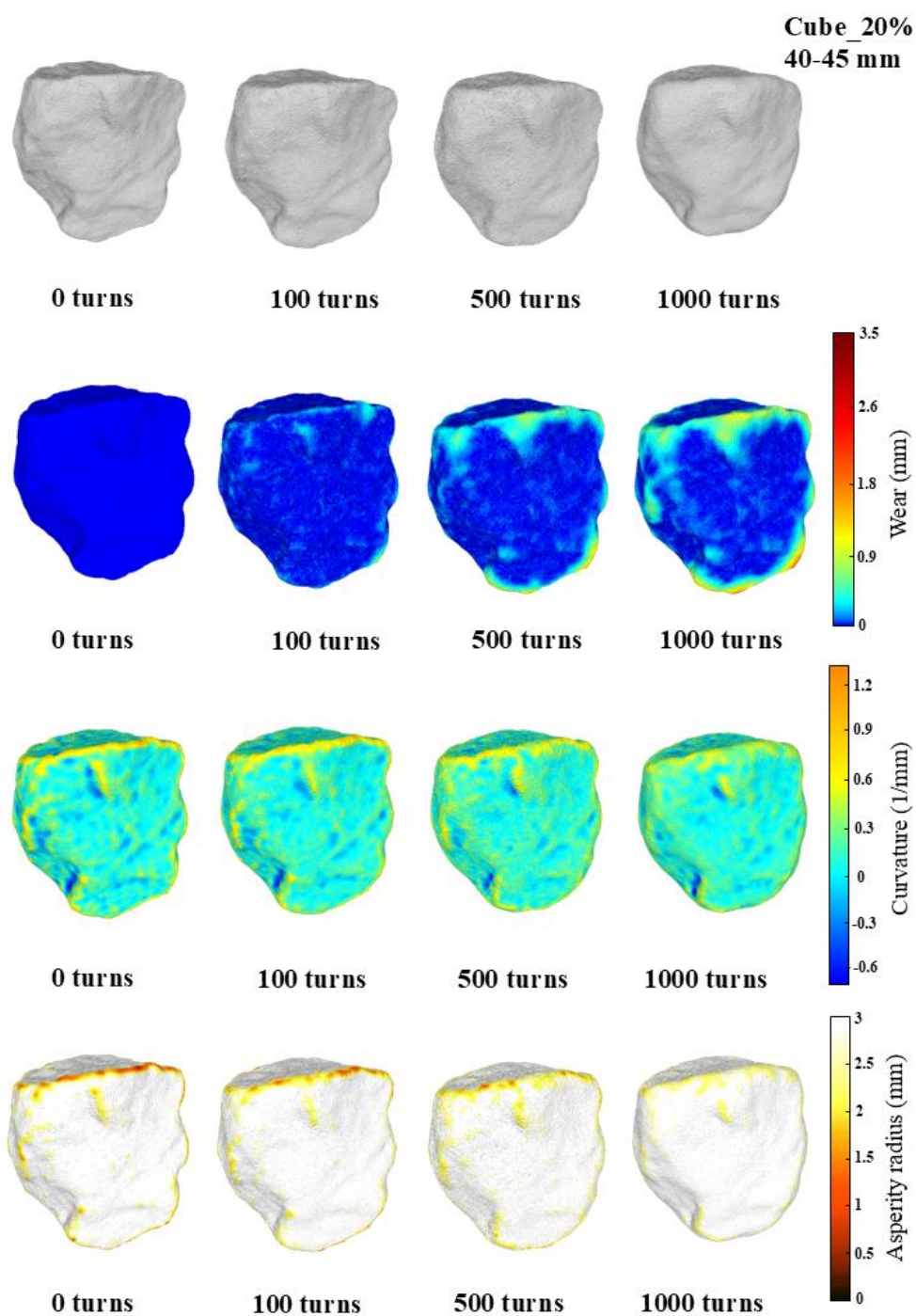
ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 30-35 มม. ผสมเศษยางลูกบาศก์ร้อยละ 5



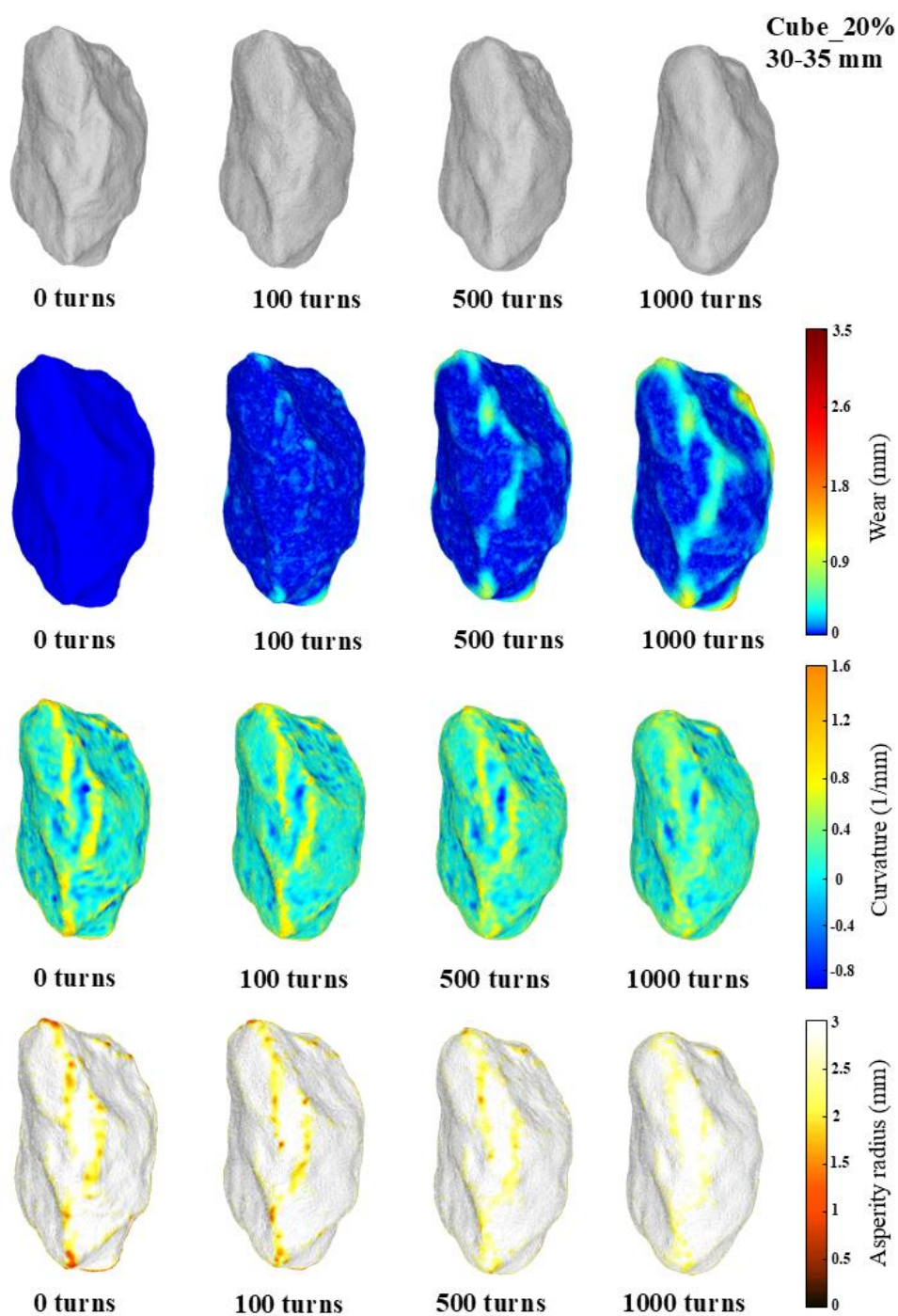
ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 40-45 มม. ผสมเศษยางลูกบาศก์ร้อยละ 13



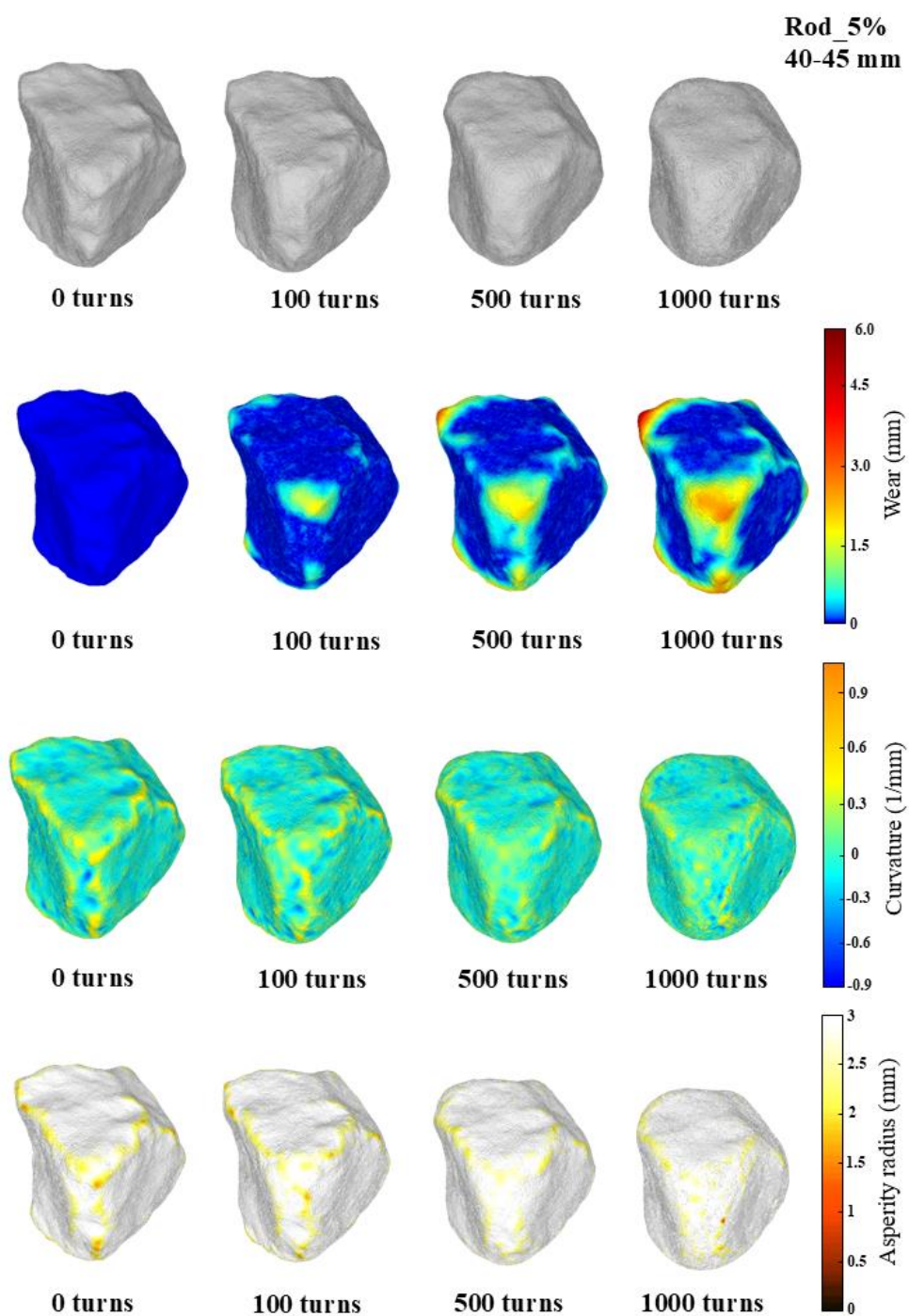
ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 30-35 มม. ผสมเศษยางลูกบาศก์ร้อยละ 13



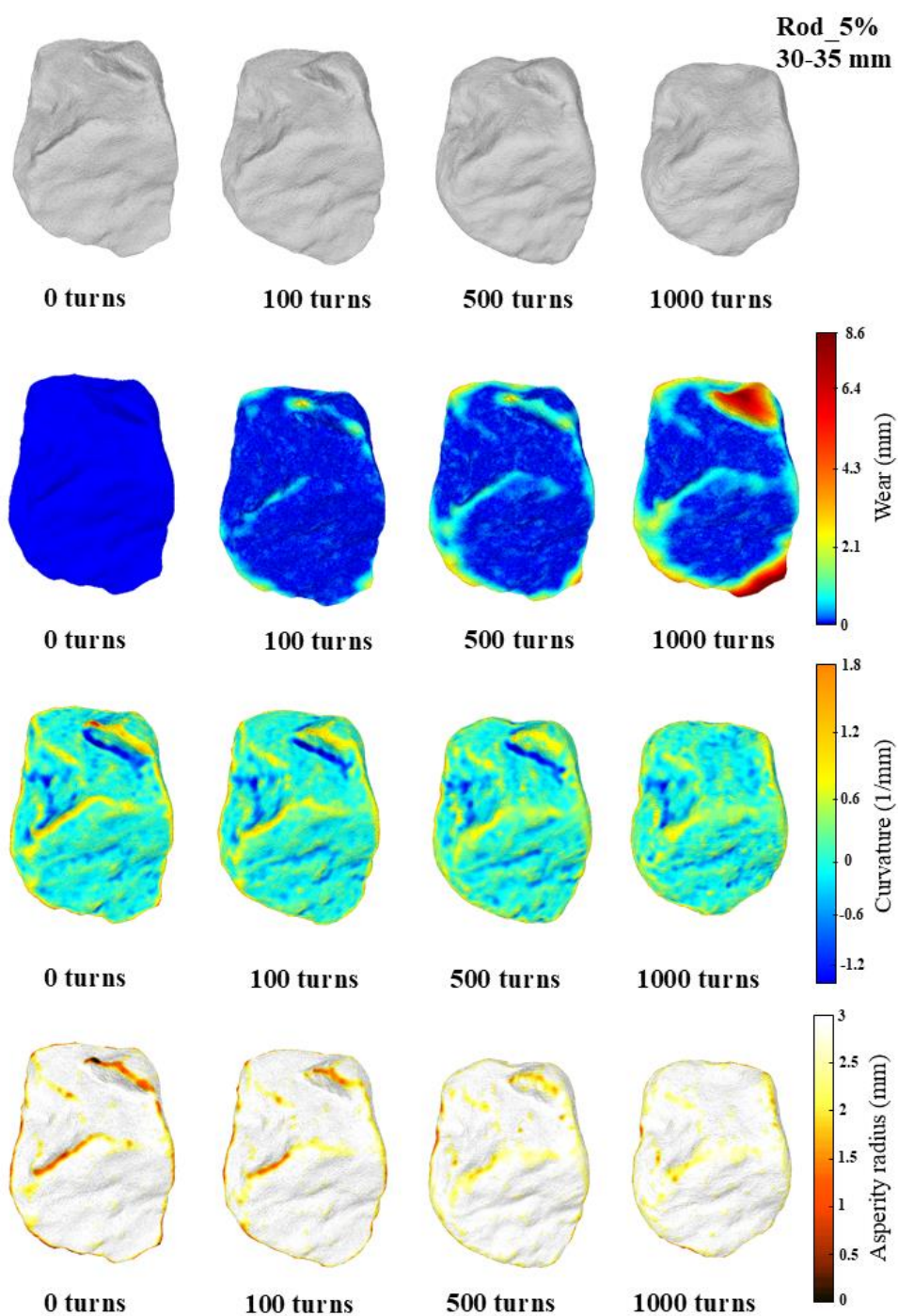
ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 40-45 มม. ผสมเศษยางลูกบาศก์ร้อยละ 20



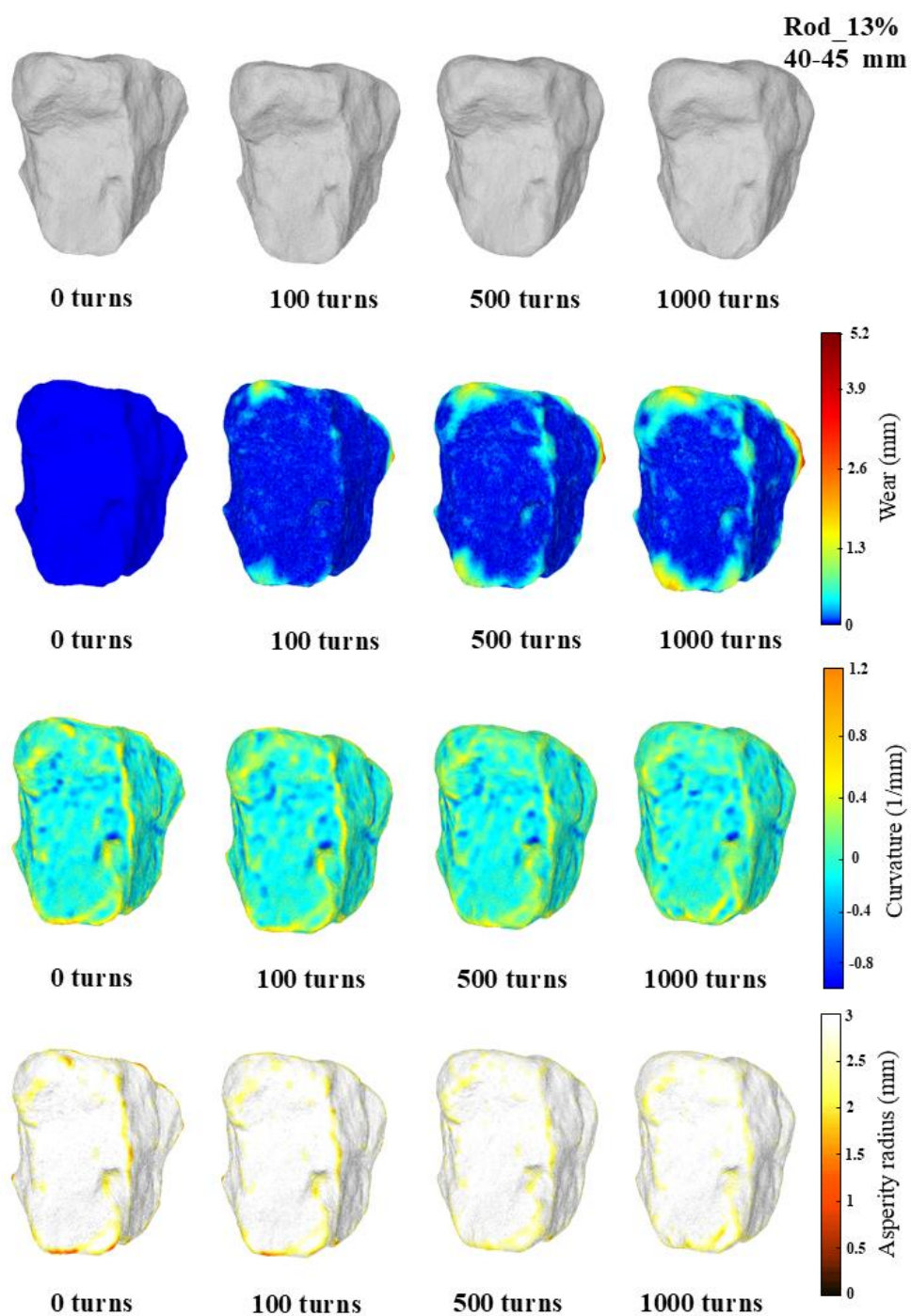
ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 30-35 มม. ผสมเศษยางลูกบาศก์ร้อยละ 20



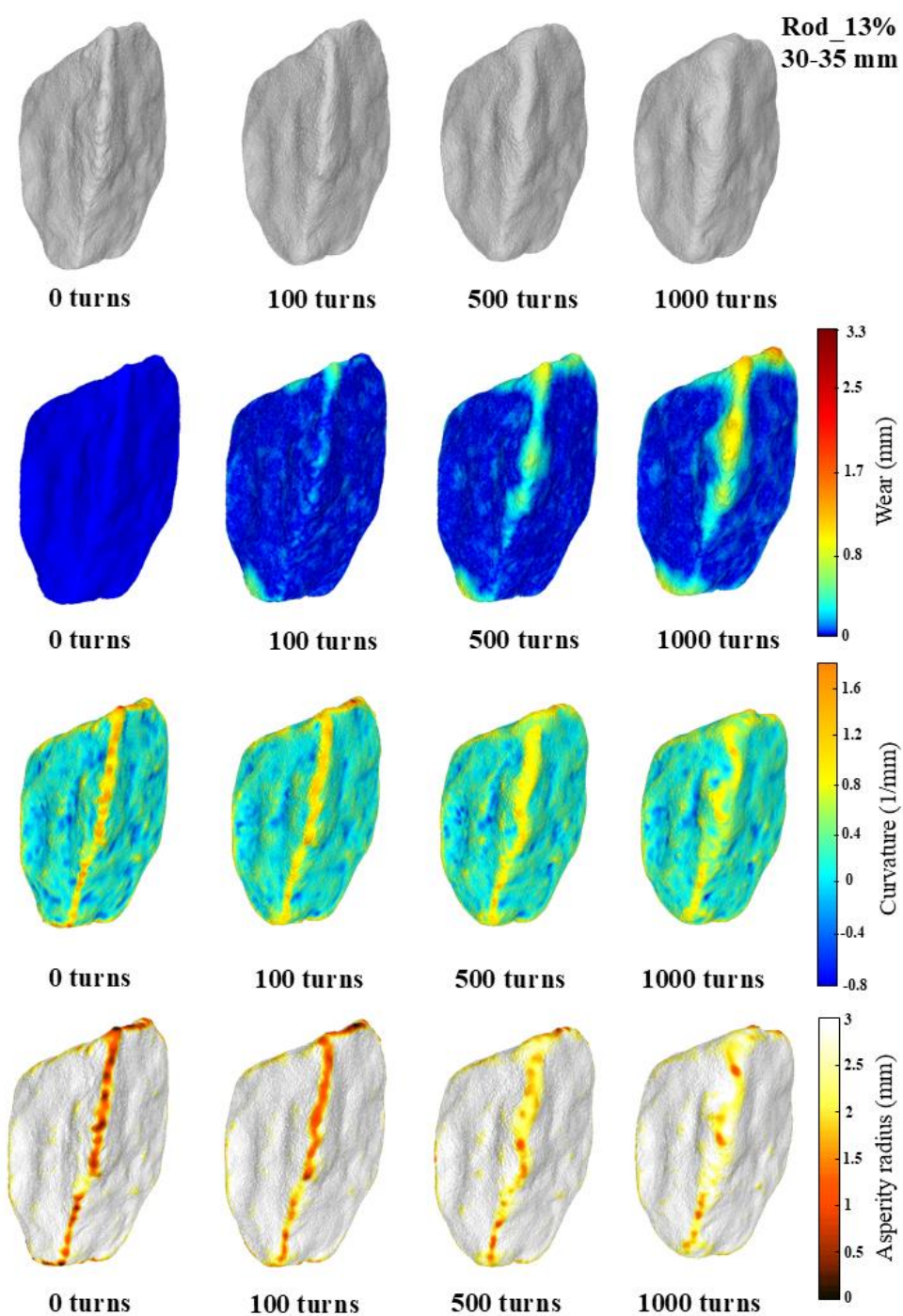
ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 40-45 มม. ผสมเศษยางแท่งร้อยละ 5



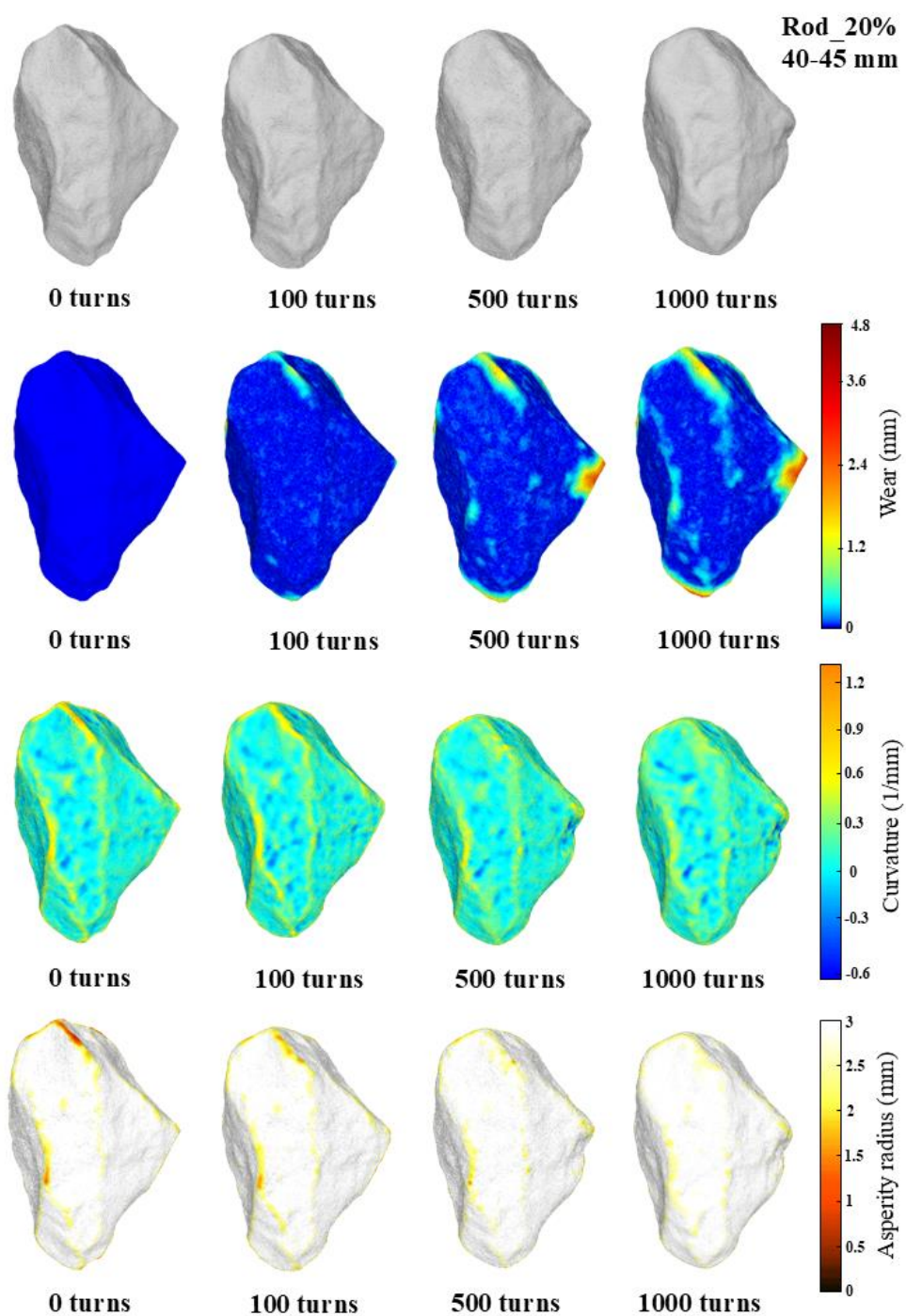
ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 30-35 มม. ผสมเศษยางแท่งร้อยละ 5



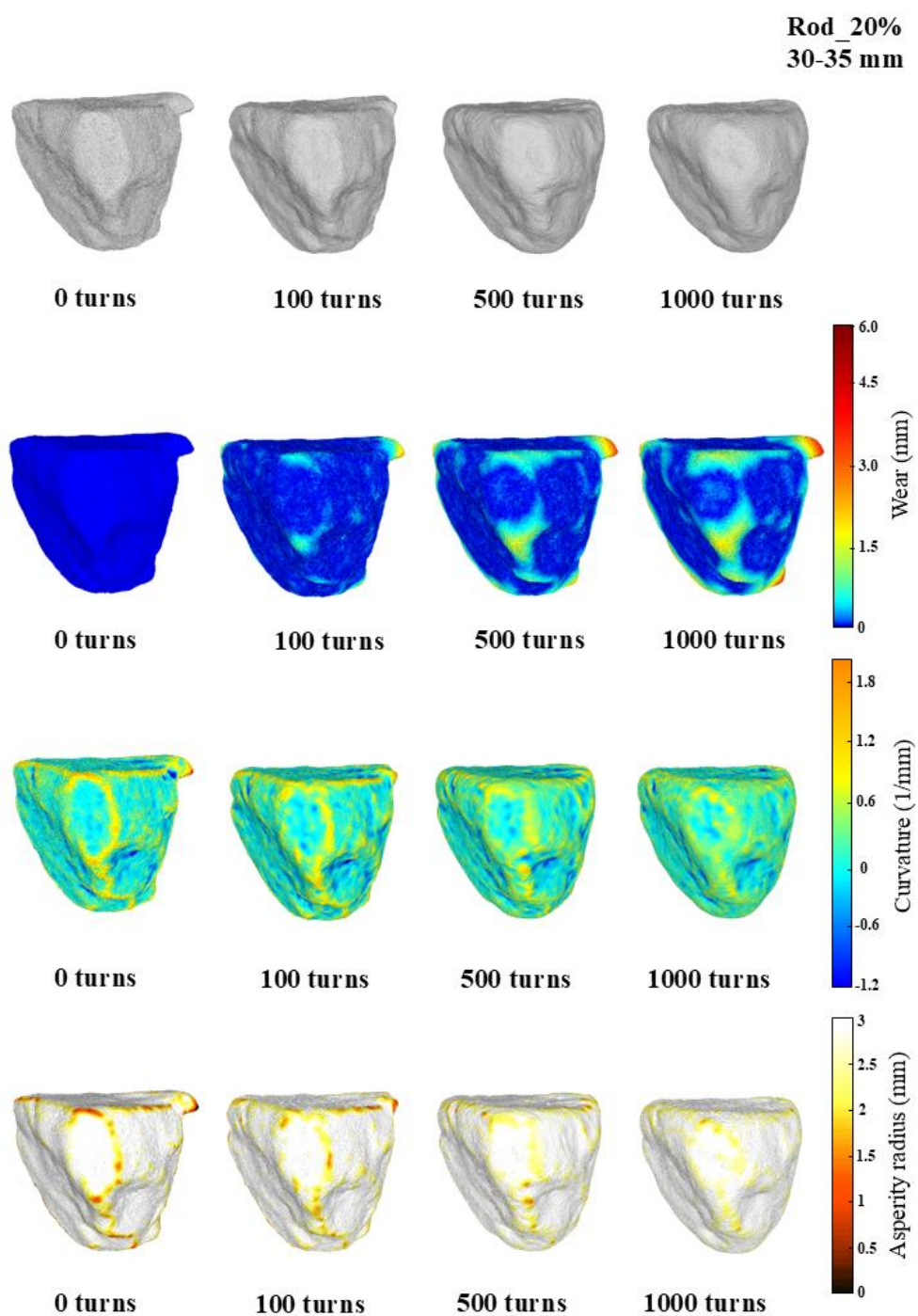
ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 40-45 มม. ผสมเศษยางแท่งร้อยละ 13



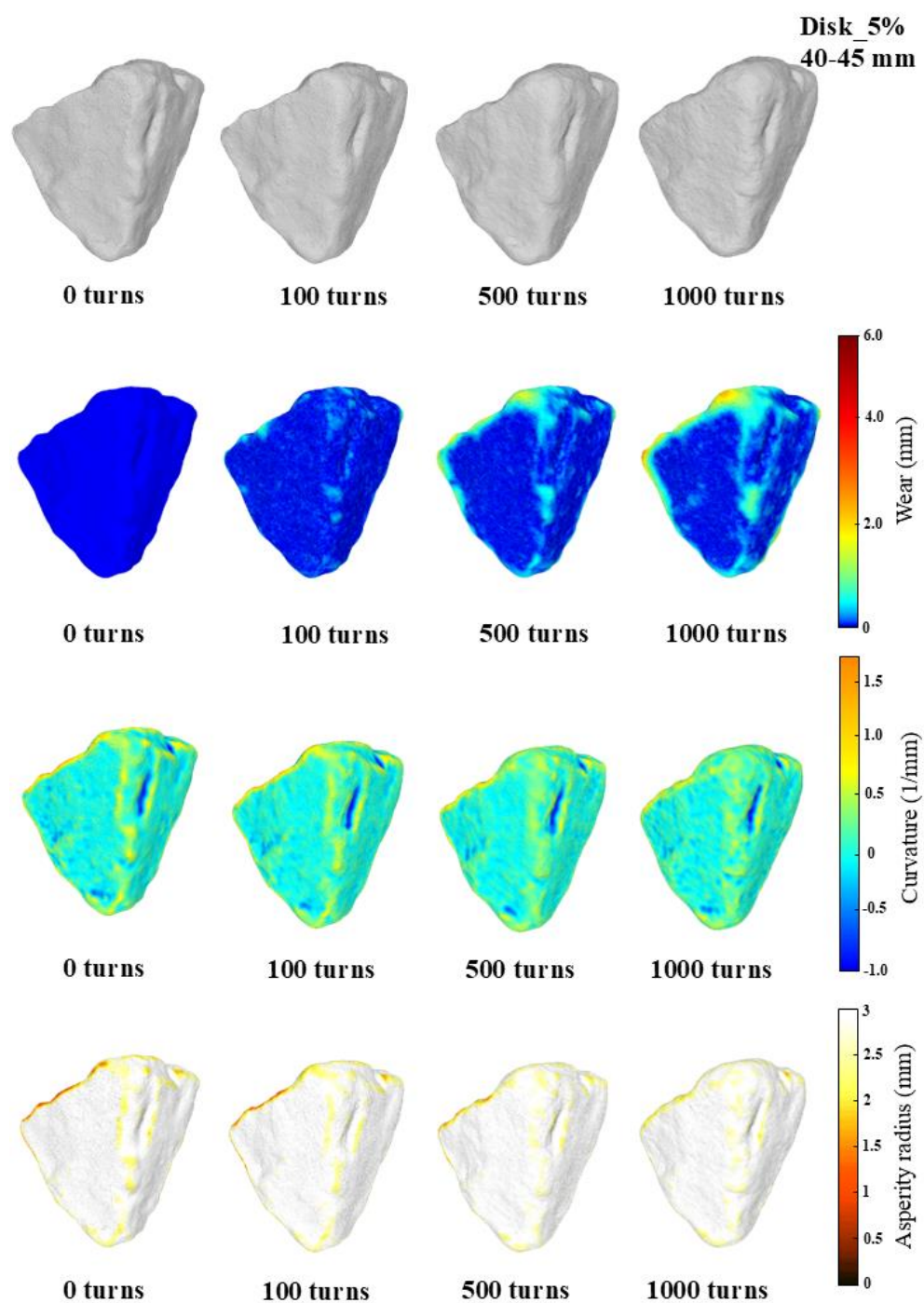
ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 30-35 มม. ผสมเศษยางแท่งร้อยละ 13



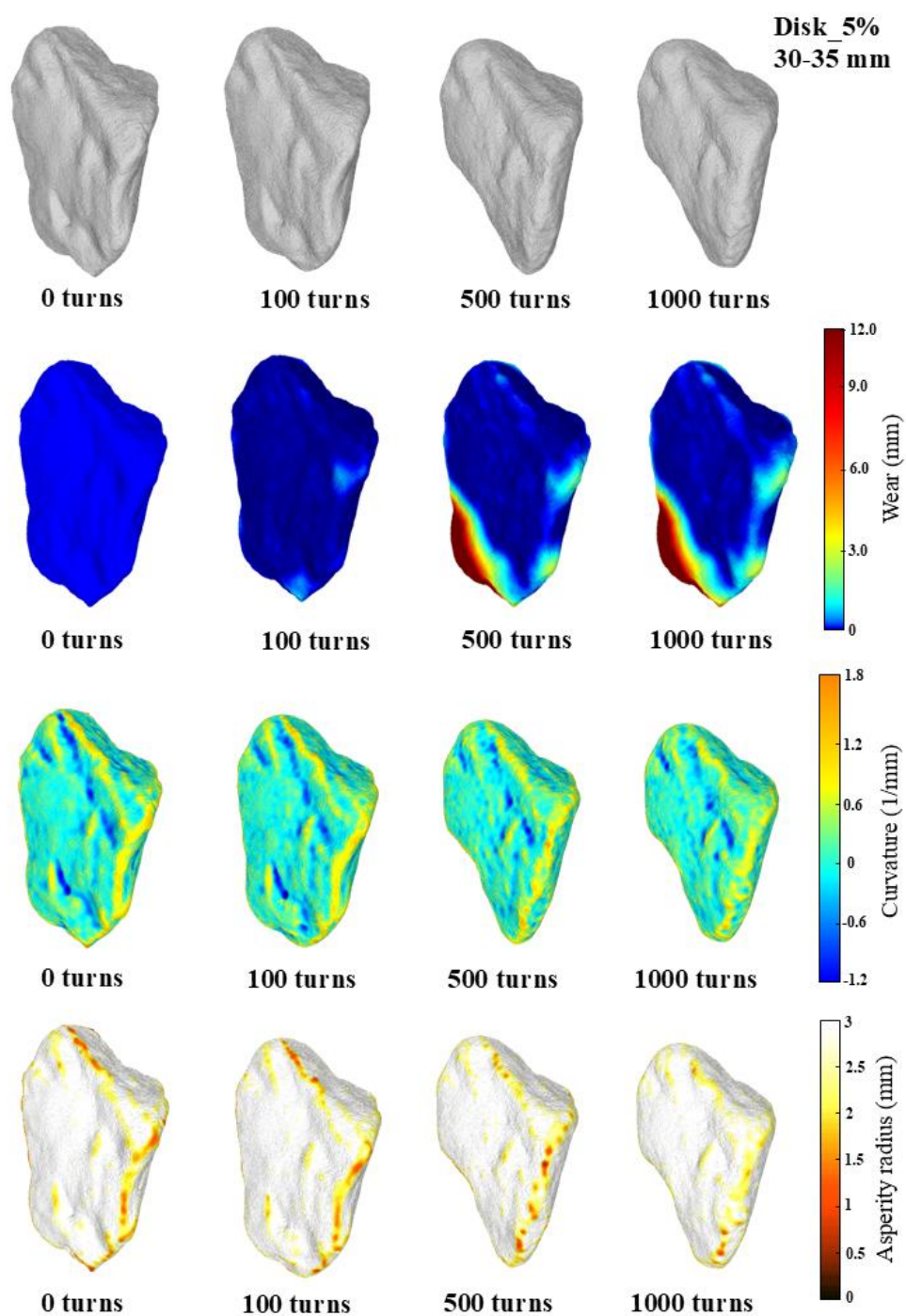
ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 40-45 มม. ผสมเศษยางแท่งร้อยละ 20



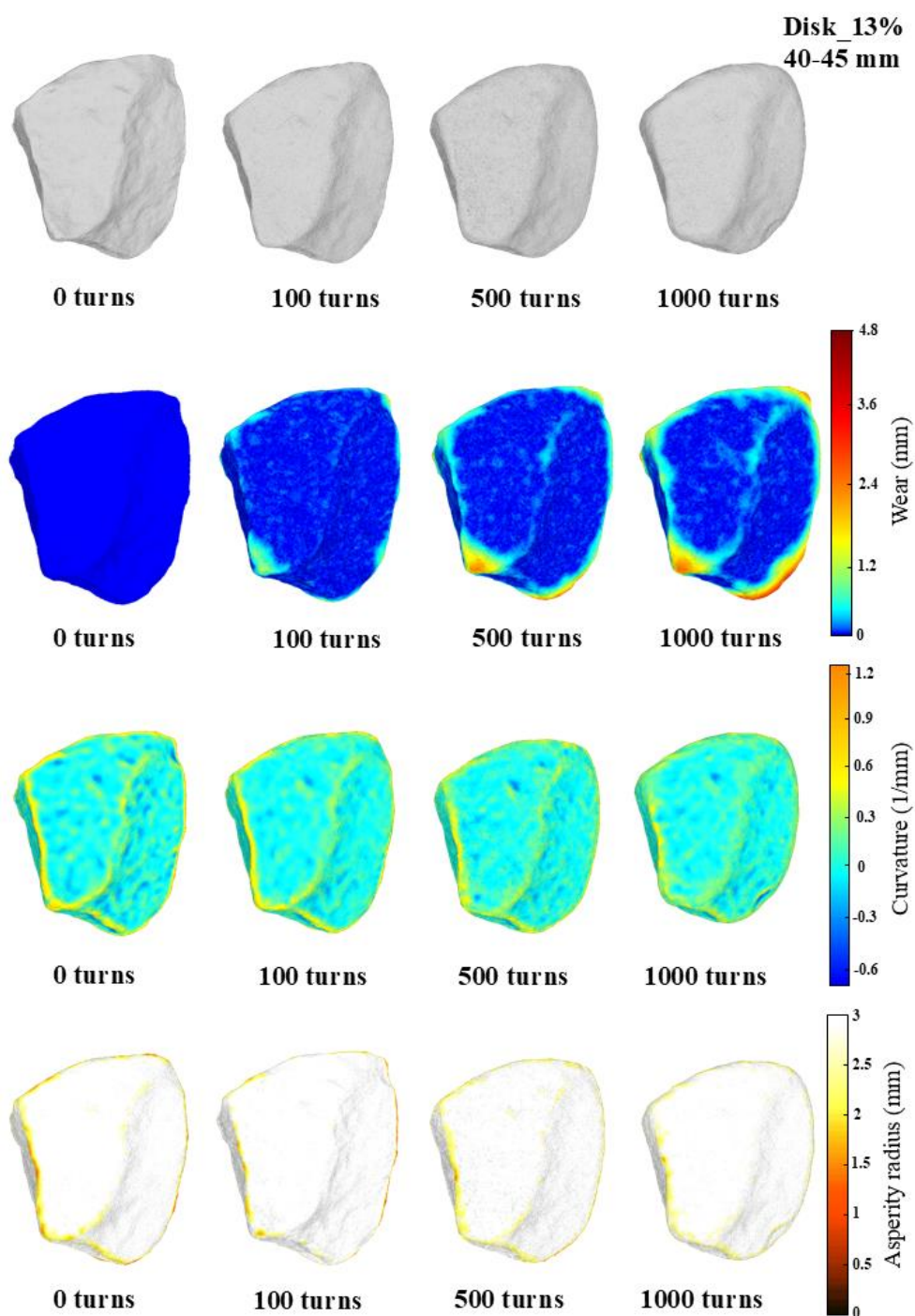
ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 40-45 มม. ผสมเศษยางแท่งร้อยละ 20



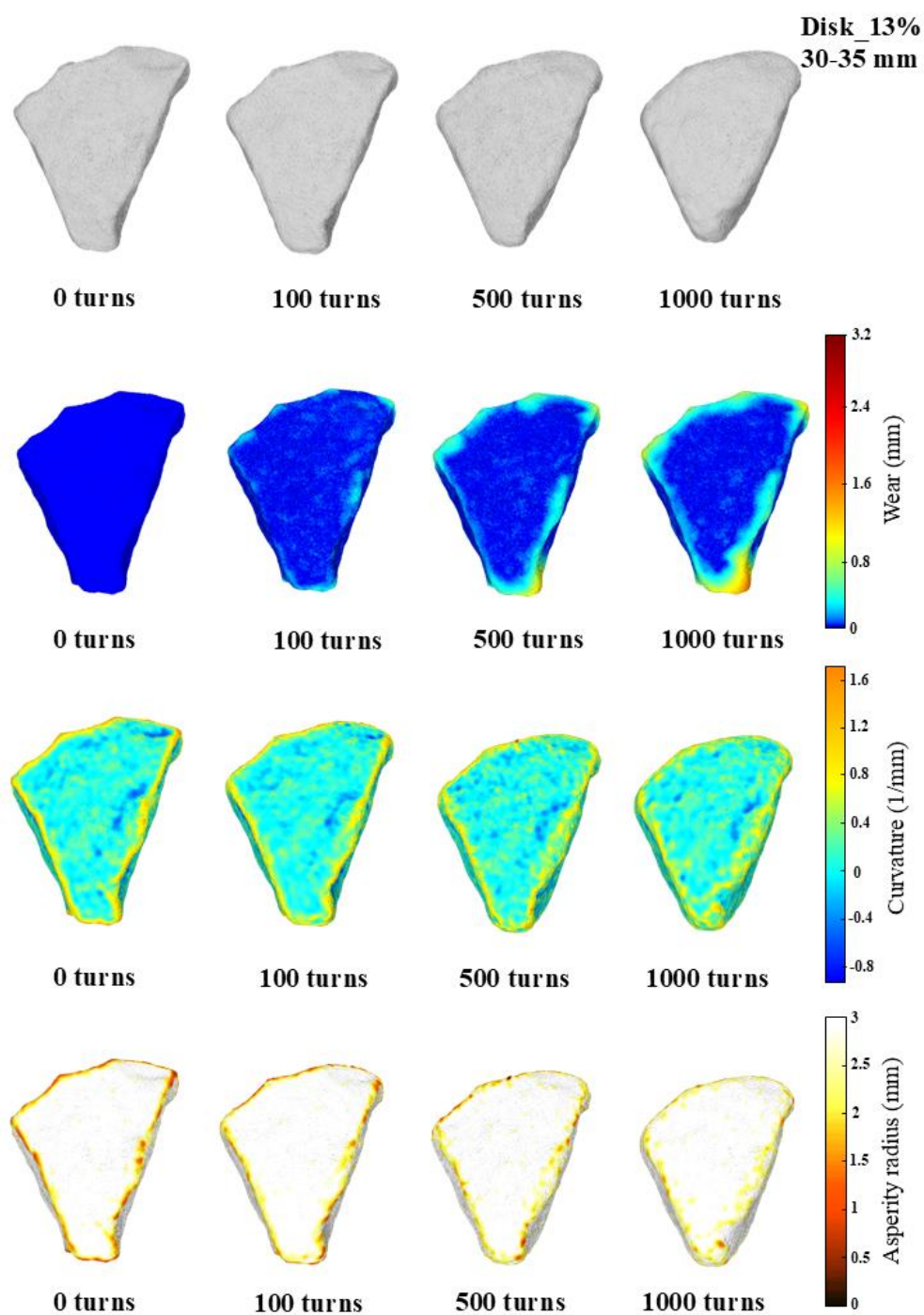
ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 40-45 มม. ผสมเศษยางแผ่นร้อยละ 5



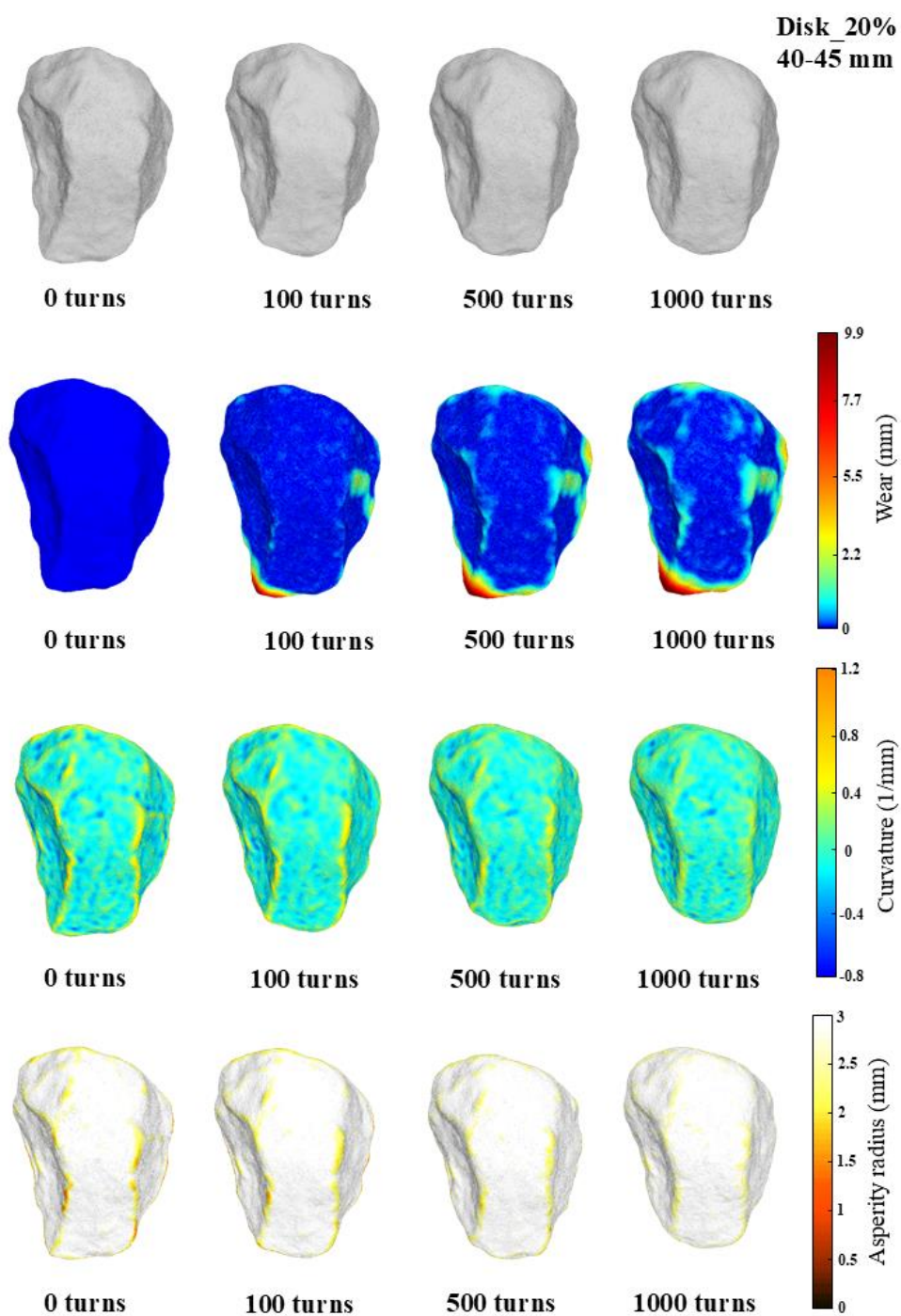
ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 30-35 มม. ผสมเศษยางแผ่นร้อยละ 5



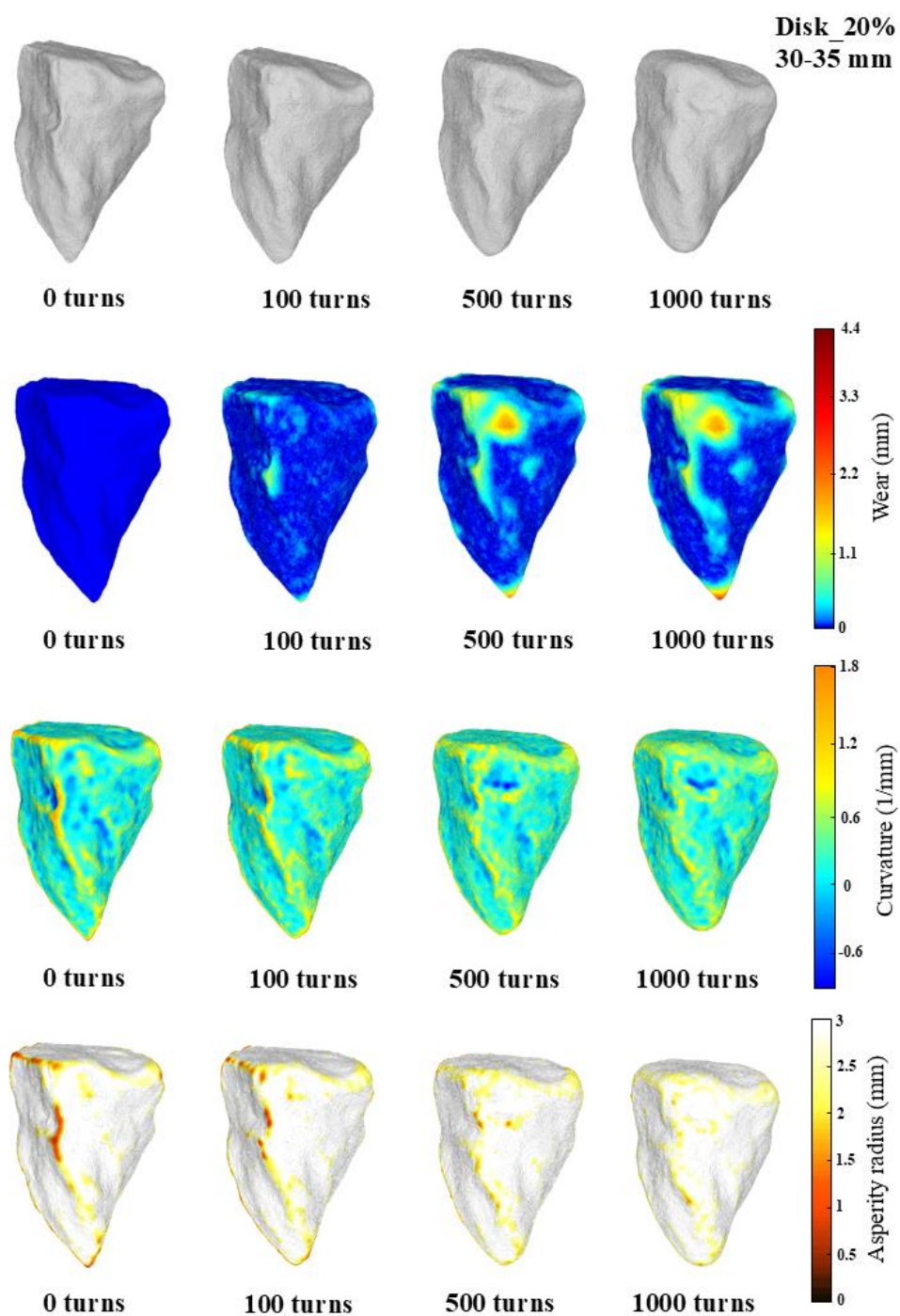
ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 40-45 มม. ผสมเศษยางแผ่นร้อยละ 13



ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 30-35 มม. ผสมเศษยางแผ่นร้อยละ 13



ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 40-45 มม. ผสมเศษยางแผ่นร้อยละ 20



ภาพ 3 มิติ แสดงค่าการสึกหรอ (Wear), รัศมีความโค้ง (Curvature) และรัศมีความขรุขระ (Asperity Radius) ของอนุภาคขนาด 30-35 มม. ผสมเศษยางแผ่นร้อยละ 20

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	ชัยณรงค์ ทรงศิริวงศ์
วัน เดือน ปี เกิด	15 เมษายน 2544
สถานที่เกิด	จังหวัดน่าน
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2563 วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา
ที่อยู่ปัจจุบัน	46 หมู่ 10 ตำบลน้ำพาง อำเภอแม่จริม จังหวัดน่าน 55170
ผลงานตีพิมพ์	ชัยณรงค์ ทรงศิริวงศ์, พุทธิกร ธรรมรักษ์, ปาณินี สุมิตรสวรรค์, กฤษดา ณะวงค์ และสุริยาวัธ ประอ้าย. (2567). การวิเคราะห์ความทนต่อการสึกหรอของหินโรยทางรถไฟจากสัณฐานวิทยา: การศึกษาเบื้องต้น โดยข้อมูลภาพแบบ 3 มิติ. ใน การประชุมวิชาการพะเยาวิจัย ครั้งที่ 13 (หน้า 841-848). พะเยา: กองวิจัย มหาวิทยาลัยพะเยา Songsiriwong, C., et al. (2025). Effect of tire-derived aggregate form on ballast abrasion using Los Angeles Abrasion test and 3D image analysis. International Conference on Geological and Civil Engineering, 12
รางวัลที่ได้รับ	-