

การศึกษาการประยุกต์ใช้แผ่นยางพารารมควันเป็นยางรองใต้หมอนในทางรถไฟที่มีหินโรยทางในการ  
ใช้งานระยะยาวเพื่อลดการสึกหรอและจำนวนรอบของการซ่อมบำรุงรักษา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF APPLYING PARA RIBBED SMOKE SHEET AS UNDER SLEEPER PAD WITH  
BALLAST TRACK RAILWAY IN LONG TERM TO REDUCE DEGRADATION AND FREQUENCY  
OF MAINTENANCE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering  
Department of Civil Engineering  
FACULTY OF ENGINEERING  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2019  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการประยุกต์ใช้แผ่นยางพาราม้วนเป็นยางรอง ใต้หมอนในทางรถไฟที่มีหินโรยทางในการใช้งานระยะยาว เพื่อลดการสึกหรอและจำนวนรอบของการซ่อมบำรุงรักษา
โดย	นายศุภกร รอดการทุกซ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์สิทธิ์ เฉลิมพงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม)

..... กรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.เกษม ชูจารุกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.อรรถพล เก่าประเสริฐ)

ศุภกร รอดการทุกข์ : การศึกษาการประยุกต์ใช้แผ่นยางพารารวมควันเป็นยางรองใต้  
หมอนในทางรถไฟที่มีหินโรยทางในการใช้งานระยะยาวเพื่อลดการสึกหรอและจำนวน  
รอบของการซ่อมบำรุงรักษา. ( A STUDY OF APPLYING PARA RIBBED SMOKE  
SHEET AS UNDER SLEEPER PAD WITH BALLAST TRACK RAILWAY IN LONG  
TERM TO REDUCE DEGRADATION AND FREQUENCY OF MAINTENANCE) อ.ที่  
ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม

เครือข่ายรถไฟส่วนใหญ่ในโลกเป็นทางรถไฟที่ใช้หินโรยทาง เมื่อปริมาณการจราจรสะสม  
มากขึ้นหินโรยทางจะเสื่อมสภาพมากขึ้นเนื่องจากมวลรวมแตก รอยขีดข่วนและการขัดสี ดังนั้น  
ความพยายามที่จะลดการสึกหรอของหินโรยทางเพื่อลดต้นทุนการบำรุงรักษาจึงเป็นหัวข้อสำคัญ  
สำหรับทางรถไฟและนักวิจัยจำนวนมาก ทางเลือกที่พิสูจน์แล้วว่าประสบความสำเร็จคือการใช้แผ่น  
รองใต้หมอนซึ่งเป็นวัสดุแบบยืดหยุ่น (USP) ระหว่างอนุภาคของหินโรยทางและหมอนรถไฟ วัสดุ  
โพลีเมอร์สังเคราะห์ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการรถไฟ USP หลายชนิดและสามารถลดการ  
เสื่อมสภาพของหินโรยทางและรวมถึงการลดการสั่นสะเทือนได้ จากการศึกษาล่าสุดพบว่ายาง  
ธรรมชาติสามารถทำหน้าที่คล้ายกับ USP ได้เช่นกัน เนื่องจากยางธรรมชาติมีอยู่มากในประเทศใน  
เอเชียตะวันออกเฉียงใต้จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจที่จะตรวจสอบประสิทธิภาพในเชิงลึกในฐานะ USP  
ในการศึกษานี้ USP ยางธรรมชาติได้รับการติดตั้งในการทดสอบภายใต้การจราจรที่หนาแน่นโดยใช้  
การทดสอบกล่องรับแรงกระทำภายใต้สภาพฐานรากที่แข็ง ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า USP ยาง  
ธรรมชาติสามารถลดปริมาณการแตกของอนุภาคหินโรยทางลงได้อย่างมากเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มี  
USP

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6070326821 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Ballast degradation; Natural rubber; Cyclic load; Maintenance

Supakorn Rodkrantuk : A STUDY OF APPLYING PARA RIBBED SMOKE SHEET AS UNDER SLEEPER PAD WITH BALLAST TRACK RAILWAY IN LONG TERM TO REDUCE DEGRADATION AND FREQUENCY OF MAINTENANCE. Advisor: Assoc. Prof. Boonchai Sangpetngam, Ph.D.

Most railway networks in the world are built with a ballasted track structure. As traffic tonnage accumulates, ballast rocks will get degraded increasingly due to aggregate breakage and abrasion. So, attempts to reduce ballast degradation to lower maintenance cost have been a major topic for many railways and researchers. A successfully proven alternative is to apply elastic under-sleeper pads (USP) between sleeper and ballast particles. Synthetic polymeric materials have been used in many USP suppliers and able to decrease ballast deterioration and track vibration. A recent study has found that natural rubber can serve a similar function as USP as well. Since natural para rubber is abundant in South East Asia countries, it is interesting to investigate deeper on its performance as the USP. In this study, natural rubber USP is vigorously simulated under heavy traffic loads using a cyclic box test under rigid foundation condition. The results indicate that natural rubber USP can reduce amount of ballast particle breakage significantly comparing to the case without USP.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม อย่างสูง ที่เมตตาเป็นที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดูแลการทำงานวิจัย ให้คำแนะนำ คำปรึกษาข้อคิดเห็นต่างๆในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นรวมทั้งชี้แนะแนวทาง แรงกระตุ้นในการทำงาน ตลอดจนให้กำลังใจในการทำงานพร้อมทั้งช่วยตรวจและแก้ไขวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ใจอย่างดี จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ และขอขอบพระคุณต่อคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์สิทธิ์ เฉลิมพงศ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.เกษม ชูจารุกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.อรรถพล เก่าประเสริฐ ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกมหาวิทยาลัยเป็นอย่างสูงที่ซึ่งกรรมการทุกท่านได้ให้คำแนะนำและแง่คิดต่างๆอันเป็นประโยชน์ที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ในการทดสอบ การเตรียมความพร้อม และความปลอดภัยในการทำวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์นั้น ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อคุณสมพงษ์ ขำแจ้ง เจ้าหน้าที่จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ช่วยเหลือ ดูแล อำนวยความสะดวกในการวิจัยและทดสอบได้อย่างราบรื่น ปลอดภัย และสะดวกยิ่งขึ้น รวมถึงขอขอบพระคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุน อุปกรณ์ สถานที่ให้แก่ผู้วิจัยอย่างดีต่อการทำวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยมีความสำนึกในพระคุณของคณาจารย์ทุกท่าน คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้วิจัย และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อ บิดามารดา ครอบครัว และเพื่อนๆ ของผู้วิจัยที่ได้สนับสนุนเอาใจใส่ดูแลและให้ความอนุเคราะห์แก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษาลุล่วงไปได้ด้วยดี

ศุภกร รอดการทุกซ์

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	5
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	5
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.5 หลักการและลักษณะของโครงการ.....	6
บทที่ 2.....	7
แนวคิด ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 หินโรยทาง.....	7
2.1.1 คำนิยาม.....	7
2.1.2 บทบาทของหินโรยทางบนรางรถไฟ.....	7
2.1.3 ที่มาของหินโรยทาง.....	8
2.2 ผลของการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง.....	9

2.2.1 การเกิดตะกรัน (Fouling) .....	9
2.2.2 การระบายน้ำ .....	10
2.2.3 การเสียรูปทรง.....	11
2.2.4 การเคลื่อนตัวด้านข้างรางรถไฟ .....	14
2.2.5 ค่าโมดูลัสของทางรถไฟ (Track modulus).....	15
2.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง.....	16
2.4 วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับศึกษาการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง .....	17
2.5 การลดความเสื่อมสภาพของหินโรยทาง .....	27
2.5.1 ทางเลือกในการลดความเสื่อมสภาพของหินโรยทาง .....	27
2.5.1.1 อนุภาคของยางบด .....	28
2.5.1.2 Ballast mat.....	29
2.5.1.3 แผ่นรองใต้หมอนรถไฟ (Under sleeper pads) .....	29
2.5.2 ปัจจัยอิทธิพลที่ทำให้เกิดต้นทุนของทางรถไฟ .....	31
2.5.2.1 โมดูลัสของทางรถไฟ (Track modulus).....	31
2.5.2.2 วงจรต้นทุน .....	32
บทที่ 3 .....	33
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	33
3.1. การกำหนดปัญหาและการวางแผนการออกแบบการวิจัย.....	34
3.2. ดำเนินการทดสอบ .....	36
● ระยะที่1.การจัดเตรียมวัสดุ อุปกรณ์.....	36
3.2.1) คุณสมบัติพื้นฐานและการจัดเตรียมหินโรยทาง .....	36
3.2.2) คุณสมบัติพื้นฐานและการจัดเตรียมแผ่นยางพารา.....	41
3.2.3) คุณสมบัติพื้นฐานและการจัดเตรียมหมอนรถไฟจำลอง.....	44
● ระยะที่2. การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบและการตั้งค่าการทดสอบ .....	45

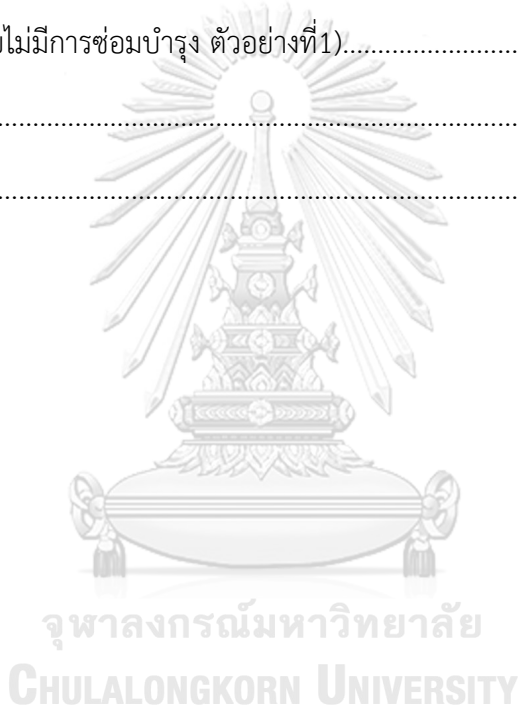


●	ระยะที่3. การวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นภายในกล่องทดสอบ .....	47
	3.2.1.1 คู่มือการศึกษาหินโรยทางและแรงดันของหมอนรถไฟจากสมาคมวิศวกรรม รถไฟแห่งสหรัฐอเมริกาและการบำรุงรักษา.....	47
	3.2.1.2 การวิเคราะห์ด้วย ANSYS .....	50
	3.2.1.3 การวิเคราะห์ด้วย GEOTRACK.....	54
	3.2.1.3 สรุปการกำหนดหน่วยแรงที่กระทำต่อหมอนรถไฟที่ใช้ .....	59
●	ระยะที่4. การทดสอบนําร่อง .....	60
	วิเคราะห์การสึกหรอของหินโรยทาง .....	61
3.3.	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ .....	66
	3.3.1 เครื่องมือหานํ้าหนักของหินโรยทาง .....	66
	3.3.2 เครื่องมือการทดสอบแบบแรงกระทำซ้ำ .....	66
	3.3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบวิเคราะห์ปริมาตรของแผ่นยางรองใต้หมอน .....	69
3.4	กรณีศึกษาของการทดลอง .....	72
3.5	ขั้นตอนของการทดสอบและผลคาดหวังที่จะได้รับ .....	73
3.6	วิธีการวิเคราะห์หาปริมาตรการยุบตัวของแผ่นยางพารา .....	75
3.7	การวิเคราะห์ตัวแปรและการตั้งสมมติฐาน .....	76
	3.6.1.2 ตัวแปรตาม.....	76
	3.6.1.3 ตัวแปรควบคุม .....	76
บทที่4.....		77
4.1	การสึกหรอของหินโรยทาง .....	77
	4.1.1 ลักษณะการแตกแบบละเอียดและการแตกแบบหยาบ .....	77
	4.1.2 ปริมาณการแตกหักของหินโรยทางในแต่ละโซนภายในกล่องทดสอบหินโรยทาง.....	82
	4.1.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ .....	119

4.1.3.1	กรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา20ตันจำนวนรอบ แรงกระทำซ้ำสะสมที่3ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง เปรียบเทียบกับ กรณีไม่ใช้ แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา50ตันจำนวนรอบแรง กระทำซ้ำสะสมที่1ล้านรอบ .....	119
4.1.3.2	กรณีใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSPs) ที่น้ำหนักกดเพลลา20ตันจำนวนรอบ แรงกระทำซ้ำสะสมที่3ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง เปรียบเทียบกับ กรณีไม่ใช้ แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSPs) ที่น้ำหนักกดเพลลา50ตันจำนวนรอบแรง กระทำซ้ำสะสมที่1ล้านรอบ .....	122
4.1.3.3	กรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) เปรียบเทียบกับ กรณีใช้แผ่น ยางพารารมควัน (ParaUSPs) ที่น้ำหนักกดเพลลา20ตันจำนวนรอบแรงกระทำ ซ้ำสะสมที่3ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง .....	124
4.1.3.4	กรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) เปรียบเทียบกับ กรณีใช้แผ่น ยางพารารมควัน (ParaUSPs) ที่น้ำหนักกดเพลลา50ตันจำนวนรอบแรงกระทำ ซ้ำสะสมที่3ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุงและไม่มีมีการซ่อมบำรุง .....	125
4.2	อนุภาคหินโรยทางที่แตกหัก.....	127
4.2.1	อนุภาคหินโรยทางที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละขนาด.....	127
4.2.1.1	กรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 20 ตัน จำนวน รอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่3ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่1 .....	127
4.2.1.2	กรณีใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 20 ตัน จำนวน รอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่3ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่1 .....	128
4.2.1.3	กรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน จำนวน รอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่3ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่1 และ ตัวอย่างที่2.....	130
4.2.1.4	กรณีใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน จำนวน รอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่3ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่1 และ ตัวอย่างที่2.....	133
4.2.2	วิเคราะห์ความแตกต่างของการแตกหักระหว่างตัวอย่าง .....	137

4.2.2.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ .....	147
กรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) เปรียบเทียบกับ กรณีใช้แผ่น ยางพารารมควัน (ParaUSPs) โดยมีจำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสม ที่ 3 ล้านรอบเท่ากันซึ่งช่วยลดอัตราการสึกหรอของอนุภาคหินโรย ทางตามน้ำหนักผ่านทางสะสม .....	147
กรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) เปรียบเทียบกับ กรณีใช้แผ่น ยางพารารมควัน (ParaUSPs) โดยมีจำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสม ที่ 3 ล้านรอบเท่ากันซึ่งช่วยลดปริมาณการสึกหรอแบบoffset เมื่อ เทียบกับการไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) .....	150
4.3 การหลุดตัวถาวรของหินโรยทาง .....	154
4.4 การเสียรูปแบบยึดหยุ่นและโมดูลัสของปฏิกิริยากล่องทดสอบหินโรยทาง (kB).....	161
4.5 การวิเคราะห์หาค่าปริมาตรของทรายOttawaของแผ่นยางพารารมควันเมื่อมีการรับแรง กระทำซ้ำ.....	168
4.6 สรุปการอภิปราย .....	170
บทที่ 5.....	172
5.1 สรุปผล.....	172
5.2 ข้อจำกัดของการวิจัย.....	173
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติม .....	173
ภาคผนวก.....	174
(ตัวอย่างการจดบันทึกการชั่งน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางในแต่ละช่วงของการทดสอบ) .....	174
(ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลของการทดสอบ).....	175
(ปริมาณของทรายที่ใช้ในการทดสอบแทนที่ในกล่องทดสอบหินโรยทางกรณีใช้แผ่นยางพารา รุมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 20 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้าน รอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 1).....	177

(ปริมาณของทรายที่ใช้ในการทดสอบแทนที่ในกล่องทดสอบหินโรยทางกรณีใช้แผ่นยางพารา รมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้าน รอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 1).....	179
(ปริมาณของทรายที่ใช้ในการทดสอบแทนที่ในกล่องทดสอบหินโรยทางกรณีใช้แผ่นยางพารา รมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้าน รอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 2).....	181
(ปริมาณของทรายที่ใช้ในการทดสอบแทนที่ในกล่องทดสอบหินโรยทางกรณีใช้แผ่นยางพารา รมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้าน รอบโดยไม่มีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 1).....	183
บรรณานุกรม.....	185
ประวัติผู้เขียน.....	190



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ผลสรุปการพัฒนากล่องหินโรยทางและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย .....	22
ตารางที่ 2 การกำหนดชั้นคุณภาพและลักษณะทางกายภาพของยางแผ่นรมควัน .....	42
ตารางที่ 3 ตัวแปรความน่าเชื่อถือ .....	57
ตารางที่ 4 ตัวแปรสภาพทางรถไฟ .....	57
ตารางที่ 5 จำนวนของอนุภาคหินโรยทางที่เกิดการสึกหรือจากการทดสอบ .....	60
ตารางที่ 6 ปริมาณการแตกหักของหินโรยทางในแต่ละโซนภายในกล่องทดสอบหินโรยทาง.....	61
ตารางที่ 7 สรุปปริมาณการแตกหักในโซนทั้งส่วนบนและส่วนล่างของภายในกล่องทดสอบหินโรยทาง .....	65
ตารางที่ 8 วงจรของการเก็บรวบรวมข้อมูล.....	69
ตารางที่ 9 สรุปรูปแบบการทดสอบและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ .....	72
ตารางที่ 10 จำนวนอนุภาคของหินโรยทางที่พบการสึกหรือในแต่ละกล่องทดสอบหินโรยทาง .....	80
ตารางที่ 11 สรุปผลของอัตราการแตกของอนุภาคหินโรยทางระหว่างโซนด้านบนและโซนด้านล่าง .....	118
ตารางที่ 12 น้ำหนักที่สูญเสียของอนุภาคหินโรยทางภายในกล่องหลังจากการทดสอบ.....	140
ตารางที่ 13 อนุภาคหินโรยทางที่สึกหรือหลังจากการทดสอบของกรณีไม่ใช้แผ่นยางพารา (NoUSP) น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน ตัวอย่างที่ 1.....	141
ตารางที่ 14 อนุภาคหินโรยทางที่สึกหรือหลังจากการทดสอบของกรณีไม่ใช้แผ่นยางพารา (NoUSP) น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน ตัวอย่างที่ 2.....	142
ตารางที่ 15 อนุภาคหินโรยทางที่สึกหรือหลังจากการทดสอบของกรณีใช้แผ่นยางพารา (ParaUSP) น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน ตัวอย่างที่ 1.....	143
ตารางที่ 16 อนุภาคหินโรยทางที่สึกหรือหลังจากการทดสอบของกรณีใช้แผ่นยางพารา (ParaUSP) น้ำหนักกดเพลลา 20 ตัน ตัวอย่างที่ 1.....	144

ตารางที่ 17 อนุภาคหินโรยทางที่สึกหรอหลังจากการทดสอบของกรณีใช้แผ่นยางพารา (ParaUSP) น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน โดยไม่มีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 1.....	145
ตารางที่ 18 อนุภาคหินโรยทางที่สึกหรอหลังจากการทดสอบของกรณีใช้แผ่นยางพารา (ParaUSP) น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน ตัวอย่างที่ 2.....	146
ตารางที่ 19 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ.....	147
ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุระหว่าง กรณีใช้และไม่ใช้แผ่นยางพารา .....	148
ตารางที่ 21 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ.....	149
ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุระหว่าง กรณีใช้และไม่ใช้แผ่นยางพารา .....	151
ตารางที่ 23 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ.....	152



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 การวางแผนการทดสอบ .....	6
รูปที่ 2 การเกิดตะกรันของหินโรยทาง (Indraratna et al., 2011).....	10
รูปที่ 3 การซังของน้ำในชั้นหินโรยทาง (Indraratna et al., 2011).....	11
รูปที่ 4 รูปทรงที่ต่างไปจากเดิมบนรางรถไฟที่มีสาเหตุมาจากการเสีรูปทรงของหินโรยทาง (Indraratna et al., 2011) .....	12
รูปที่ 5 การรักษารางโดยการบดอัด (Tamping) (Selig & Waters, 1994).....	12
รูปที่ 6 การรักษารางโดยการเป่าหิน (stone-blowing) (Selig & Waters, 1994) .....	13
รูปที่ 7 การโค้งงอของรางรถไฟเพราะการขาดการจำกัดขอบเขตด้านข้าง (Indraratna et al., 2011) .....	14
รูปที่ 8 อุปกรณ์ทดสอบการบด (อัด ชน กระแทก) (Koohmishi & Palassi, 2018) .....	18
รูปที่ 9 อุปกรณ์ทดสอบแรงอัดสามทิศทางขนาดใหญ่ (Large-Scale Cyclic Triaxial Test Equipment) เครื่องทดสอบการรับน้ำหนัก (Loading Machine) และโปรแกรมแปลงผลข้อมูล (Data Acquisition System) (Ebrahimi, Tinjum, & Edil, 2010).....	19
รูปที่ 10 การทดสอบกล่องหินโรยทาง (Selig & Waters, 1994).....	20
รูปที่ 11 ผลของการรับน้ำหนักต่อการแตกของหินโรยทาง (Selig & Waters, 1994).....	21
รูปที่ 12 ผลจากการรักษาการแตกของหินโรยทาง (Selig & Waters, 1994).....	21
รูปที่ 13 ดัชนีการแตกหินโรยทาง (Indraratna et al., 2005).....	26
รูปที่ 14 หินโรยทางและการผสมวัสดุยางบดในกล่องอุปกรณ์ (M. Sol-Sánchez et al., 2015)...	28
รูปที่ 15 แผ่นรองใต้หมอนรถไฟ (Kaewunruen & Remennikov, 2015).....	30
รูปที่ 16 ลักษณะที่ปรากฏ (Visual appearance) ของหินโรยทาง.....	37
รูปที่ 17 แสดงการจัดคุณภาพ (ชั้น ระดับ เกรด) หินโรยทางที่ใช้ในการศึกษานี้พร้อมกับข้อมูลจำเพาะ SRT ที่ใช้เปรียบเทียบ .....	38

รูปที่ 18 การล้างทำความสะอาดหินโรยทาง .....	39
รูปที่ 19 การอบหินโรยทางในเตาอบ .....	39
รูปที่ 20 การคละขนาดของหินโรยทางที่ใช้ในการศึกษา.....	40
รูปที่ 21 เขตโซนของหินโรยทางที่ได้ทำเครื่องหมายภายในกล่องทดสอบหินโรยทาง.....	40
รูปที่ 22 การทำเครื่องหมายเพื่อแบ่งโซนของหินโรยทาง.....	41
รูปที่ 23 การชั่งน้ำหนักหินโรยทางด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก .....	41
รูปที่ 24 ภาพของยางพาราแผ่นรมควันชั้น 1ที่ใช้เป็นแผ่นรองใต้หมอนรถไฟ.....	44
รูปที่ 25 โครงของไม้แบบของหมอนรถไฟจำลอง .....	45
รูปที่ 26 หมอนรถไฟจำลอง .....	45
รูปที่ 27 เครื่องตอกเสาเข็มแบบสัน.....	46
รูปที่ 28 การแสดงภาพลักษณะและการวางหินโรยทางลงในกล่องทดสอบ.....	46
รูปที่ 29 ร้อยละของโพลีเมอร์ทุกกับระยะห่างของหมอนรถไฟเป็นปัจจัยการกระจาย (AREMA, 2011).....	49
รูปที่ 30 ภาคตัดขวางทั่วไปของทางรถไฟที่ปูหินโรยทางแล้ว.....	54
รูปที่ 31 การประเมินแรงเค้นที่เกิดขึ้นบนส่วนของหมอนรถไฟโดยการวิเคราะห์ Geotrack.....	56
รูปที่ 32 อ้างอิงจาก (Somkith,2018) เเปอร์เซ็นต์ของลักษณะการแตกหักของอนุภาคหินโรยทางทั้งแบบหยาบและแบบละเอียด.....	60
รูปที่ 33 อ้างอิงจาก (Somkith,2018) ปริมาณหินโรยทางที่แตกหักในแต่ละโซนที่แรงกระทำ 1 ล้านรอบ.....	61
รูปที่ 34 เเปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยรวมที่สูญเสียในโซน L .....	62
รูปที่ 35 เเปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยรวมที่สูญเสียในโซน M .....	63
รูปที่ 36 เเปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยรวมที่สูญเสียในโซน R .....	64
รูปที่ 37 เครื่องชั่งน้ำหนักสำหรับหินโรยทาง .....	66
รูปที่ 38 มุมมองของอุปกรณ์กล่องทดสอบหินโรยทาง.....	67
รูปที่ 39 ระบบ SERVOPULSER และการจำลองกระบวนการ .....	67



รูปที่ 40	ลักษณะของรูปแบบการรับน้ำหน้าสำหรับกล่องทดสอบหินโรยทาง	68
รูปที่ 41	กรวยสแตนเลสพับที่ติดตั้งวาล์วใช้ในการบรรจุทรายทดสอบ	69
รูปที่ 42	ร่างของล้อเลื่อน	70
รูปที่ 43	ตัวสไลด์และตัวค้ำยันกรวยตัดที่บรรจุทรายทดสอบ	70
รูปที่ 44	ขาตั้งประคองกรวยตัดที่บรรจุทรายใช้ในการชั่งน้ำหนักทรายบนตราชั่ง	71
รูปที่ 45	รถรางล้อเลื่อนใช้ในการทดสอบหาปริมาณของทรายทดสอบ	71
รูปที่ 46	กระบวนการของการทดสอบ	74
รูปที่ 47	หมอนรถไฟจำลองที่ถูกติดตั้งด้วยกรอบอะคริลิกที่บรรจุด้วยทรายเพื่อหาปริมาตร	75
รูปที่ 48	การสีกรวยของอนุภาคหินโรยทาง	79
รูปที่ 49	รูปแบบและปริมาณการแตกหักของหินโรยทางที่ตำแหน่งต่างๆภายในกล่องทดสอบหินโรยทาง	116
รูปที่ 50	เปรียบเทียบปริมาณการแตกหักของกรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน(NoUSP)ในกรณีของน้ำหนักกดเพลลาที่ 20 ตัน กับ 50 ตัน โดยมีจัดเรียงหินใหม่ในกรณี20ตัน จำนวน2ครั้ง	121
รูปที่ 51	เปรียบเทียบปริมาณการแตกหักของกรณีใช้แผ่นยางพารารมควัน(ParaUSP)ในกรณีของน้ำหนักกดเพลลาที่ 20 ตัน กับ 50 ตัน โดยมีจัดเรียงหินใหม่ในกรณี20ตัน จำนวน2ครั้ง	123
รูปที่ 52	เปรียบเทียบปริมาณการแตกหักของกรณีใช้และไม่ใช้แผ่นยางพารารมควันในกรณีของน้ำหนักกดเพลลาที่ 20 ตัน โดยมีจัดเรียงหินใหม่	124
รูปที่ 53	เปรียบเทียบปริมาณการแตกหักของกรณีใช้และไม่ใช้แผ่นยางพารารมควันในกรณีของน้ำหนักกดเพลลาที่ 50 ตัน โดยมีกรณีที่มีและไม่มีการจัดเรียงหินใหม่	126
รูปที่ 54	อนุภาคหินโรยทางที่แตกหักในลักษณะแบบหยาบและแบบละเอียดของกรณีไม่ใช้แผ่นยางพารา (NoUSP) น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน ตัวอย่างที่ 1	141
รูปที่ 55	อนุภาคหินโรยทางที่แตกหักในลักษณะแบบหยาบและแบบละเอียดของกรณีไม่ใช้แผ่นยางพารา (NoUSP) น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน ตัวอย่างที่ 2	142
รูปที่ 56	อนุภาคหินโรยทางที่แตกหักในลักษณะแบบหยาบและแบบละเอียดของกรณีใช้แผ่นยางพารา (ParaUSP) น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน ตัวอย่างที่ 1	143

รูปที่ 57 อนุภาคหินโรยทางที่แตกหักในลักษณะแบบหยาบและแบบละเอียดของกรณีใช้แผ่น ยางพารา (ParaUSP) น้ำหนักกดเพลลา 20 ตัน ตัวอย่างที่ 1 .....	144
รูปที่ 58 อนุภาคหินโรยทางที่แตกหักในลักษณะแบบหยาบและแบบละเอียดของกรณีใช้แผ่น ยางพารา (ParaUSP) น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน ตัวอย่างที่ 1 โดยไม่มีการจัดเรียงอนุภาคหินโรยทาง .....	145
รูปที่ 59 อนุภาคหินโรยทางที่แตกหักในลักษณะแบบหยาบและแบบละเอียดของกรณีใช้แผ่น ยางพารา (ParaUSP) น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน ตัวอย่างที่ 2 .....	146
รูปที่ 60 การทรุดตัวถาวรในแนวตั้งต่อจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำในแต่ละเงื่อนไขของกล่อง ทดสอบหินโรยทาง .....	155
รูปที่ 61 อัตราการทรุดตัวถาวรของแต่ละกรณีจากการทดสอบที่แตกต่างกัน .....	160
รูปที่ 62 การเสียรูปแบบยืดหยุ่นของกล่องทดสอบหินโรยทางในแต่ละกรณีต่อจำนวนรอบของแรง กระทำซ้ำ .....	162
รูปที่ 63 โมดูลัสของปฏิกิริยากกล่องทดสอบหินโรยทางต่อจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำ.....	165

## บทนำ

### บทที่ 1

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

หลายประเทศทั่วโลกใช้การขนส่งทางรถไฟในรูปแบบการขนส่งผู้โดยสารและขนส่งสินค้าที่มีความสำคัญ เนื่องจากการเติบโตอย่างรวดเร็วทางเศรษฐกิจและจำนวนประชากร อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของความแออัดในการขนส่งทางบกและความต้องการเชื้อเพลิงที่เพิ่มสูงขึ้นอันเป็นผลมาจากการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นและความรวดเร็วของทางรถไฟที่ให้บริการแก่ผู้โดยสารและเพื่อให้ประสบความสำเร็จในการลดต้นทุนการให้บริการในอุตสาหกรรมรถไฟ เพื่อส่งเสริมการบริการให้ดียิ่งขึ้น และเพิ่มการขนส่งของตัวขบวนรถไฟ

ทางรถไฟแบบที่ใช้หินโรยทางแล้วซึ่งเป็นพื้นฐานในการใช้งานในระบบรางรถไฟจำเป็นต้องได้รับการพัฒนา ให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าในปัจจุบัน รวมไปถึงการลดต้นทุนที่จะเป็นค่าใช้จ่ายต่างๆในอุตสาหกรรมรถไฟ เช่น วัสดุที่ใช้ในทางรถไฟ และการซ่อมบำรุง เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ชั้นหินโรยทางที่เป็นส่วนแรกขององค์ประกอบโครงสร้างชั้นพื้นฐาน (Substructure) ในส่วนของฐานราก (Foundation) ของทางรถไฟที่จะต้องสามารถใช้งานได้ในฐานะเป็นฐานสำหรับรางรถไฟและให้ความเสถียรสำหรับโครงสร้างทางชั้นล่าง ในขณะที่รถไฟกำลังเคลื่อนที่และกระจายการบรรทุกของน้ำหนัก ชั้นหินโรยทางต้องให้การระบายน้ำที่ดีและลดการเติบโตของพืชที่อาจจะเป็นอุปสรรคต่อการใช้งานบนทางรถไฟ

โดยที่ชั้นของหินโรยทางมีการแบกรับน้ำหนักจำนวนทางผ่านจากการขนส่งโดยสารที่มีการบรรทุกน้ำหนักทางสถิตและพลวัต จึงทำให้ชั้นของหินโรยทางเสื่อมสภาพและยุบตัว โดยนำไปสู่การทรุดตัว (Settlement) ความไม่เสถียรของรางรถไฟ (Instability) ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อองค์ประกอบของทางรถไฟและการบำรุงรักษาทางรถไฟที่ต้องทำถี่มากขึ้นอ้างอิงจาก (Indraratna, Salim, & Rujikiatkamjorn, 2011; Selig & Waters, 1994)

การที่จะให้บริการอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย การบดอัด (Tamping) และการจัดเรียงตำแหน่งพื้นผิวที่สัมผัสของชั้นหินโรยทาง (Surface Alignment) ต้องนำมาใช้ในอุตสาหกรรมวางรถไฟเพื่อให้การเสื่อมสภาพของหินโรยทางมีน้อยที่สุดจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อเพิ่มความสามารถในการสนับสนุนการขนส่งที่เพิ่มมากขึ้น แต่มันสามารถลดต้นทุนในการดูแลรักษาและเพิ่มระยะเวลาในการใช้งานของระบบวางรถไฟ

พื้นที่เสี่ยง (Critical Area) ซึ่งมีโมดูลัสบนรางรถไฟที่สูง ส่วนใหญ่ตั้งอยู่บริเวณสะพาน อุโมงค์ สถานียกระดับ ทางที่มีการตัดผ่าน การสลับราง ส่งผลต่อการควบคุมความเร็ว การระงับการขนส่ง และความล่าช้าอาจเกิดขึ้นได้บ่อยครั้งถ้าพื้นที่จำกัดนี้ถูกบำรุงรักษาและซ่อมแซม ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาเพื่อหาปริมาณและประโยชน์จากการใช้วัสดุยืดหยุ่นเป็นการเสริมเพื่อรับแรงในโครงสร้างฐานทางรถไฟ วัสดุยืดหยุ่นที่ใช้ในรางรถไฟได้ถูกวางไว้ที่จุดต่อประสานสัมผัสข้างใต้ของหมอนรองรถไฟกับชั้นของหินโรยทาง วิธีแก้ปัญหาของวัสดุยืดหยุ่น เพื่อลดการสึกหรอของหินโรยทางเป็นหลัก

การศึกษาจากต่างประเทศพบว่าการใช้แผ่นรองหินโรยทาง (Ballast Mat) สามารถลดการสั่นสะเทือนไปยังชั้นเม็ดละเอียด เพื่อเพิ่มความเสถียรของรางรถไฟ และลดการถูกบดอัดของชั้นหินโรยทางในโครงสร้างพื้นฐาน (Substructures) ที่สัมผัสบนพื้นแข็งอย่างเช่น สะพานหรืออุโมงค์อ้างอิงจาก (Getzner, 2015) นอกจากนี้ มีการใช้โพลียูเรเทน (Polyurethane) เพิ่มเข้าไปที่ชั้นของหินโรยทางเพื่อเติมเต็มที่ว่างระหว่างอนุภาคของหินโรยทางซึ่งเป็นไปได้ว่าจะลดการทรุดตัว (Settlement) ของทางรถไฟแบบถาวรอ้างอิงจาก (Kennedy, Woodward, Medero, & Banimahd, 2013) ในทางเดียวกันนั้น มีการศึกษาที่มุ่งความสนใจไปยังการใช้ยางบด (Crumb Rubber) จากยางรถยนต์ที่ใช้แล้วเพื่อลดการเสื่อมสภาพของหินโรยทางโดยทำการผสมระหว่างหินโรยทางและวัสดุที่ได้มาจากยางรถยนต์เข้าด้วยกันกับสารตัวยึดอีพอกซีแบบยืดหยุ่น (Resilient Epoxy Binder) อีกรายงานหนึ่งได้ศึกษาอิทธิพลของยางบดต่อหินโรยทางโดยการเติมสารตัวยึดอีพอกซีแบบยืดหยุ่นลงไปเป็นจำนวนร้อยละต่างๆโดยปราศจากสารวัสดุอื่นๆในห้องปฏิบัติการ

เพิ่มเติมจากการศึกษาจากต่างประเทศได้พบว่าวิธีการแก้ปัญหาที่ดีที่สุดคือการใช้วัสดุเสริมความยืดหยุ่นให้กับหินโรยทาง ยิ่งไปกว่านั้นไม่มีการศึกษามากนักในประเทศไทยเกี่ยวกับการใช้วัสดุยืดหยุ่นเพื่อปรับปรุงคุณภาพวัสดุหินโรยทาง โดยวัสดุยืดหยุ่นส่วนใหญ่ถูกทำมาจากยางพารา ยางพาราทำมาจากส่วนผสมลาเท็กซ์ (Latex) กับกรดผ่านกระบวนการที่เกษตรกรผู้ปลูกยางสามารถผลิตได้ด้วยตัวเอง นอกจากนั้นยางพาราเป็นพืชที่มีมายาวนานที่รู้จักกันดีในฐานะพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยและรวมไปถึงภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ แต่ปัจจุบันนี้กำลังเผชิญปัญหาสถานการณ์ราคาตกต่ำ และรัฐบาลกำลังพยายามแก้ปัญหาโดยการส่งเสริมการใช้ยางพาราภายในประเทศ

เมื่อไม่นานมานี้ ความพยายามที่จะลดการสึกหรอของหินโรยทางรถไฟ กลายเป็นประเด็นหลักสำหรับงานรถไฟ การสึกหรอของหินก่อให้เกิดการหลุดตัวของทางรถไฟนำไปสู่ค่าบำรุงรักษาที่สูงในการซ่อมแซมรูปทรงของรางรถไฟและในการทำความสะอาด ปัจจุบันมีการพิสูจน์ที่ประสบความสำเร็จแล้วว่าการใช้แผ่นยางที่มีความยืดหยุ่นรองใต้หมอนรางรถไฟสามารถลดการสึกหรอของหินโรยทางและการสั่นสะเทือนได้อย่างยิ่งจาก (Somkith Dethvongsone , 2018) จากผลการศึกษาพบว่าแผ่นยางพาราที่รองใต้หมอนรองรถไฟสามารถลดปริมาณการแตกของหินได้ถึง 80% เมื่อเทียบกับตัวอย่างหินที่ไม่มีวัสดุยืดหยุ่น นอกจากนี้แนวโน้มของการหลุดตัวและโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุในกลุ่มทดสอบใกล้เคียงกับตัวอย่างทดสอบอ้างอิงมากที่สุด จึงสรุปชี้ให้เห็นว่าการใช้ยางพาราภายในรูปแบบแผ่นรองใต้หมอนรถไฟควรนำมาใช้ในทางรถไฟ

ทั้งนี้อันเนื่องมาจากระบบของโครงสร้างรางรถไฟก็เหมือนกับโครงสร้างพื้นฐานอื่นๆ ที่ถูกใช้งานย่อมต้องมีการซ่อมบำรุงรักษาทั้งเพื่อให้อยู่ในระดับความปลอดภัยต่อผู้ใช้บริการและเพื่อการดำเนินงานที่ยาวนานขึ้นของระบบ นอกเหนือจากข้อกำหนดของแรง (Static,Dynamic) ที่เกิดจากการบรรทุกน้ำหนักและปริมาณการวิ่งผ่านทางของระบบ เรขาคณิตของทางก็ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของสภาพอากาศและความเค้นภายนอกอื่น ๆ (เคมี, พืช) ที่เกิดขึ้น ทำให้วงจรชีวิตของชิ้นส่วนโครงสร้างทางนั้นมีอายุการใช้งานที่จำกัด ซึ่งขึ้นอยู่กับความเค้นและระยะเวลาของอายุการใช้ ซึ่งชิ้นส่วนองค์ประกอบเหล่านี้เมื่อถึงเวลาที่จะต้องถูกซ่อมแซมหรือถูกแทนที่ใหม่

จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าการใช้วัสดุใหม่เข้ามาแทนที่วัสดุเก่าเป็นสิ่งที่จำเป็นหากองค์ประกอบเหล่านั้นเสื่อมสภาพส่งผลกระทบต่อข้อกำหนดของความปลอดภัยหรือเมื่อถึงระยะเวลาของอายุการใช้งาน ในส่วนของการศึกษาหินโรยทาง

อ้างอิงจาก (Lichtberger & Co. KG, 2005) การนำหินโรยทางใหม่เข้ามาแทนที่หินโรยทางเก่า โดยทั่วไปมีระยะเวลาหลังจากการใช้งานช่วง 20-30 ปี หรือจำนวนผ่านทาง 200-500 ล้านตัน

ซึ่งทั้งนี้ระยะเวลาดังกล่าวเป็นการประมาณการ ขึ้นอยู่กับการซ่อมแซมและการบำรุงรักษา ดังนั้นนอกจากการปรับระดับรางให้แนวรางอยู่ในพิสัยที่กำหนดแล้วการบดอัดหินโรยทาง (Tamping) จึงถูกนำมาใช้เพื่อให้หินโรยทางมีความกระชับและแน่นขึ้น มุ่งเน้นเพื่อความปลอดภัยในการเดินทาง การบดอัดหิน เป็นการปรับให้เหลี่ยมของหินโรยทางรถไฟสามารถขบกันแน่นขึ้น และทนทานต่อแรงกระแทกของขบวนรถที่วิ่งผ่านโดยมีช่วงระยะเวลาดำหนดประมาณ 4-5 ปี หรือ 40-70 ล้านตัน ต่อรอบการทำอัดหินโรยทาง

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้งานยางพาราเป็นวัสดุทางเลือกที่จะลดการลดการสึกหรอของหินโรยทาง อีกทั้งในระหว่างการทดสอบหลายๆรอบของการซ่อมบำรุงหรือก็คือรอบของการบดอัดหินโรยทางจากที่กล่าวมาข้างต้น ได้มีการนำหินออกมาจากกล่องทดสอบจำลองเพื่อทำการศึกษาสภาพของหินโรยทางก่อนที่จะนำกลับไปจัดเรียงภายในกล่องทดสอบใหม่อีกครั้ง เพื่อจำลองเป็นการทำงานในระยะยาวของทาง

โดยทำการทดลองนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของหิน การหลุดตัวและโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุในกล่องภายใต้สภาพการของแรงที่กระทำซ้ำ จากการจำลองแรงจากน้ำหนักเพลารถไฟวิ่งบนโครงสร้างที่มีหินโรยทาง โดยใช้กล่องหินโรยทางจำลองโครงสร้างทางในการตรวจสอบการใช้ยางพาราเป็นแผ่นรองใต้หมอนทางรถไฟ นอกจากนี้ก่อน ระหว่าง และหลังการทดสอบได้มีการหาน้ำหนักของหินทุกก่อนที่ทำการทดสอบ เพื่อใช้เป็นการวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ในข้างต้นต่อไปนี้

## 1.2 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์หลักของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือ

- 1) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของการใช้และไม่ใช้แผ่นยางพารารวมควั่นรองใต้หมอนของทางรถไฟเพื่อลดการสีกหรือของหินโรยทางภายใต้แรงกระทำซ้ำในระยะยาวโดยการจำลองด้วยกล่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ
- 2) เพื่อเปรียบเทียบกรณีศึกษาที่มีความแตกต่างกันของการจำลองจำนวนรอบการซ่อมบำรุงของกล่องทดสอบที่มีจำนวนความถี่และภาระน้ำหนักบรรทุกทุกสะสมของหินโรยทางที่แตกต่างกัน

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือ:

- 1) ใช้หินโรยทางที่ผ่านการคัดส่วนขนาดละเอียดที่จะนำไปใช้งานจริงในการก่อสร้างทางรถไฟของการรถไฟแห่งประเทศไทย (SRT)
- 2) โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้การตั้งค่าการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อจำลองการศึกษาของการสีกหรือของหินโรยทางในเงื่อนไขสภาวะที่หินโรยทางวางอยู่บนฐานโครงสร้างแข็ง เช่น สะพานเหล็ก หรือ พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

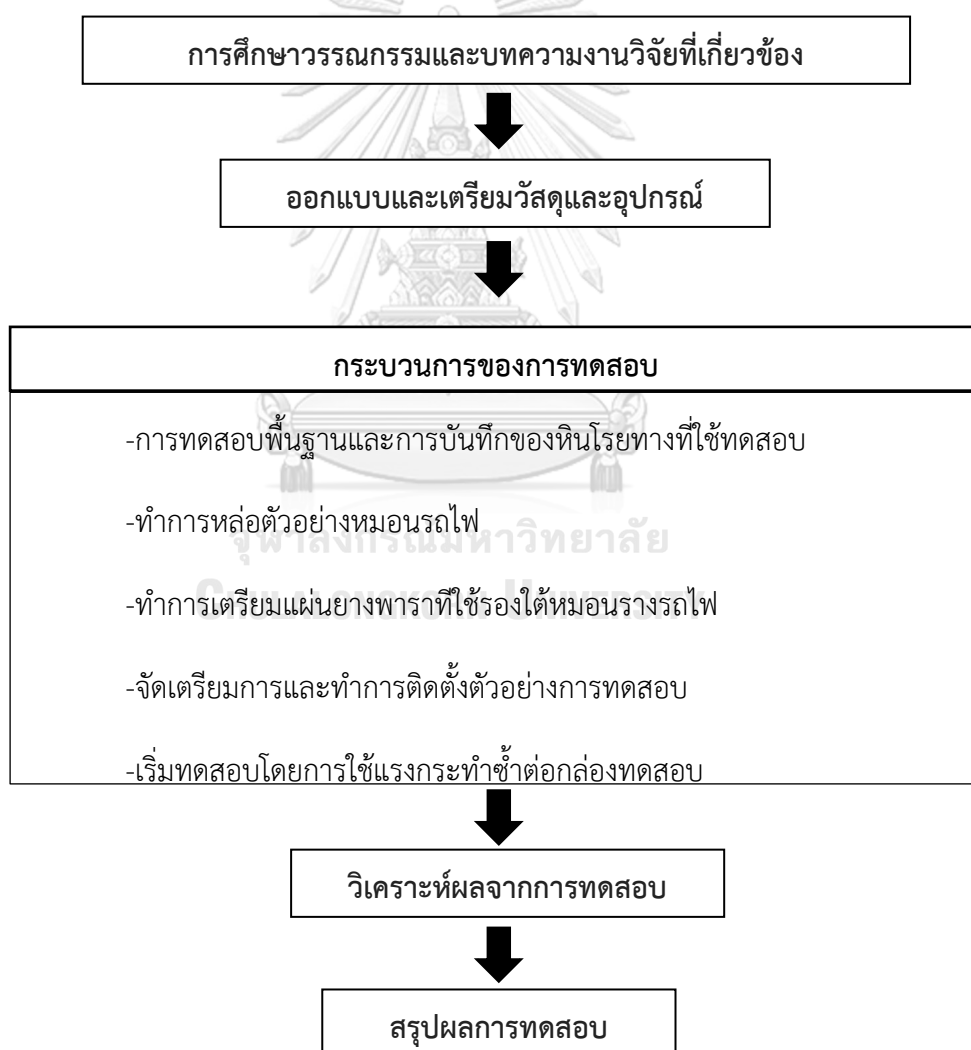
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อลดปริมาณการสีกหรือและการเสื่อมสภาพของหินโรยทางรวมถึงภาระการซ่อมบำรุงของหินโรยทาง
2. ทราบถึงลักษณะของการสีกหรือของหินโรยทางในแต่ละโซนการศึกษาและแต่ละกรณีศึกษา
3. ทราบถึงความต้านทานการสีกหรือของหินโรยทางจากแรงกระทำซ้ำระยะยาว

### 1.5 หลักการและลักษณะของโครงการ

ขั้นตอนและการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์นี้เริ่มต้นมาจากการทบทวน การศึกษา วรรณกรรมและบทความที่เกี่ยวข้องกับภาพรวมของพฤติกรรมและส่วนประกอบของรางรถไฟ โดยมีการอธิบายของปัญหาโครงสร้างพื้นฐานในงานวิจัยและจากผลการวิจัยอื่น ๆ มากมาย เช่นวิธีการและ ทฤษฎีต่างๆที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพและลดภาระในการซ่อมบำรุงรักษา รวมทั้งการทดสอบที่ แสดงความแตกต่างพฤติกรรมของหินโรยทางที่เกิดขึ้นในแต่ละการทดสอบ โดยอาศัยการบันทึก ตัวอย่างทั้งจากของเครื่องทดสอบและการบันทึกที่หาค่าต่างๆจากหินโรยทางที่ใช้ในการทดสอบ ทั้ง ก่อนและหลังจากการทดสอบ เพื่อที่จะศึกษา วิเคราะห์ และเปรียบเทียบถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการ ทดสอบในแต่ละกรณีการศึกษาที่แตกต่างกัน



รูปที่ 1 การวางแผนการทดสอบ



## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หินโรยทาง

##### 2.1.1 คำนิยาม

หินผสมบดที่ใช้ในทางรถไฟเรียกว่า “หินโรยทาง” ซึ่งจะอยู่ด้านบนของชั้นรองหินโรยทาง (sub-ballast) เพื่อช่วยค้ำโครงสร้างส่วนบนและเพื่อความเสถียรของรางรถไฟให้มีประสิทธิภาพในการถ่ายน้ำหนักที่สูงของรถไฟลงไปได้พื้นดิน เพราะว่าต้นทุนที่ต่ำกว่าในการก่อสร้างทางรถไฟ หินนี้จึงยังเป็นที่นิยมในหลายประเทศ อย่างไรก็ตาม คุณภาพที่เหมาะสมของวัสดุบดที่ทำให้ทางรถไฟทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดจำเป็นต้องแข็ง การแบ่งชั้นที่คล้ายกัน ง่ายต่อการรักษาความสะอาดหรือทำให้สะอาดได้อีกครั้ง สามารถใช้งานได้และทนทานต่อการเสีรูบทรงภายใต้การรับน้ำหนักการขนส่ง

##### 2.1.2 บทบาทของหินโรยทางบนรางรถไฟ

อ้างอิงจาก (Selig & Waters, 1994) หินโรยทางมีหลายบทบาท ดังนี้:

- เสริมโครงสร้างส่วนบนอย่างเท่าเทียมกันด้วยศักยภาพในการรับน้ำหนักที่สูงโดยการทำให้รางรถไฟมีความกระชับ (แน่น) และเสถียร
- ความเสถียรของหมอนรถไฟเมื่อเกิดแรง (แนวตั้ง แนวนอน และแรงกระทำด้านข้าง) จากการเคลื่อนที่ของรถไฟต้านกับหมอนรถไฟ
- ลดแรงดันที่สูงจากบริเวณใต้หมอนรถไฟไปยังชั้นฐานพื้นดิน (sub-grade) ในระดับที่สามารถรับได้
- ช่วยการระบายน้ำในช่องว่างของรางรถไฟได้อย่างเหมาะสม
- ให้ความยืดหยุ่นกับวัสดุในการดูดซับพลังงานเมื่อวัสดุถูกทำให้เสีรูบอย่างยืดหยุ่น
- ลดการเติบโตของพืช
- รักษาการเสริมรางรถไฟให้มีความราบเรียบ (ไม่ขรุขระ)
- ให้ช่องว่างที่เพียงพอต่อการลดการสะสมฝุ่น (ดิน ผงต่างๆ)
- ดูดซับเสียงและป้องกันและลดการสูญเสียไฟฟ้าจากถนนรถไฟ (street-railway)

### 2.1.3 ที่มาของหินโรยทาง

หินโรยทางโดยปกติแล้วประกอบด้วยหินบดที่มีต้นกำเนิดมาจากหินที่มีความแข็ง แหล่งที่มาของหินโรยทางที่ใช้บนรางรถไฟในแต่ละประเทศขึ้นอยู่กับคุณภาพ ความสามารถ (ในการใช้งาน) และลักษณะทางเศรษฐศาสตร์ของหิน

อ้างอิงจาก (Salim, 2004) อธิบายไว้ว่าไม่มีการจำเพาะเจาะจงที่เป็นสากลของหินโรยทางสำหรับลักษณะทางด้านดัชนีของหินโรยทาง เช่น ขนาด รูปร่าง ความต้านทานการขัดสี (abrasion resistance) และองค์ประกอบของแร่ธาตุ เนื่องจากมีวัสดุหลายประเภทที่ใช้เป็นหินโรยทางอยู่ทั่วโลก หินโรยทางที่ใช้ในรางรถไฟของประเทศไทยจำเป็นต้องเป็นหินที่ค่อนข้างแข็ง อย่างเช่น **Granit, Basalt, Rhyolite, Andesite, Quartzite, Dacite, Diorite, และ Gabbro** (ชื่อหิน) วัสดุควรรที่จะเป็นรูปร่างเหลี่ยมโดยดัชนีความแบน (flakiness index) และดัชนีความยาว (elongation index) ไม่สูงเกินกว่า 30% ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน BS 812 จากนั้น ร้อยละของการเสื่อมสภาพต้องมีไม่ถึง 25% เมื่อทดสอบด้วยวิธี Los Angeles Abrasion ตามมาตรฐาน ASTM C535 ผลรวมที่ได้ประกอบด้วยกรวดขนาดกลางไปจนถึงขนาดใหญ่ประมาณ 20-60 มม. โดยทั่วไปหินโรยทางนั้นมีระยะเวลาการถูกใช้งานที่ค่อนข้างนานถึง 20-30ปี หรือจำนวนผ่านทาง 200-500 ล้านตัน โดยจะขึ้นอยู่กับการดูแลรักษาหินโรยทางด้วยที่จะส่งผลต่ออายุการใช้งานของหินโรยทางให้นานที่สุด อ้างอิงจาก (Dr. Bernhard, Track Compendium 2011)

## 2.2 ผลของการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

### 2.2.1 การเกิดตะกอน (Fouling)

อ้างอิงจาก (Indraratna et al., 2011) อธิบายการเกิดตะกอนบนรางรถไฟว่าเกิดขึ้นจากหลายๆสาเหตุ อย่างเช่น การแตกของหินโรยทาง ดินเหนียวในการสูบน้ำจากชั้นรองหินโรยทาง (sub-ballast) ไปที่ชั้นหินโรยทาง ผุ่นผงที่เกิดจากการพัดของลม (รางรถไฟที่อยู่บนทราย) การลื่นทะลักจากบรรทุกขนส่งและในระหว่างการก่อสร้าง

อ้างอิงจาก (Selig และ Waters, 1994) อธิบายว่าการเกิดตะกอนที่เก็บในชั้นหินโรยทางเป็นเพราะว่าการเพิ่มขึ้นของความเค้นเฉือน (shear strength) และค่าความแข็งแกร่ง (stiffness) ในทางตรงกันข้ามเมื่อการเกิดตะกอนต้องพบกับน้ำทำให้การเสื่อมสภาพของหินโรยทางเพิ่มมากขึ้น และอัตราของการก่อตัวก็เพิ่มมากขึ้นด้วย การเกิดตะกอนของหินโรยทางปกติแล้วก่อตัวบนรางมากขึ้นเพราะว่าการลดลงของมุมเสียดทาน (friction angle) และแม้แต่สาเหตุที่ต่างกันของการก่อตัวก็สามารถนำไปสู่การขาดประสิทธิภาพของการจัดตำแหน่งรางรถไฟได้ ดังนั้นปัญหาการเกิดตะกอนจำเป็นต้องทำความสะอาดหรือมีการเปลี่ยนเพื่อรักษาความแข็งแกร่ง (ความยืดหยุ่น) ประสิทธิภาพในการรับน้ำหนัก และระดับของความปลอดภัย มีการนำวัสดุผสมที่ยืดหยุ่นมาเป็นหินโรยทางเพื่อลดการแตกของส่วนผสม อย่างเช่น ใช้นยางล้อที่มาจากยางรถยนต์ (automobile tire-derived) หรือยางครัมป์ (crumb rubber) เพื่อป้องกันการเกิดตะกอน นอกจากนั้นการใช้แผ่นใยสังเคราะห์ (geotextile) วางใต้ชั้นหินโรยทางเพื่อช่วยกรองการถ่ายเทน้ำจากชั้นรองหินโรยทาง (sub-ballast) ไปที่ชั้นหินโรยทาง



รูปที่ 2 การเกิดตะกรันของหินโรยทาง (Indraratna et al., 2011)

### 2.2.2 การระบายน้ำ

อ้างอิงจาก (Indraratna et al., 2011) กล่าวว่า การแตกของวัสดุลงไปอุดที่ว่างในหินโรยทาง เพราะการลดลงของประสิทธิภาพในการระบายน้ำของชั้นหินโรยทาง น้ำที่มาจาก การขาดความสามารถในการระบายน้ำที่ลดลงเสียดสีระหว่างส่วนผสมและลดการสูญเสียความแข็งแกร่ง (stiffness) และความยืดหยุ่น อีกทั้ง การผสมระหว่างหินโรยทางและการเกิดตะกรันในสภาวะเปียก ชี้นำไปสู่รางรถไฟที่ไม่มีความเสถียรและการเสื่อมสภาพอย่างต่อเนื่องของส่วนประกอบบนรางรถไฟ ในเวลาต่อมา

อ้างอิงจาก (Kashani, Hyslip, & Ho, 2017) การศึกษาลักษณะของส่วนผสมของหินโรยทางที่สภาวะที่มีน้ำอยู่พบว่า การเกิดตะกรันสูงมากตามสภาวะความชื้นที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นเท่าตัวของการก่อตัว (ของ ตะกรัน) เมื่อเทียบกับสภาวะสนาม (สภาพจริง)



รูปที่ 3 การซังของน้ำในชั้นหินโรยทาง (Indraratna et al., 2011)

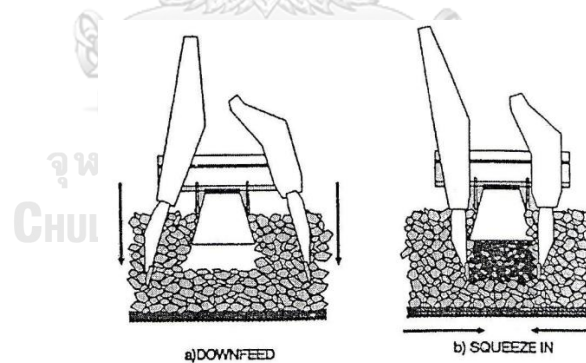
### 2.2.3 การเสีรูปรูทรวง

การเสีรูปรูทรวงของหินโรยทางเกิดขึ้นจากการอัดแน่นของหินโรยทางและอนุภาคจากการแตกหัก อ้างอิงจาก (Selig & Waters, 1994) ได้ระบุว่าการเปลี่ยนแปลงแนวการเรียงตัวของรางรถไฟพร้อมกับความยาวของรางไม่ได้สำคัญไปกว่าการสูญเสียรูปรูทรวงที่ต่างจากเดิมของรางรถไฟ อย่างไรก็ตาม การเสีรูปรูทรวงของหินโรยทางยังคงมีหลายวิธีในการแก้ปัญหาความผิดพลาดของหินโรยทางโดยที่ไม่ไปรบกวนการทำงานมากกว่าฐานพื้นดิน (subgrade) ที่บิตเปี้ยว อ้างอิงจาก (Indraratna, Khabbaz, Salim, & Christie, 2006; Kashani et al., 2017; Raymond, 2002) จากการศึกษาที่ได้ทดลองแล้ว รายงานว่า น้ำหนักของรถไฟมีผลต่อการเสีรูปรูทรวงของหินโรยทาง จำนวนรอบของการรับน้ำหนัก และความเร็วของรถไฟ ยิ่งไปกว่านั้น ชนิดของการเสริมแรง (reinforcement) การกระจายตัวของขนาดอนุภาคหินโรยทาง และระดับของการอัดตัว (ความชื้น) ที่เป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อเสีรูปรูทรวงไปจากเดิมของส่วนผสม



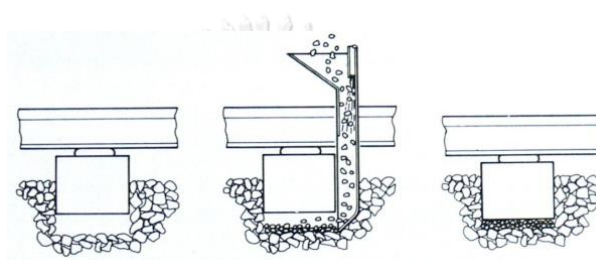
รูปที่ 4 รูปทรงที่ต่างไปจากเดิมบนรางรถไฟที่มีสาเหตุมาจากการเสีรูปร่างของหินโรยทาง  
(Indraratna et al., 2011)

อ้างอิงจาก (Salim, 2004) แนะนำว่ามีสามรูปแบบของการรักษารูปทรงเรขาคณิตของทางรถไฟที่ได้รับผลกระทบจากการรับน้ำหนักขนส่งว่า: การบดอัด (Tamping) เป็นวิธีรักษาการทำงานซึ่งใช้เพื่อนำกลับมาของตำแหน่งเดิมของรางรถไฟ วิธีการนี้ค่อนข้างได้รับความนิยมสำหรับรักษาความสามารถในการใช้งานบนรางรถไฟถึงแม้ว่าจะเป็นหนึ่งในตัวแปรที่เป็นสาเหตุของการเสีรูปร่างของหินโรยทางและทำให้เกิดละอองหิน (Selig & Waters, 1994)



รูปที่ 5 การรักษารางโดยการบดอัด (Tamping) (Selig & Waters, 1994)

ในทางตรงกันข้าม มีเครื่องเป่าหินซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการป้องกันการถูกรบกวนที่น้อยที่สุดของหินโรยทางใต้หมอนรถไฟเพราะว่าใช้การยกโครงสร้างด้านบนในตำแหน่งที่เบาและเป่าส่วนผสมแร่ขนาดเล็กในช่องว่างด้านล่างระหว่างหินที่ถูกบดกับยาง มีการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยใช้กล่องหินโรยทางที่สภาวะการรับน้ำหนักจำลองเพื่อเปรียบเทียบวัสดุที่ต่างกันเพื่อใช้ในการรักษาทางรถไฟ (การบดอัด (Tamping) และการเป่าหิน (stone-blowing)) พวกเขาแสดงให้เห็นว่าการเป่าหิน (stone-blowing) สามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของรางได้ อ้างอิงจาก (D'Angelo, Thom, & Presti, 2015)



รูปที่ 6 การรักษาทางโดยการเป่าหิน (stone-blowing) (Selig & Waters, 1994)

การทำความสะอาดหินโรยทางและการทำให้หินโรยทางกลับคืนสู่สภาพเดิมเป็นวิธีการที่ใช้เมื่อทางรถไฟถูกย่ำ (ใช้งาน) ที่มากเกินไป แต่ทางรถไฟยังคงเสียรูปทรงแม้ว่าจะใช้วิธีการการบดอัด (Tamping) และการเป่าหิน (stone-blowing) ในกรณีนี้ หินโรยทางต้องได้รับการทำความสะอาดหรือแทนที่ด้วยส่วนผสมชนิดใหม่ กระบวนการทำความสะอาดหินโรยทางหรือทำให้หินโรยทางกลับคืนสู่สภาพเดิมมีต้นทุนที่สูงและใช้เวลานาน นอกจากนี้ ยังรบกวนความคล่องตัวในการขนส่ง ดังนั้นกระบวนการนี้จึงไม่ถูกนำมาใช้บ่อยนัก

## 2.2.4 การเคลื่อนตัวด้านข้างรางรถไฟ

ความผิดพลาดนี้เกิดขึ้นเมื่อหินโรยทางถูกทำให้เสื่อมสภาพลงและการขาดการควบคุมด้านข้างเพื่อรักษาเสถียรภาพของรางเอาไว้ สภาวะที่สองข้างไม่เท่ากัน (misalignment) ของรางรถไฟเกิดขึ้นได้ทั้งบนทางตรงและทางโค้งซึ่งการควบคุมหินโรยทางด้านข้างถูกลดลงก็เพราะว่าการไหลตามการลาดเอียง อ้างอิงจาก (Zakeri, 2012) กล่าวว่า การเคลื่อนตัวไปด้านข้างได้รับอิทธิพลมาจากประเภทน้ำหนัก และการหามิติของหมอนรถไฟ คุณภาพของหินโรยทาง ความลึกของหินโรยทางในช่อง (crib) และความสูงระดับไหล่พื้นของหมอนรถไฟ การอัดแน่นของหินโรยทาง ชนิดของรางและตัวยึดราง ในขณะเดียวกัน พวกเขาได้กล่าวถึงผลกระทบที่สำคัญและแรงต้านด้านข้างโดยรวมของหมอนรถไฟคือแรงต้านการเสียดสีด้านข้าง แรงต้านจากด้านล่างของหมอนรถไฟ และแรงต้านทานสุดท้ายยิ่งไปกว่านั้น การเคลื่อนตัวด้านข้างรางรถไฟปรากฏให้เห็นเมื่อโลหะรางรถไฟต้องพบกับความร้อนที่สูงเพราะว่าต้องทนต่อแรงต้านทานไปด้านข้างของหมอนรถไฟ มีหลายวิธีการในการเพิ่มแรงต้านทานด้านข้างของหมอนรถไฟและหินโรยทาง อย่างเช่น หมอนรถไฟลอย (winged sleeper) หมอนรถไฟทนแรงเสียดทาน (frictional sleeper) และหมอนรถไฟขนาดใหญ่ (large sleeper) อ้างอิงจาก (Koike, Nakamura, Hayano, & Momoya, 2014) อ้างอิงจาก (Zakeri, 2012) จากการทดสอบภาคสนามที่ได้ทำแล้วของแรงต้านด้านข้างของรางรถไฟพบว่าการใช้หมอนคอนกรีตที่ทนแรงเสียดทานสามารถเพิ่มแรงต้านทานด้านข้าง 67% ดังนั้นเหตุผลที่เรารู้ได้จากเรื่องนี้คือการจำกัดขอบเขตด้านข้างไม่เพียงแต่ผลกระทบจากหินโรยทาง แต่เสียดสีจากหมอนรถไฟก็เป็นหนึ่งในตัวแปรในการลดลงของการเคลื่อนตัวไปด้านข้างของรางรถไฟ



รูปที่ 7 การโค้งงอของรางรถไฟเพราะการขาดการจำกัดขอบเขตด้านข้าง (Indraratna et al., 2011)



### 2.2.5. ค่าโมดูลัสของทางรถไฟ (Track modulus)

ความผิดพลาดของทางรถไฟเป็นปัญหาสำคัญสำหรับอุบัติเหตุบนทางรถไฟจำนวนมาก ค่าโมดูลัสของทางรถไฟ (Track modulus) หรือค่าระดับความแข็งแรงแรง (stiffness) เป็นตัวแปรที่สำคัญในคุณภาพรางรถไฟ โมดูลัสของทางรถไฟ (Track modulus) ถูกจำกัดความโดยแรงการเสริมต่อการเบนหนึ่งหน่วยความยาวและสามารถใช้เพื่อทำการบันทึกประสิทธิภาพของทางได้ ค่าที่เหมาะสมของโมดูลัสทางรถไฟไม่ควรสูงหรือต่ำเกินไป ค่าที่สูงเกินไป (แข็งแรงแรงเกินไป) อาจนำไปสู่ความถี่ (เฉื่อย) การแตก และการสั่นสะเทือนที่มากเกินไป ค่าโมดูลัสที่น้อยเกินไปของทางรถไฟก็อาจจะเป็นสาเหตุของการเสีรูปร่างที่ไม่มีสัญญาณเตือนและแม้แต่การเสีรูปร่างถาวร อ้างอิงจาก (Selig & Waters, 1994) มีหลายปัจจัยที่มีผลต่อค่าโมดูลัสของทางรถไฟ อย่างเช่น คุณภาพของราง หมอนรถไฟ การเชื่อมต่อราง หินโรยทาง และฐานพื้นดิน (sub-grade) ถ้าทางรถไฟมีความแข็งแรงแรง (stiffness) ที่สูงเกินไปและโดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเปลี่ยนแปลงต่างๆในความแข็งแรงแรง (stiffness) ของทางรถไฟสามารถทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแรงพลวัตบนหมอนรถไฟ หินโรยทาง และฐานพื้นดิน (sub-grade) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพและความเสียหายจากการหมดสภาพบนโครงสร้างของทางรถไฟ ในทางตรงกันข้าม การเคลื่อนย้าย (แทนที่) ขนาดใหญ่ได้รับผลกระทบมาจากความแข็งแรงแรง (stiffness) ของทางรถไฟที่ต่ำ และยังเป็นสาเหตุโมเมนต์ดัด (bending moment) ที่สูงบนรางรถไฟ นอกจากนี้ ความแข็งแรงแรงของทางรถไฟที่ต่ำยังนำไปสู่การกระจายที่ต่ำกว่าระหว่างหมอนรถไฟกับแรงเสียดทานภายใน (interaction force) ของรถไฟกับทางรถไฟ ถ้าหินโรยทาง ชั้นรองหินโรยทาง (sub-ballast) หรือฐานพื้นดิน (sub-grade) นิ่มเกินไปค่าความแข็งแรงแรงสากลของทางรถไฟ (global track stiffness) ก็ต่ำลง

อ้างอิงจากสมมติฐานของ Winkler โมดูลัสพื้นฐาน  $C$  คืออัตราส่วนระหว่างความเค้นแรงอัดเฉพาะบนตัวเสริม  $\sigma$  และการลดลงเฉพาะของตัวเสริม  $w$  (Esveld, 2014) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้:

$$\sigma = Cw \quad (2.1)$$

$\sigma$  = ความเค้นแรงอัดเฉพาะบนตัวเสริม [ $N/m^2$ ]

$w$  = การลดลงเฉพาะของตัวเสริม [ $m$ ]

$C$  = โมดูลัสพื้นฐาน [ $N/m^3$ ]

### 2.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

การแตกของหินโรยทางขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ความสูงคลื่นเสียง (amplitude) ความถี่ และจำนวนรอบ ความหนาแน่นของส่วนผสม (aggregate density) แรงดันด้านข้าง (confining pressure) และระดับของการอิมมัตว (ของน้ำ) อ้างอิงจาก (Gupta, 2009) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าขนาดอนุภาคและขนาดที่ใหญ่ของแรงดันด้านข้าง (confining pressure) มีผลกระทบต่อสภาพของอนุภาค พวกเขาสรุปว่าการเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคเพราะว่าจำนวนของจุดสัมผัสลดลง ดังนั้นจึงนำไปสู่แรงดันสัมผัส (contact pressure) ที่สูงขึ้นและการแตกของอนุภาคก็เพิ่มมากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น การเพิ่มขึ้นของแรงดันด้านข้าง (confining pressure) สำหรับทุกขนาดของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการแตกของวัสดุ อ้างอิงจาก (Kashani et al., 2017) ยังชี้ให้เห็นอีกว่าน้ำมีอิทธิพลต่อความมั่นคงของทางรถไฟและนำไปสู่ปัญหาต่างเกี่ยวกับความสามารถในการขนส่ง จากการทดลองของพวกเขาพบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในการทดลองในห้องปฏิบัติการเพิ่มอัตราในการทรุดตัว (Settlement) นอกจากนี้ นักวิจัยหลายคนชี้ให้เห็นว่าจำนวนของรอบการบรรทุกเป็นหนึ่งในตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเสียรูปทรงของพลาสติกและหินโรยทาง และวัสดุที่เป็นเม็ดอื่นๆ เช่น ในการจัดการตัวอย่างของการทดลองที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ระยะเริ่มต้นของแรงกระทำแบบซ้ำๆ (cyclic loading) หลังจากนั้น ส่วนผสมเริ่มเสียรและการทรุดตัว (Settlement) เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบในการบรรทุก จากนั้น มีการตรวจสอบว่าความถี่มีผลกระทบอย่างไรกับการ

เสีรูปทรงถาวรและการเสื่อมสภาพของหินโรยทางรางรถไฟ โดยใช้ชุดการทดสอบการหมุนแรงอัดสามทิศทางขนาดใหญ่ (large-scale cyclic triaxial tests) ศึกษาโดยการทดลองพบว่าการเพิ่มขึ้นของความถี่และจำนวนผลรวมรอบบรรทุกทำให้การเสีรูปทรงถาวรของหินโรยทางและการแตกของอนุภาคเพิ่มสูงขึ้น อ้างอิงจาก (Sun, Indraratna, & Nimbalkar, 2014) โดยอ้างอิงเพิ่มเติมจาก (Selig & Waters, 1994) สรุปว่าหินโรยทางที่มีความหนาแน่นต่ำนำไปสู่การเสีรูปแบบพลาสติก (plastic strains) ที่สูงและความถ่วงจำเพาะที่สูงขึ้นแสดงความเสียหายที่น้อยลงของวัสดุหินโรยทาง

## 2.4 วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับศึกษาการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

การเสื่อมสภาพและการแตกที่เห็นได้ชัดของหินโรยทางมาจากการบรรทุกของรถไฟ อีกทั้งการรักษาสภาพของหินโรยทาง (การบดอัด (tamping) การขนส่ง หรือการรับมือ) และสภาวะอื่นๆที่เป็นปัจจัยในการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง อ้างอิงจาก (Selig & Waters, 1994) ผลกระทบจากการแตกของหินโรยทางเป็นสาเหตุในหลายๆข้อผิดพลาดของการปรับตำแหน่งของทางรถไฟและลดความสามารถของทางรถไฟลงตามที่ได้กล่าวในส่วนที่แล้วมา นอกจากนั้น นักวิจัยจำนวนมากได้เคยเสนอวิธีการต่างๆของการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาลักษณะของหินโรยทาง อ้างอิงจาก (Koohmishi & Palassi, 2018) ได้ศึกษาการเสื่อมสภาพของส่วนผสมในขณะที่รักษาการใช้งานเอาไว้ โดยใช้การทดสอบการบีบอัดระดับห้องปฏิบัติการ (lab-scale compression test) กับการรับน้ำหนักหลายระดับและทดสอบวัสดุผสมที่ต่างชนิดกัน การทดสอบนี้ใช้สามดัชนีการเสื่อมสภาพเพื่อชี้วัดจำนวนเชิงปริมาณของการเสื่อมสภาพตัวอย่างหินโรยทาง ผลจากการดำเนินการพบว่าการเสื่อมสภาพที่มากขึ้นของหินโรยทางเป็นผลมาจากการดูแลรักษาของอนุภาคและการรับน้ำหนักแรงอัดที่ต่ำกว่าทำให้การเสื่อมสภาพลดลง อย่างไรก็ตาม การทดสอบนี้แสดงให้เห็นเพียงแค่แรงดันบีบอัด (compress pressure) ที่ดูจะไม่คล้ายคลึงกันกับแรงบนรางรถไฟเนื่องจากขาดการสั่นสะเทือนและลักษณะที่มากกระทบ



รูปที่ 8 อุปกรณ์ทดสอบการบด (อัด ชน กระแทก) (Koohmishi & Palassi, 2018)

อ้างอิงจาก (Cuelho, Mokwa, Obert, & Miller, 2008) การทดลองในห้องปฏิบัติการของ Micro-Deval, LA Abrasion, Sodium Sulfate และ Magnesium Sulfate เพื่อพิสูจน์ว่าวิธีการใดที่ให้คุณภาพดีกว่าของการทดสอบความทนทานของส่วนผสม (aggregate durability tests) ที่มีพื้นฐานมาจากข้อมูลการทดสอบในห้องปฏิบัติการในสหรัฐอเมริกา พวกเขาสรุปว่าการวิเคราะห์ที่ยังคงใช้ส่วนใหญ่คือ Micro-Deval ตามด้วยการทดสอบ Magnesium Sulfate, L.A. Abrasion และ Sodium Sulfate ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม มีวิธีการทดสอบที่ไม่ได้ระบุชัดเจนบางส่วนเพราะการทดสอบเหล่านี้สามารถคาดการณ์ลักษณะที่แท้จริงในภาคสนามได้ ดังนั้น เพื่อเข้าถึงลักษณะที่สำคัญ จำเป็นต้องมีการทดสอบศึกษาภาคสนามอย่างเต็มรูปแบบ (full-scale field test)

อ้างอิงจาก (Aursudkij, McDowell, & Collop, 2009) ดำเนินการศึกษาในห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับหินโรยทางทางรถไฟภายใต้สภาวะแรงอัดสามทิศทางและในการทดสอบสิ่งก่อสร้างทางรถไฟ ซึ่งตรวจสอบทั้งแรงดึงและการแตกของหินโรยทาง การทดสอบแรงอัดสามทิศทางขนาดใหญ่ (The large-scale triaxial test) ถูกออกแบบ ประดิษฐ์ขึ้น และนำมาประกอบกันเพื่อทำการทดสอบการหมุนที่แรงดันด้านข้าง (confining pressure) ความถี่ รูปร่างของคลื่น (pulse shapes) และสภาวะการระบายน้ำที่ต่างกัน ในขณะที่การทดสอบโครงสร้างทางรถไฟที่สร้างด้วยหลุม (ช่อง) คอนกรีตและประกอบด้วยวัสดุฐานพื้นดิน (sub-grade) หินโรยทาง และหมอนรถไฟสามอันซึ่งเลียนแบบการบรรทุกขนส่งโดยเครื่องกระตุ้นการทำงานแบบไฮดรอลิก (hydraulic actuators) ผลจากการปฏิบัติการคือหน่วยแรงในแนวนอน (horizontal stress) และหน่วยแรงกด (bearing stress) ได้หมอนรถไฟภายใต้การทดสอบโครงสร้างทางรถไฟมีความคล้ายคลึงกับการทดสอบแรงอัดสามทิศทาง

(triaxial test) ข้อดีของวิธีการเลียนแบบบรรทุกน้ำหนักทั้งสองวิธีคือใช้กับตัวอย่างที่ค่อนข้างตรงกันกับแรงกดบนรางรถไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทดสอบโครงสร้างทางรถไฟมีความคล้ายคลึงกับสภาวะจริง และการทดสอบนี้สามารถวัดการคงตัว (อยู่ในสภาพเดิม) ของหินโรยทางการแตกของหินโรยทางโดยการวิเคราะห์การร่อน



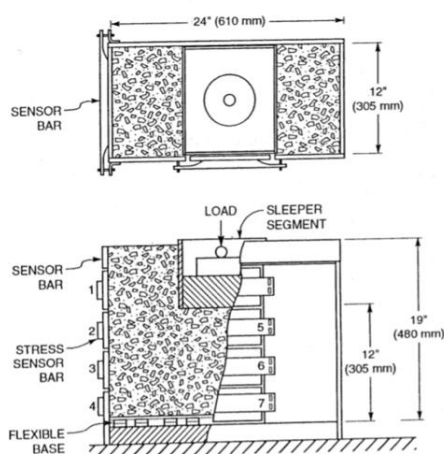
รูปที่ 9 อุปกรณ์ทดสอบแรงอัดสามทิศทางขนาดใหญ่ (Large-Scale Cyclic Triaxial Test Equipment) เครื่องทดสอบการรับน้ำหนัก (Loading Machine) และโปรแกรมแปลงผลข้อมูล (Data Acquisition System) (Ebrahimi, Tinjum, & Edil, 2010)

มีการศึกษาทดลองในทางคณิตศาสตร์ที่เคยประสบความสำเร็จมาแล้วของการผสมหินโรยทางกับวัสดุอื่นๆภายใต้การรับน้ำหนักซ้ำโดยใช้การทดสอบกล่องหินโรยทางซึ่งสามารถใช้เพื่อระบุการแตกและเสียรูปทรงของหินโรยทางตามที่แสดงในตารางที่ 1 การทดสอบกล่องหินโรยทางจำลองส่วนหนึ่งของโครงสร้างรางรถไฟและจำลองลักษณะของหินโรยทาง และปฏิบัติการภายใต้สภาวะภาคสนาม ซึ่งหินโรยทางอยู่ในกล่องกับส่วนที่เป็นหมอนรถไฟและแรงกระทำซ้ำ (cyclic loading) ถูกจำลองการรับน้ำหนักในการขนส่งโดยใช้เครื่องกระตุ้นการทำงานแบบไฮดรอลิก (hydraulic actuators) ประยุกต์การรับน้ำหนักผ่านรางรถไฟหรือในส่วนของหมอนรถไฟ การเสียรูปทรงใน

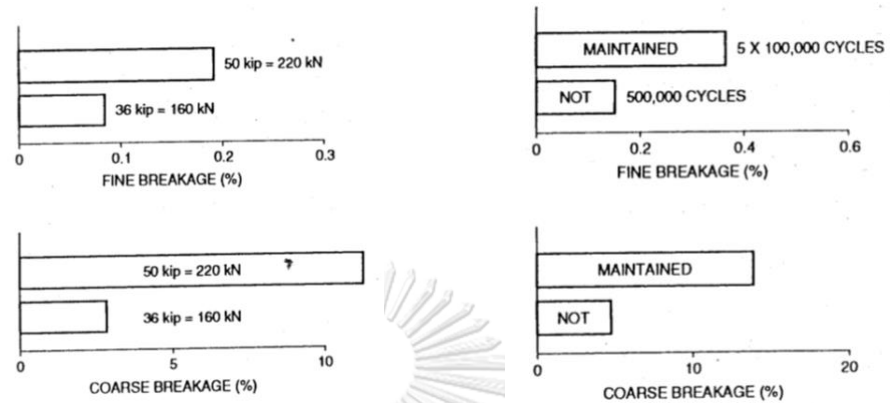
ระหว่างการรับน้ำหนักเข้าถูกวัดผ่านการใช้เครื่องมือในแต่ละชั้นด้วยทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (linear variable differential transducers (LVDTs))

อ้างอิงจาก (Selig & Waters, 1994) การศึกษาการแตกของหินโรยทางโดยการใช้กล่องทดสอบจำลองสภาวะการรับน้ำหนักภาคสนามด้วยกล่องอุปกรณ์ทดสอบ สำหรับการทดสอบนี้แสดงในรูปที่ (10) กล่องถูกใช้รับน้ำหนักเข้าโดยเครื่องทดสอบแรงเสียดทาน (servo-hydraulic) และด้านล่างของกล่องสามารถยืดหยุ่นได้เพื่อแสดงผลกระทบจากฐานพื้นดิน (sub-grade) การเสื่อมสภาพถูกพิจารณาในสองประเภทการจำลำดับ ได้แก่ ลำดับแรกคือ การแตกหยาบ (coarse breakage) และลำดับที่สองคือการแตกละเอียด (fine breakage) จากการทดสอบที่เพิ่มขึ้นในวงล้อรับน้ำหนักจาก 160 kN ไปที่ 220 kN พบว่าการแตกละเอียด (fine breakage) เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าและการแตกหยาบ (coarse breakage) เพิ่มขึ้นเป็นสามเท่าในจำนวนนี้ ในการทดสอบอีกอย่างหนึ่ง พวกเขาศึกษาการเสื่อมสภาพของหินโรยทางโดยตัวอย่างหนึ่งในห้าแสนรอบโดยปราศจากการดูแลรักษา แต่การรับน้ำหนักอีกอันหนึ่งในครั้งหนึ่งของห้าแสนรอบแต่หินโรยทางโดยที่ได้รับการดูแลรักษาหลังจากหนึ่งร้อยรอบ พวกเขาพบว่าการดูแลรักษาหินโรยทางหลังจากแต่ละหนึ่งร้อยรอบเพิ่มจำนวนของความละเอียดมากขึ้นกว่าสองเท่าและจำนวนความหยาบเกิดขึ้นเป็นสามเท่าในการเปรียบเทียบกับหินโรยทางที่ไม่มีการดูแลรักษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN



รูปที่ 10 การทดสอบกล่องหินโรยทาง (Selig & Waters, 1994)



รูปที่ 11 ผลของการรับน้ำหนักล้อต่อการแตกของหินโรยทาง (Selig & Waters, 1994)

รูปที่ 12 ผลจากการรักษาการแตกของหินโรยทาง (Selig & Waters, 1994)

ตารางที่ 1 ผลสรุปการพัฒนากล่องหินโรยทางและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

หมายเลข	ที่มา	มิติของกล่อง ยาวxกว้างxสูง (มม.)	ขนาด อนุภาค/ ชนิดของหิน โรยทาง	วัสดุเสริม กำลัง (Reinforce material)	น้ำหนัก	วัสดุ (ผลของ การศึกษา)
1	(Raymond , 2002)	900x20x325	หินเซรามิก Denstone	LG400, Stratagrid 200, และชั้น Stratagrid 200 ที่ถูกตรึง สี่ชั้น	10,000 รอบที่ 0-40kpa	การคงตัวของ พลาสติก การ แตกของ ส่วนผสม
2	(Indraratna et al., 2006)	800x600x600	ส่วนผสม หยาบ Dmax = 60 มม.	แผ่นใย สังเคราะห์ (geotextile) วัสดุใย สังเคราะห์ที่ ใช้สำหรับ เสริมแรงใน ดิน (geogrid) วัสดุ สังเคราะห์ เชิงประกอบ (geocomposite)	100,000 รอบ ที่ 15Hz	การเสียรูปทรง และการเสื่อม คุณภาพ
3	(Ho, Humphrey, Hyslip, &	600x305x460	หินโรยทาง มาตรฐาน	ยางรถยนต์รีไซเคิล แผ่น ยางอีพอกซี (epoxy	100,000 รอบ น้ำหนักที่ 2Hz	การแตกของ หินโรยทาง การถลอก



	Moorhead , 2013)			bidder) และวัสดุยึดหินโรยทางที่มีความยืดหยุ่น (resiliently bound ballast)		
4	(M. Sol-Sánchez, Thom, Moreno-Navarro, Rubio-Gómez, & Airey, 2015)	460x200x300	หินบดหยาบที่ประกอบด้วย granodite, Dmax = 50 มม.	ยางบด	100,000 รอบ น้ำหนักที่ 4Hz, 200kpa และแรงดึง 300 kpa เหนือผิวหน้าหินโรยทาง	การเสื่อมสภาพ ความแข็งแกร่ง (stiffness) พลังงานที่ค่อยๆลดลง และการคงที่ของทางรถไฟ
5	(Fathali, Nejad, & Esmaeili, 2016)	700x290x400	หิน Dolomite บด Dmax = 63 มม.	ส่วนผสมที่มาจากยางรถยนต์ (Tire-derived aggregate (TDA))	100,000 รอบ น้ำหนักที่ 3 Hz	ลักษณะการขัดสี (abrasive) ความเค้นเฉือน (shear strength) อนุภาคการแตก การทรุดตัวของหินโรยทาง (ballast settlement)
6	(Liu, Huang, Qiu, & Kwon,	2440x1830x1020	Limestone, Dmax 60 มม.	Geogrid	500 รอบ น้ำหนักที่ 1 Hz	การเปลี่ยนแปลงในแนวราบ (horizontal

	2016)					translation) และการ หมุนรอบ ความแข็งแกร่ง (stiffness)
7	(Suku, Prabhu, Ramesh, & Babu, 2016)	900x900x600	ดินใต้ชั้นฐาน กับ Dmax= 60 มม.	Geocell	3000 รอบ น้ำหนักที่ 1 Hz	การเสีรูปทรง
8	(Esmaeili, Aela, & Hosseini, 2017)	700x300x450	หินโรยทาง Dolomite	แร่ผสมที่มาจากยาง รถยนต์ (Tire-derived aggregate (TDA))	100,000 รอบ น้ำหนักที่ 3 Hz.	การทรุดตัว (Settlement) การแตกของ หินโรยทางและ อัตราการหน่วง (damping)
9	(Du Plooy & Gräbe, 2017)	2400x600x400	-	โฟมโพลียูรีเทน แบบแข็ง (rigid polyurethane foam (RPF))	5,000,000 รอบน้ำหนักที่ 10 Hz	ดัชนีการแตก ของหินโรย ทางการคงที่ ของหินโรยทาง โมดูลัสยืดหยุ่น (Resilient modulus)
10	(Kashani et al., 2017)	1320x840x520	หินแกรนิต บด Dmax=60 มม.	-	2,500,000 รอบน้ำหนักที่ 1 Hz	การทดสอบใน สถานะที่มีน้ำ ขัง การคงตัว ของพลาสติก

มีกระบวนการวัดปริมาณหลายวิธีของการแตกของหินโรยทางที่ถูกใช้เพื่อประเมินบนพื้นฐานการกระจายขนาดอนุภาคก่อนและหลังการทดสอบได้อธิบายไว้ด้านล่าง อ้างอิงจาก (Marsal, 1967) เสนอว่าดัชนีของอนุภาคการแตก ( $B_g$ ) โดยการใช้เส้นโค้งของการกระจายขนาดอนุภาคจากจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุด (PSD) ซึ่งให้เห็นว่าความแตกต่างในร้อยละที่เก็บไว้ของแต่ละขนาด ( $\Delta W_k = W_{ki} - W_{kf}$ ) ซึ่ง  $W_{ki}$  คือร้อยละที่เก็บไว้บนขนาดตะแกรง  $k$  ก่อนการทดสอบ  $W_{kf}$  คือร้อยละที่เก็บไว้บนขนาดตะแกรง  $k$  หลังจากการทดสอบ Marsal จำกัดความการแตกของหินโรยทาง ( $B_g$ ) อธิบายเป็นร้อยละโดยผลรวมของ  $\Delta W_k$  ที่เป็นบวก

อ้างอิงจาก (Lee & Farhoomand, 1967) เสนอว่าตัวชี้วัดการแตกอธิบายจำนวนของการแตกเป็นอนุภาคโดยการใช้อัตราส่วนของขนาดเริ่มต้นที่ 15% สำหรับอนุภาค ( $D_{15}$ )<sub>i</sub> ไปที่ขนาด 15% หลังจากการทดสอบ ( $D_{15}$ )<sub>f</sub>

$$B_g = \frac{D_{15i}}{D_{15f}} \quad (2.2)$$

อ้างอิงจาก (Lade, Yamamuro, & Bopp, 1996) เสนอว่าตัวแปรการแตกของอนุภาคขึ้นอยู่กับ  $D_{10}$  ซึ่งมีขนาดระหว่าง 0.1 และ 3 มม. ตัวแปรการแตกของอนุภาคสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.3) ซึ่ง  $D_{10f}$  คือขนาดของเม็ดที่มีประสิทธิภาพของการแยกชั้น (เกรด) ครั้งสุดท้าย  $D_{10i}$  คือขนาดของเม็ดที่มีประสิทธิภาพของการแยกชั้น (เกรด) ในตอนเริ่มต้น

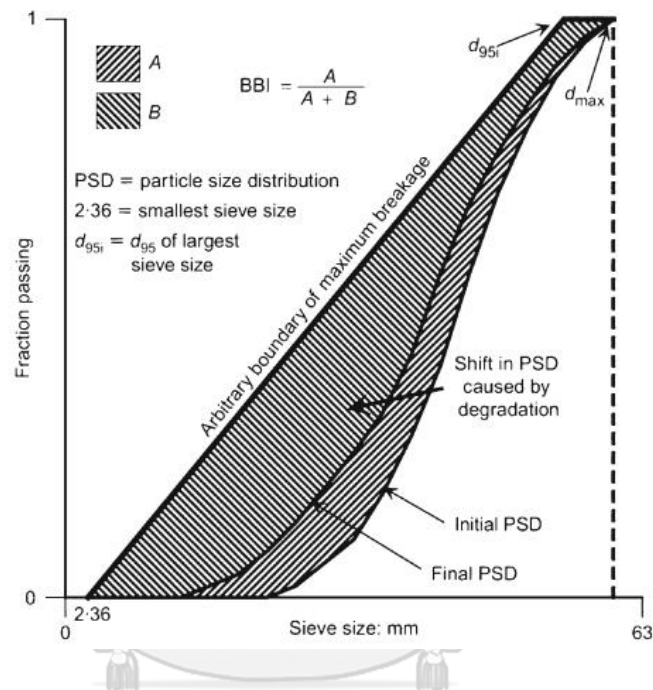
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$B_{10} = 1 - \frac{D_{10f}}{D_{10i}} \quad (2.3)$$

อ้างอิงจาก (Indraratna, Lackenby, & Christie, 2005) ได้แนะนำดัชนีการแตกของหินโรยทาง (Ballast Breakage Index (BBI)) แบบใหม่เพื่อตรวจสอบการแตกของรางรถไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหินโรยทาง การคำนวณ BBI ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของการกระจายขนาดคละ (Particle Size Distribution (PSD)) ของหินโรยทางก่อนและหลังจากทดสอบ BBI สามารถคำนวณได้จากสมการ (3) ซึ่งตัวแปร A คือพื้นที่ที่ล้อมด้วยหินโรยทาง แผนผังแสดงการกระจายขนาดคละ (Particle Size

Distribution (PSD)) ก่อนและหลังการทดสอบ B เป็นพื้นที่ยึดติดกับการแยกชั้น (เกรด) หินโรยทาง ครั้งสุดท้ายและเส้นที่กำหนดเอง (arbitrary line) ของการแตกสูงสุด

$$BBI = \frac{A}{A + B} \quad (2.4)$$



รูปที่ 13 ดัชนีการแตกหินโรยทาง (Indraratna et al., 2005)

วิธีการที่ได้อธิบายไว้ด้านบนส่วนใหญ่ใช้ในการกรองวัสดุก่อนและหลังการทดสอบ ในระหว่าง ทศวรรษที่ผ่านมา เทคโนโลยีแมชชีนวิชัน (machine vision) และการแยกข้อมูลภาพ (image segmentation) ได้ถูกใช้ในฐานวัสดุและเครื่องมือที่แม่นยำสำหรับวัดขนาดอนุภาคส่วนผสมและ ลักษณะของรูปร่างที่รวดเร็ว เชื่อถือได้ และเข้ากับยุคสมัยเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการดั้งเดิมที่วัด โดยมนุษย์ อ้างอิงจาก (Qian, Mishra, Tutumluer, & Kazmee, 2015) มีการศึกษาในห้องปฏิบัติการและภาคสนามต่อการเข้าถึงคุณสมบัติการเสื่อมสภาพของหินโรยทางโดยใช้การ ทดสอบ Los Angeles Abrasion (LAA) และเทคนิคการใช้ภาพ โดยการใช้เทคนิค Enhanced-University of Illinois Aggregate Image Analyzer (E-UIAIA) แสดงผลที่ประสบความสำเร็จในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของอนุภาค (Qian et al., 2014)

อ้างอิงจาก (Vadood, Johari, & Rahaei, 2014) ซึ่งให้เห็นว่าการจัดชั้น (เกรด) ส่วนผสมของยางมะตอย (asphalt) ร้อนโดยใช้กระบวนการทางภาพถ่าย กระบวนการของการศึกษานี้จำเป็นต้องตัดตัวอย่างทรงกระบอกเป็นชิ้นบางๆ ทำขึ้นและใช้รูปภาพจากการตัดผิวหน้าเพื่อแยกหินออกจากน้ำมันดิบ (bitumen) โดยภาพลักษณะฐานสอง (binary image) นักวิจัยเลือกวิธีการที่วาง (พื้นที่) สีในการแยกภาพและจากนั้นใช้ระยะห่างและจุดบอกรูปการเปลี่ยนแปลงของน้ำ (watershed transform) เพื่อหาขอบเขตของส่วนผสม พื้นที่ต่างๆ เส้นแกนหลักและเส้นแกนรองที่อธิบายจากค่าของจุดภาพ (pixel) ที่พอดีกับเส้นทแยงมุม ผลสรุปจากกระบวนการด้านรูปภาพนี้พบว่าสามารถถูกใช้เพื่อประเมินชั้น (เกรด) ส่วนผสม (ขนาดส่วนผสมสูงสุด 12.5 มม. และ 19 มม.)

## 2.5. การลดความเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

### 2.5.1 ทางเลือกในการลดความเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

ตามที่อธิบายไว้ในส่วนสุดท้ายถึงการเสื่อมสภาพของหินโรยทางมีสาเหตุมาจากความผิดพลาดหลายประการบนรางรถไฟ และการแก้ปัญหาการแตกของหินโรยทางโดยการดูแลรักษาด้วยการบดอัด (tamping) ที่ทำอยู่ทั่วไปซึ่งส่งผลกระทบต่อที่ตามมา จนกระทั่งมีการแทนที่ของหินโรยทางเพื่อปรับปรุงการวางจัดเรียงแนวของทางรถไฟและความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก (load-bearing capacity) เพื่อลดความต้องการในการดูแลรักษาหินโรยทาง เทคนิคการรักษาความเสถียรของวัสดุเม็ดจำนวนมากถูกศึกษาเพื่อพัฒนาคุณสมบัติด้านกลไกของส่วนผสมหินโรยทาง อย่างเช่น: การใช้แรงเสริมสองมิติ (two-dimensional reinforcements) [วัสดุใยสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับเสริมแรงในดิน (geogrid) แผ่นใยสังเคราะห์ (geotextile) วัสดุสังเคราะห์เชิงประกอบ (geocomposite) (ส่วนผสมของวัสดุใยสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับเสริมแรงในดิน (geogrid) และแผ่นใยสังเคราะห์ (geotextile)] ช่วยลดการทรุดตัว (settlement) ของทางรถไฟตามที่ยืนยันผ่านการศึกษาระดับห้องปฏิบัติการจำลอง (model-scale laboratory) อ้างอิงจาก (Indraratna et al., 2006) นับตั้งแต่ทศวรรษที่ผ่านมา มีการศึกษาการพัฒนาหินโรยทาง โดยมีวัสดุที่มีความยืดหยุ่นซึ่งมีหลายคุณสมบัติ ได้แก่ ลดการเสื่อมสภาพของหินโรยทางเพื่อปรับปรุงความเสถียรของโครงสร้างทางรถไฟ บางทีอาจจะเพิ่มอายุการใช้งาน พร้อมทั้งลดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวน ด้วยเหตุนี้ จึงมีการปรับปรุงความยืดหยุ่นตามแนวตั้ง (vertical elasticity) ของโครงสร้างทางรถไฟตามที่ได้อธิบายไว้ด้านล่าง

### 2.5.1.1 อนุภาคของยางบด

ยางบดเป็นวัสดุที่ได้มาจากเศษยางรถยนต์หรือยางอื่นๆทำให้เป็นรูปแบบเม็ดเล็กๆ ในการที่จะนำวัสดุนี้กลับมาใช้ใหม่มีการใช้ยางบดเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของทางรถไฟโดยการผสมส่วนต่างเข้ากับอนุภาคหินโรยทาง ซึ่งอาจจะลดการเสีรูปร่างของหินโรยทางและการใช้ส่วนผสมตามธรรมชาติ ตัวอย่างประกอบด้วยร้อยละที่ต่างกันของยางบดซึ่งถูกศึกษาในห้องปฏิบัติการโดยใช้กล่องหินโรยทาง การทรุดตัว (settlement) และความแข็งแรงในแนวตั้ง (vertical stiffness) ของชั้นหินโรยทางคือตัวแปรหลักในการวัดค่า การแตกของอนุภาคถูกกำหนดปริมาณในแต่ละการทดสอบ ซึ่งจำเป็นต้องวัดก่อนและหลังการทดสอบ ผลแสดงว่าการใช้ยางบดที่มีค่า 10% สามารถลดการเสื่อมสภาพและความแข็งแรง (stiffness) การส่วนผสมที่มีความยืดหยุ่น 10% ยังสามารถลดการทรุดตัว (settlement) ตามที่ได้ศึกษาในห้องปฏิบัติการ อ้างอิงจาก (M. Sol-Sánchez et al., 2015)

ยิ่งไปกว่านั้นอ้างอิงจาก (Fathali et al., 2016) การประเมินอิทธิพลของส่วนผสมที่มาจากยางรถยนต์ (tire-derived aggregate (TDA)) ในการทำงานของวัสดุหินโรยทาง การทดสอบใช้ของเสีย TDA ผสมกับหินโรยทางในชั้น (เกรด) เดียวกันเพื่อลดการเสื่อมสภาพและเสีรูปร่างหินโรยทางกล่องหินโรยทางด้วยขนาดความยาว 700 มม. กว้าง 290 มม. และความสูง 400 มม. ใช้เพื่อปรับปรุงการเสีรูปร่างของลักษณะหินโรยทาง และการแตกของหินโรยทางภายใต้รอบการรับน้ำหนักขยายนัย (cyclic sinusoidal loads) ที่ความถี่ 3 Hz ถูกใช้ที่ 100,000 รอบต่อบล็อก (กว้าง 285 มม. ความยาว 215 มม. และความสูง 100 มม.) การทดสอบบนตัวอย่างหินโรยทาง ศึกษาหินโรยทางบริสุทธิ์ 10% และ 20% โดยน้ำหนักของ TDA แสดงว่าการเสื่อมสภาพของหินโรยทางบริสุทธิ์อาจจะลดลงไปถึง 47.48% และ 70.50% สำหรับ TDA 10% และ 20%



รูปที่ 14 หินโรยทางและการผสมวัสดุยางบดในกล่องอุปกรณ์ (M. Sol-Sánchez et al., 2015)

### 2.5.1.2 Ballast mat

การวัดผลอีกอย่างหนึ่งที่ประยุกต์สำหรับการหน่วง (damping) ของการสั่นสะเทือนและการดูดซับพลังงานจากการโดยสารรถไฟ คือการใช้แผ่นรองพลาสติกด้านการสั่นสะเทือน (elastic anti-vibration mat) ระหว่างชั้นหินโรยทางกับโครงสร้างด้านบน (ทางรถไฟที่ปูหินโรยทางแล้ว) หรือใต้แผ่นคอนกรีต (ทางรถไฟที่เป็นแผ่น) แผ่นรองนี้เป็นส่วนประกอบสำคัญในบริเวณ (อุโมงค์ สะพาน สถานีที่ยกระดับสูง พื้นตัด พื้นที่สักราง เป็นต้น) ซึ่งส่วนประกอบที่มีความยืดหยุ่นมีความจำเป็นบนโครงสร้างรางรถไฟเพื่อลดแรงดิ่งบนโครงสร้างพื้นฐานบนการสั่นสะเทือนและระดับเสียงด้วย อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงในการออกแบบและสิ่งประกอบขึ้น ทั้งหมดของแผ่นรองเหล่านี้สามารถที่จะดูดซับผลกระทบจากการรับน้ำหนักและการสั่นสะเทือนที่เกิดจากระบบทางรถไฟ อ้างอิงจาก (M. Sol-Sánchez et al., 2015) ยังช่วยรักษาประสิทธิภาพการใช้งานแม้แต่หลังจากการเพิ่มจำนวนการบรรทุกน้ำหนักซ้ำๆ และในสภาพภูมิอากาศที่หลากหลาย ยิ่งไปกว่านั้น มีการใช้ยางรถยนต์รีไซเคิลเพื่อมาเป็นแผ่นรองหินโรยทาง (ballast mat) และการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า เป็นสาเหตุในการเพิ่มขึ้นของการยึดตัวเนื่องจากผลของการลดลงของความแข็งแกร่ง (stiffness) และการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่จลศาสตร์ ซึ่งอาจจะเหมาะสมต่อการลดการเสื่อมสภาพของทางรถไฟ อ้างอิงจาก (Miguel Sol-Sánchez, Moreno-Navarro, & Rubio-Gámez, 2014)

### 2.5.1.3 แผ่นรองใต้หมอนรถไฟ (Under sleeper pads)

แผ่นใต้แผ่นหมอนรถไฟ (USP) เป็นแผ่นที่มีความยืดหยุ่นที่ติดอยู่ใต้หมอนรถไฟในฐานะตัวแนบเพื่อปรับความยืดหยุ่นให้เพิ่มขึ้นของทางรถไฟ ระหว่างหมอนรถไฟและหินโรยทาง วัตถุประสงค์ทั่วไปของการติดตั้ง USP คือเพื่อความแข็งแกร่งของโมดูลัสของทางรถไฟ ลดการสั่นสะเทือนของพื้นดิน และลดการแตกของหินโรยทาง มีการศึกษาเกี่ยวกับแผ่นรองใต้หมอน (USP) ด้วยความหนา 10 มม. ติดไว้ใต้หมอนคอนกรีตเพื่อปรับปรุงความยืดหยุ่นของรางรถไฟ ในการที่จะปกป้องหินโรยทาง อ้างอิงจาก (Hunt & WINKLER, 1997; Lundqvist & Dahlberg, 2005) ได้แนะนำว่าการใช้ความสามารถใต้หมอนรถไฟเพื่อลดแรงดิ่งระหว่างหินโรยทางที่เชื่อมต่อกับหมอนรถไฟและเป็นการแก้ไขปัญหาคือดีกว่าเพื่อใช้เพิ่มวงจรอายุการใช้งานของหินโรยทางบนทางรถไฟ

จากการทดลองภาคสนามกว่าหนึ่งปีพบว่า USP ที่แนบอยู่ใต้หมอนรถไฟมีแนวโน้มที่จะลดสัญญาณของการแตกของหินโรยทางที่อยู่ใต้และอยู่รอบๆหมอนรถไฟ USP ยิ่งไปกว่านั้น มีการใช้ยาง

รถยนต์แยกชิ้นส่วนเป็นส่วนประกอบที่มีความยืดหยุ่นบนรางรถไฟโดยการประเมินอิทธิพลของความหนา ความสามารถในการต้านทานของส่วนประกอบและลักษณะในกล่องหินโรยทาง อ้างอิงจาก (Kaewunruen & Remennikov, 2015) ตามการทดลองของพวกเขาพบว่า USP จากยางรถยนต์ที่ใช้ (ความหนาระหว่าง 4-11.5 มม.) และความเหมาะสมของค่าความแข็งแกร่ง (stiffness) ถูกใช้เป็นส่วนประกอบที่มีความยืดหยุ่นแบบนุ่มบนทางรางรถไฟ แม้ว่าอย่างน้อยบางกว่า USP มาตรฐาน ซึ่งมีความหนาไปจนถึง 20 มม. อ้างอิงจาก (M. Sol-Sánchez et al., 2015)



รูปที่ 15 แผ่นรองใต้หมอนรถไฟ (Kaewunruen & Remennikov, 2015)

อย่างไรก็ตามอ้างอิงจาก (Rudolf Schilder, 2013) ได้อธิบายถึงการติดตามผลหลังจากที่มีการติดตั้งแผ่นรองใต้หมอนรถไฟชี้ให้เห็นว่าการติดตั้งแผ่นรองใต้หมอนรถไฟมีส่วนร่วมในการประหยัดงบประมาณในการบำรุงรักษาได้จริง ซึ่งผลจากการติดตามทำให้ทราบว่า การติดตั้งแผ่นรองใต้หมอนรถไฟเพื่อเป็นชั้นยืดหยุ่นระหว่างหมอนคอนกรีตและหินโรยทางช่วยลดแรงดันที่เกิดขึ้นกับหินโรยทางเนื่องจากการเพิ่มพื้นที่สัมผัสและลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาทาง นอกเหนือจากการช่วยในเรื่องของผลกระทบต่อทางด้านเศรษฐกิจแล้ว ยางรองใต้หมอนรถไฟ ยังป้องกันการสั่นสะเทือนและลดเสียงรบกวนจากโครงสร้างรวมไปถึงการลดความเสียหายของพื้นผิวราง

จนถึงปัจจุบัน ยางรองใต้หมอนรถไฟ ส่วนใหญ่ล้วนผลิตมาจากโพลียูรีเทน (polyurethane, PUR) ยาง (rubber) และ ไวนิลอะซิเตทเอทิลีน (ethylene vinyl acetate, EVA) โดยมีการจำแนกประเภทของยางรองใต้หมอนรถไฟจากค่าความแข็ง โดยจากภาคสนามสรุปได้ว่าการติดตั้งแผ่นยางรองใต้หมอนรถไฟที่มีค่าความแข็งปานกลางไปจนถึงแข็งมากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางรถไฟให้ดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยการส่งผลให้เกิดแรงกระแทกของล้อที่กระทำต่อรางลดลงในจุดตำแหน่งเปลี่ยนผ่านของทางรถไฟ พฤติกรรมดังกล่าวเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความ



เสถียรภาพและความเสียหายอย่างรุนแรงกับทางรถไฟบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน ดังนั้นบริเวณดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีรอบการบำรุงรักษาที่มากกว่าทางรถไฟในบริเวณอื่น ดังนั้นการใช้แผ่นยางรองใต้หมอนจะช่วยชะลอการเสื่อมสภาพของทางรถไฟให้มีอายุการใช้งานนานขึ้นรวมถึงลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา อีกทั้งยังสามารถลดความหนาของชั้นหินโรยทาง รวมไปถึงการลดปัญหาสันรางเป็นคลื่นร่องลึก (long pitch corrugation) ในส่วนความแข็งที่อ่อนถึงปานกลางนั้นสามารถที่จะช่วยลดการสั่นสะเทือนต่อพื้นดิน

นอกจากนี้อ้างอิงจาก (Omodaka และคณะ, 2016) ได้สรุปผลจากการทดลองว่าภาวะของการทรุดตัวของรอยทางระหว่างช่วง 100,000 ถึง 10,000,000 kN เริ่มต้นมีแนวโน้มที่จะลดลง 40% ด้วยแผ่นรองใต้หมอนรถไฟ เทียบกับไม่มีแผ่นรองยางใต้หมอนรถไฟ ดังนั้นคาดว่าค่าบำรุงรักษาจะลดลง 40% ด้วย รวมทั้งในการวัดความต้านทานด้านข้างของหินโรยทางโดยหมอนรถไฟที่มีแผ่นรองใต้หมอน จะมีความต้านทานสูงกว่าหมอนรถไฟที่ไม่มีแผ่นรองใต้หมอน

## 2.5.2 ปัจจัยอิทธิพลที่ทำให้เกิดต้นทุนของทางรถไฟ

### 2.5.2.1 โมดูลัสของทางรถไฟ (Track modulus)

โมดูลัสของทางรถไฟ (Track modulus) กระทบต่อองค์ประกอบต่างๆของทางรถไฟรวมถึงชั้นหินโรยทาง มีการศึกษาความยืดหยุ่นของวัสดุเพื่อปรับปรุงชั้นหินโรยทางให้ดีขึ้น เพื่อลดการแตกและการทรุดตัว (settlement) ของหินโรยทาง การใช้วัสดุที่ทำจากยางไม่เพียงแต่ส่งผลต่อหินโรยทาง แต่ยังเปลี่ยนแปลงโมดูลัสของทางรถไฟ (Track modulus) บนโครงสร้างนี้ด้วย อ้างอิงตามการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ยางบด พวกเขาพบว่าการใช้อนุภาคยางที่มีคุณภาพสูง (โดยค่า 20% และ 30%) สามารถทำให้เกิดระยะโค้งตามแนวตั้งที่มากเกินไปของหินโรยทางและเพิ่มการทรุดตัว (settlement) ในหินโรยทาง ซึ่งความแข็งแรงแรง (stiffness) ของหินโรยทางก็ลดลงด้วย การลดความแข็งแรงแรง (stiffness) ของหินโรยทางลงเนื่องจากการลดลงของค่าโมดูลัสทางรถไฟซึ่งมีผลกระทบต่อ การทรุดตัว (settlement) ที่สูงของชั้นหินโรยทาง ยังส่งผลให้องค์ประกอบอื่นๆของรางรถไฟ เสื่อมสภาพได้อีกด้วย และจำเป็นต้องใช้ต้นทุนในการดูแลรักษาทางรถไฟที่มากขึ้น อ้างอิงจาก (Miguel Sol-Sánchez et al., 2014)

### 2.5.2.2 วงจรต้นทุน

โดยนำหน้าหินโรยทางและโดยมูลค่าของหินโรยทางเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของทางรถไฟ และหินโรยทางเป็นส่วนที่สำคัญมากในด้านต้นทุนทางวิศวกรรมการรถไฟในการซื้อและกระจายหินโรยทางในการก่อสร้างและการดูแลรักษา ในการที่จะลดจำนวนแรงงานลงจำเป็นต้องดูแลรักษาหินโรยทางที่มีอยู่บนทางรถไฟ มีการวิจัยและพัฒนากระบวนการดูแลรักษาทางรถไฟอย่างน้อยที่สุดไปถึงการป้องกันผลกระทบต่อการดำเนินงานของรถไฟ เช่น การดูแลรักษาทางรถไฟเบื้องต้น (อย่างง่าย) (TC Type Low-maintenance Track) ซึ่งมีลักษณะที่ช่วยลดการใช้แรงงานและมีประสิทธิภาพในการลดต้นทุน นอกจากนี้ มีการใช้ยางบด (crumb rubber) ซึ่งทำให้อัตราการคงที่ (settlement) เพิ่มขึ้นต่อรอบการบรรทุกที่ต่ำกว่าที่บันทึกไว้อย่างมากสำหรับตัวอย่างที่นำมาอ้างอิง ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การใช้ยางบด 10% สามารถเพิ่มการใช้งานที่นานขึ้นของชั้นหินโรยทางตามแนวโน้มต่อเนื่องในระหว่างระยะเวลาการใช้งานของวัสดุ ดังนั้นสามารถสรุปว่ายางบดเป็นผสมที่มีความยืดหยุ่นที่อาจจะเหมาะสมกับการลดการเสื่อมสภาพของรางรถไฟที่เชื่อมโยงกับการยึดต่อของหินโรยทางและลดแรงงานในการดูแลรักษาซึ่งต้องใช้งบประมาณ อ้างอิงจาก (M. Sol-Sánchez et al., 2015) ในทางเดียวกัน การใช้วัสดุสังเคราะห์เชิงประกอบ (geocomposites) การนำหินโรยทางกลับมาใช้อีกครั้งเพื่อลดดัชนีการแตก และการใช้วัสดุใยสังเคราะห์ (geosynthetics) สามารถให้ความเสถียรแก่หินโรยทางที่กลับมาใช้ซ้ำ ซึ่งอาจจะเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการลดต้นทุนไปจนถึงต้นทุนการดูแลรักษาทางรถไฟที่ต่ำที่สุดอ้างอิงจาก (Indraratna et al., 2006)

เนื่องจากวงจรถนต้นทุนสามารถนำมาประกอบกับค่าการเสื่อมราคาค่าใช้จ่ายสำหรับการลงทุนทางรถไฟซึ่งหารด้วยอายุการใช้งาน) การลดวงจรถนต้นทุน สามารถทำได้โดยการลดต้นทุนการลงทุนอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นของทางรถไฟ ลดค่าบำรุงรักษา (tamping, grinding, ballast cleaning) ทั้งนี้มีการศึกษาเกี่ยวกับการคำนวณหาค่าของวงจรถนต้นทุนอ้างอิงจาก (Rudolf Schilder, 2013) ได้กล่าวว่าการใช้ค่าพารามิเตอร์ทางเศรษฐกิจที่มีความสำคัญเข้ามาวิเคราะห์โดยการใช้อัตราผลตอบแทนภายใน (The internal rate of return, IRR) และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) ผลสรุปจากการลงทุนเห็นผลว่ามีอัตราผลตอบแทนที่ 5% ต่อทุกระดับการดำเนินการทางรถไฟ อีกทั้งในแง่ของการลดต้นทุนการใช้แผ่นรองใต้หมอนรถไฟได้มีการยืนยันแล้วว่า

ทำให้สามารถลดความหนาของชั้นหินรอยทางที่ด้านล่างของหมอนรถไฟลง 5 ถึง 10 ซม. โดยที่ไม่มีข้อเสียใด ๆ อีกด้วย

ทั้งนี้ นอกเหนือจากการซ่อมแซมและการซ่อมบำรุงแล้ว การครบอายุรอบการใช้งานของชิ้นส่วนองค์ประกอบของทางรถไฟที่ต้องเปลี่ยนก็ยังคงเป็นวงจรต้นทุนที่สำคัญต่อการลงทุนของการดำเนินงานรถไฟ เพื่อเป็นการลดต้นทุนในส่วนนี้ การยืดอายุการใช้งานชิ้นส่วนต่างๆ ของทางรถไฟเป็นสิ่งที่ช่วยลดต้นทุนค่าใช้จ่ายได้อย่างมากอีกด้วย



### บทที่ 3

#### ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานที่มุ่งเน้นศึกษาเพื่อลดจำนวนการซ่อมบำรุงทางสำหรับการใช้งานในระยะยาวของหินรอยทางโดยอาศัยการใช้แผ่นยางพารารวมควันซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติโดยที่ไม่ต้องผ่าน

กระบวนการการผลิตอะไรมานักก็ทั้งยังเป็นวัสดุจากเกษตรกรของประเทศไทยอีกด้วย จึงเป็นที่มาของการนำมาใช้เป็นวัสดุยืดหยุ่นในทางรถไฟในการทดลองครั้งนี้ ซึ่งจะทำให้ความสนใจกับพฤติกรรมของหินโรยทางเป็นหลัก โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างการใช้และไม่ใช้ตัวแผ่นยางพาราธรรมชาติ รวมถึงความแตกต่างกันของการมีและไม่มีกรวดอัดหินในระหว่างการทำทดสอบ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลทั้งก่อนเริ่มทำการทดสอบ ระหว่างการทดสอบ และหลังจากการทำทดสอบ เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยและพฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้น ภายในกล่องทดสอบหินโรยทาง จึงจะต้องมีการเตรียมวัสดุอุปกรณ์ เครื่องบันทึกผลและเครื่องทดสอบ ก่อนที่จะมีการเริ่มทำการทดสอบ แล้วจึงมาศึกษาตัวแปรต่างๆ ในแต่ละขั้นตอนของการออกแบบ

งานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 3 ขั้นตอน โดยเริ่มจากการกำหนดปัญหาและการวางแผนออกแบบการวิจัย ก่อนที่จะมีการเริ่มการดำเนินการทดสอบ โดยมีทั้งการเตรียมวัสดุโครงสร้างภายในกล่องทดสอบหินโรยทาง การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ รวมไปถึงการติดตั้งอุปกรณ์ตั้งค่าอุปกรณ์การทดสอบ แล้วหลังจากการทดสอบจึงเริ่มวิเคราะห์ผลจากการทดลอง

### 3.1. การกำหนดปัญหาและการวางแผนการออกแบบการวิจัย

จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องพบว่ามีการศึกษาและการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพของทางรถไฟมาอย่างยาวนาน ซึ่งรวมถึงการประยุกต์ใช้แผ่นรองใต้หมอนของรถไฟเพื่อวัตถุประสงค์ที่หลากหลาย แต่ไม่ค่อยมีการกล่าวถึงการใช้แผ่นรองใต้หมอนที่เป็นวัสดุธรรมชาติอย่างยางพารามาใช้เป็นวัสดุรองใต้หมอนของรถไฟมากนัก จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

โดยเริ่มจากการวางแผนและออกแบบการวิจัยครั้งนี้ ได้จำลองสภาพทางของรถไฟรวมถึงสภาวะการวิ่งผ่านของรถไฟ โดยอาศัยการทดสอบจากเครื่องกระตุ้นแรงทั้งแรงสถิตและแรงพลวัตกระทำซ้ำๆต่อหมอนรถไฟจำลองภายในตัวกล่องทดสอบหินโรยทางที่ทำขึ้น ซึ่งเป็นการตั้งค่าอุปกรณ์ทดสอบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภายในห้องปฏิบัติการ รวมไปถึงการจดบันทึกข้อมูลจากการทดสอบโดยเครื่องคอนโทรลเลอร์

ด้วยการศึกษาที่มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาถึงอนุภาคของวัสดุหินโรยทางที่เสื่อมสภาพจากการใช้งาน รวมไปถึงการเลือกใช้วัสดุยืดหยุ่นธรรมชาติเข้ามาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งจากการทดสอบนั้นมีการทดสอบทั้งกรณีที่มีแผ่นยางรองใต้หมอนรถไฟและไม่มีแผ่นยางรองใต้หมอนรถไฟเพื่อเป็นการอ้างอิงและเพื่อเป็นการเปรียบเทียบ

โดยการทดสอบมีจำนวนรอบของการทดสอบอยู่ที่จำนวน 3,000,000 รอบ เป็นการจำลองการบรรทุกน้ำหนักเพลลา (Axle load) ที่ 20 ตัน กับ 50 ตัน ซึ่งจากการอ้างอิงบทความข้างต้นพบว่ามี การบดอัดหินโรยทาง (Tamping) ประมาณการอยู่ในช่วงการใช้งานที่ 40 ถึง 70 ล้านตัน หรือระยะเวลาประมาณ 4 ถึง 5 ปี จึงเป็นที่มาและขึ้นอยู่กับความมากน้อยของจำนวนการผ่านทางแต่ละสายการเดินรถไฟ อ้างอิงจาก (Dr. Bernhard, Track Compendium 2011) ดังนั้น ทุกๆ การทดสอบเมื่อครบจำนวนรอบบรรทุกที่ครั้งละ 1,000,000 รอบ 2,000,000 รอบ และ 3,000,000 รอบจึงเป็นปัจจัยอีกอย่างในการทดสอบ ดังนั้นการนำหินโรยทางออกจากกล่องแล้วนำมาชั่งน้ำหนักและจดบันทึกเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของหินโรยทางก่อนที่จะจัดเรียงหินใหม่และนำกลับเข้ากล่องทดสอบเพื่อทดสอบจนครบรอบที่กำหนดต่อไป ซึ่งการนำหินโรยทางออกมาแต่ละครั้งเป็นการประมาณว่าถึงรอบระยะเวลาของน้ำหนักบรรทุกสะสมของหินโรยทางที่จะต้องทำการบดอัดหินโรยทาง (Tamping)

โดยการอ้างอิงจากค่าประมาณช่วงอายุการใช้งานของหินโรยทางที่มีภาระบรรทุกน้ำหนักในช่วง 40 ล้านตัน ถึง 70 ล้านตัน ซึ่งสาเหตุที่ครบรอบเวลาที่จะต้องบดอัดหินใหม่นั้นยึดหลักจากภาระการรับน้ำหนักสะสมของหินโรยทางเป็นหลัก อ้างอิงจาก (Dr. Bernhard, Track Compendium)

ทั้งนี้การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการใช้แผ่นยางพาราเพื่อลดการสึกหรอของหินโรยทางและลดภาระการซ่อมบำรุงโดยแผนการทดสอบประกอบด้วยการศึกษายางพาราในกล่องทดสอบหินโรยทางซึ่งมีขนาดความยาว 60 ซม. ความกว้าง 35 ซม. และความสูง 45 ซม. ซึ่งคล้ายกับกล่องทดสอบของ (Selig and Waters, 1994) ที่สามารถใช้ในการวัด บันทึกผลและสังเกตการสึกหรอของหินโรยทาง ซึ่งกล่องทดสอบหินโรยทางนี้เสมือนเป็นการจำลองเส้นทางของรถไฟบนสะพานหรือภายในอุโมงค์ของทางรถไฟโดยจำลองเป็นการวางชั้นของหินโรยทางที่จะทดสอบบนพื้นของชั้นรองของหินโรยทางที่เป็นพื้นแข็งอาทิเช่นคอนกรีต เป็นต้น

ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมีการประยุกต์ใช้แผ่นยางพาราและไม่ใช้ในแต่ละกรณีศึกษาเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบรวมไปถึงการจัดเรียงและบดอัดของหินโรยทางใหม่เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและปรับปรุงคุณภาพของชั้นหินโรยทางต่ออายุการใช้งานในระยะยาว โดยมีการจัดทำ 7 กล่องทดสอบหินโรยทาง การทดลองโดยมี 2 ทางเลือกดังนี้ การทดสอบหินโรยทางที่ไร้ซึ่งแผ่นยางพารารองใต้หมอนรถไฟจำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และการ

ทดสอบโดยมีแผ่นยางพารารวมควั่นรองใต้หมอนรถไฟ 4 ตัวอย่าง ซึ่งมีความแตกต่างกันที่การที่หินโรยทางมีการบดอัดหินและไม่มีการบดอัดหิน โดยทำการตัดแผ่นยางพารารวมควั่นให้ได้ตามขนาดเท่ากับ ความกว้างและความยาวของหมอนรถไฟจำลองที่จะทดสอบโดยมีขนาดที่ ความยาว 30 ซม. ความกว้าง 25 ซม. และควบคุมความหนาที่ 15 มม. ทุกแผ่น

กล่องทดสอบหินโรยทางได้ถูกวางไว้ในโครงสร้างรับน้ำหนักเพื่อให้รับน้ำหนักจากการทดสอบที่มีการใช้แรงกระทำซ้ำตามแนวตั้งจากเครื่องทดสอบไฮดรอลิกและปริมาณของแรงที่กระทำต่อชิ้นส่วนของหมอนรถไฟถูกกำหนดจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยโปรแกรม GEOTRACK ซึ่งจากการทดสอบจะทำให้เกิดความดันขึ้นภายในหมอนของรถไฟถ้าน้ำหนักลงสู่ชั้นของหินโรยทางโดยจำนวนรอบของแรงที่กระทำเป็นลักษณะไซน์เวฟแบบกระทำซ้ำที่ความถี่ 5 เฮิรตซ์ โดยแรงกระทำหนึ่งรอบเท่ากับล้อรถไฟหนึ่งเพลาล่นผ่านทางรถไฟ

### 3.2. ดำเนินการทดสอบ

สำหรับการดำเนินการทดสอบ แบ่งการทดสอบออกเป็น 4 ระยะ คือ

#### ● ระยะที่1.การจัดเตรียมวัสดุ อุปกรณ์

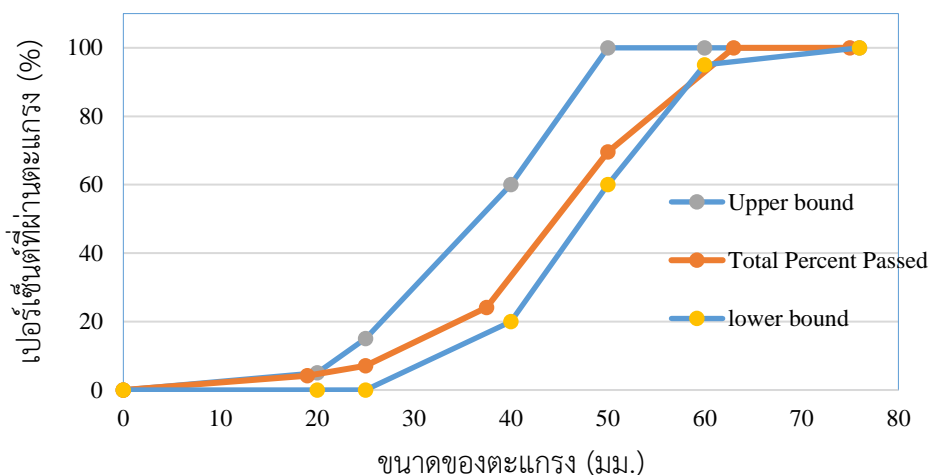
##### 3.2.1) คุณสมบัติพื้นฐานและการจัดเตรียมหินโรยทาง

โดยหินโรยทางที่ใช้ในศึกษานี้ มีต้นกำเนิดมาจากจังหวัดสระบุรี มีนประกอบด้วยหินไรโอไลต์ (Rhyolite) และ หินแอนดีไซต์ (Andesite) ใช้สำหรับเป็นหินโรยทางของทางรถไฟในโครงการก่อสร้างทางคู่ (Double track) ในปี พ.ศ.2561 คุณสมบัติหลักทางกายภาพและทางด้านกลไกของวัสดุผสมที่ทดสอบได้มีการจัดการคุณภาพ (ชั้น ระดับ เกรด) แล้ว ได้แก่ ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความต้านต่อการเสียดทานของหิน และผลการทดสอบเพิ่มเติมได้ค่าดัชนีความแบน ค่าดัชนีความยาวเรียว ซึ่งให้เชื่อมั่นว่าเป็นวัสดุหินโรยทางที่เหมาะสมในการใช้เป็นหินโรยทางบนทางรถไฟโดยอ้างอิงตามข้อมูลจำเพาะของ SRT



**รูปที่ 16** ลักษณะที่ปรากฏ (Visual appearance) ของหินโรยทาง  
หนึ่งพันกิโลกรัมของหินโรยทางได้มาจากการก่อสร้าง SRT ที่เราได้ตั้งสมมุติฐานว่าหินโรย  
ทางความสอดคล้องกับข้อมูลจำเพาะของเส้นสีแดง (Redline) ในการก่อสร้าง ดังต่อไปนี้:

- Los Angeles Abrasion ต้องไม่เกินกว่าร้อยละ 25% จากการวัดผลสอดคล้องกับ ASTM C535-Gtading 1 อ้างอิงตามการทดสอบ Los Angeles Abrasion พบว่าจากการทดสอบมีค่าร้อยละเท่ากับ 16.8% หมายความว่าหินโรยทางได้มาตรฐานตามข้อมูลจำเพาะ
- ชีตจำกัดของดัชนีความแบน (flakiness index) ต้องไม่มากกว่าร้อยละ 30% โดยมวลแบนของหินโรยทางถูกจำกัด (กำหนด) เมื่อความหนาแน่นน้อยกว่า 0.6 ของขนาดปกติ ดัชนีความแบนที่ถูกตรวจสอบเชื่อมโยงกับ BS812 PART 1: (1975) จากการทดสอบพบว่าร้อยละดัชนีความแบนเท่ากับ 12.7% ดังนั้น อนุภาคหินโรยทางมีสถานะที่ยืดหยุ่นและผ่านมาตรฐานตามข้อมูลจำเพาะ
- ดัชนีความยาว (elongation index) คือความยาวของหินโรยทางที่ (มิติ (ระยะขอบเขต) ที่ดีที่สุด) มีอยู่ 1.8 เท่าของขนาดปกติและดัชนีความยาว ต้องไม่ถึง 30% โดยมวล ความยาวที่ถูกชี้วัดสอดคล้องกับ BS812 PART 1:1975) อ้างอิงตามผลสรุปจากการทดสอบพบว่าดัชนีความยาวเท่ากับ 9.7% หมายความว่าคุณสมบัติหินโรยทางผ่านมาตรฐานตามข้อมูลจำเพาะ



รูปที่ 17 แสดงการจัดคุณภาพ (ชั้น ระดับ เกรด) หินโรยทางที่ใช้ในการศึกษานี้พร้อมกับข้อมูลจำเพาะ SRT ที่ใช้เปรียบเทียบ

- 1.1) ในการทดสอบครั้งนี้ก่อนที่จะมีการนำหินโรยทางไปใส่ในกล่องทดสอบหินโรยทางนั้น หินโรยทางจะต้องมีกระบวนการ การทำความสะอาดด้วยน้ำเพื่อขจัดฝุ่นหรือสิ่งสกปรกออกจากตัวหินโรยทาง โดยการล้างน้ำและขัดถู จากนั้นนำหินโรยทางมาทำการอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียสระยะเวลาประมาณ 1 วันเพื่อให้ได้น้ำหนักของหินโรยทางผิวแห้งที่ไม่มีน้ำหนักของน้ำรวมอยู่ด้วยตามมาตรฐาน AASHTO T85 รวมถึงการคัดแยกลักษณะและสภาพของหินโรยทางโดยทำการคัดเลือกเฉพาะหินไรโอไลต์ (Rhyolite) หรือหินที่มีลักษณะตัวของหินมีสีม่วงแดง เพื่อการควบคุมตัวแปรที่จะส่งผลต่อการทดสอบในภายหน้า อีกทั้งหินไรโอไลต์ ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.79 ซึ่งมากกว่า หินแอนดตีไซต์ (Andesite) ที่มีความถ่วงจำเพาะเพียง 2.71





รูปที่ 18 การล้างทำความสะอาดหินโรยทาง



รูปที่ 19 การอบหินโรยทางในเตาอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- 1.2) หลังจากที่ทำการอบหินโรยทางจนแล้วเสร็จ จะได้หินโรยทางที่เป็นหินโรยทางน้ำหนักผิวแห้งแล้ว เราจึงนำมาคัดขนาดของหินโรยทางด้วยวิธีการร่อนตะแกรง เพื่อแบ่งขนาดของหินโรยทางก่อนที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุผสมรวมให้ได้ขนาดคละตามต้องการที่จะใส่ลงไปภายในกล่องทดสอบหินโรยทาง



รูปที่ 20 การคละขนาดของหินโรยทางที่ใช้ในการศึกษานี้

1.3) หลังจากทำการผสมส่วนผสมหินโรยทางแล้วเสร็จจึงนำหินโรยทางออกมาเพื่อทำการเขียนเครื่องหมายบนหินโรยทางอย่างเป็นระบบโดยมีการแบ่งโซนประเภทของหินโรยทางออกเป็นจำนวน 6 โซนดังแสดงในรูปที่ 21 อ้างอิงจาก (Somkith ,2018) เพื่อศึกษาเขตโซนที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดและสังเกตการสึกหรอของแต่ละโซนการศึกษา

Crib	Sleeper Segment	Crib
L2-	M2-	R2-
L1-	M1-	R1-

รูปที่ 21 เขตโซนของหินโรยทางที่ได้ทำเครื่องหมายภายในกล่องทดสอบหินโรยทาง



รูปที่ 22 การทำเครื่องหมายเพื่อแบ่งโซนของหินโรยทาง

- 1.4) สุดท้ายของการเตรียมวัสดุหินโรยทางหลังจากเมื่อทำการเขียนเครื่องหมายบนหินโรยทางจนครบ จึงทำการชั่งน้ำหนักของหินโรยทางทั้งหมด โดยอาศัยการจดบันทึก จากเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถอ่านค่าน้ำหนักได้ที่ความละเอียด 0.01กรัม



รูปที่ 23 การชั่งน้ำหนักหินโรยทางด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก

### 3.2.2) คุณสมบัติพื้นฐานและการจัดเตรียมแผ่นยางพารา

ยางพาราที่ใช้ในการศึกษานี้ถูกใช้งานในรูปแบบของยางแผ่นรมควัน ซึ่งเป็นผลผลิตจากเกษตรกร โดยต้นกำเนิดของยางพารานี้มาจากจังหวัดสุราษฎร์ธานี สาเหตุที่ใช้ยางพารานี้เพื่อการทดสอบเพราะว่ามันเป็นผลผลิตจากพืชท้องถิ่นในประเทศไทย ไม่ต้องผ่านกระบวนการของการผลิตมากนัก โดยอาศัยการคัดสรรที่ได้มาตรฐาน ซึ่งได้จัดซื้อเป็นยางแผ่นรมควันชั้น 1 (No.1 RSS) ทั้งสิ้นที่ถูกนำมาใช้ในการทดลองในการวิจัยครั้งนี้

โดยมีมาตรฐานทั้งในประเทศคือมาตรฐานสินค้าเกษตร เลขที่ มกษ. 5906-2556 และ มาตรฐานในต่างประเทศที่ใช้อ้างอิง เช่น BIS-IS 15361: 2003 Raw Natural Rubber-Ribbed Smoked Sheet (RSS)-Guideline - IS 15361: 2003 Raw Natural Rubber-Ribbed Smoked Sheet (RSS)-Guideline

การกำหนดชั้นคุณภาพและลักษณะทางกายภาพของยางแผ่นรมควัน ดังตาราง

ชั้น 1X	ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4	ชั้น 5
●ยางแผ่น แห้ง	●ยางแผ่น แห้ง	●ยางแผ่น แห้ง	●ยางแผ่น แห้ง	●ยางแผ่น แห้ง	●ยางแผ่น แห้ง
●เนื้อแข็ง	●เนื้อแข็ง	●เนื้อแข็ง	●เนื้อแข็ง	●เนื้อแข็ง	●เนื้อแข็ง
●ไม่มีจุดพอง	●ไม่มีจุดพอง	●ไม่มีจุดพอง	●ไม่มีจุดพอง	●ไม่มีจุดพอง	●ไม่มีจุดพอง
●ไม่มีกรวด	●ไม่มีกรวด	●ไม่มีกรวด	●ไม่มีกรวด	●ไม่มีกรวด	●ไม่มีกรวด
ทราย	ทราย	ทราย	ทราย	ทราย	ทราย
●ไม่มีสิ่ง ปนเปื้อนอื่นๆ	●ไม่มีสิ่ง ปนเปื้อนอื่นๆ	●ไม่มีสิ่ง ปนเปื้อนอื่นๆ	●ไม่มีสิ่ง ปนเปื้อนอื่นๆ	●ไม่มีสิ่ง ปนเปื้อนอื่นๆ	●ไม่มีสิ่ง ปนเปื้อนอื่นๆ
●ไม่มีรอยจุด ต่าง	●ไม่มีรอยจุด ต่าง	●ไม่มีรอยจุด ต่าง	●ไม่มีรอยจุด ต่าง	●ไม่มีรอยจุด ต่าง	
●ไม่มีตำหนิ	●ไม่มีตำหนิ	●ไม่มีตำหนิ			
●สะอาด	●สะอาด	●สะอาด			
●ไม่มีราสนิม	●ไม่มีราสนิม				
●รมควัน					
สม่ำเสมอ					
●ไม่มีจุดดำ ของเปลือกไม้					

ตารางที่ 2 การกำหนดชั้นคุณภาพและลักษณะทางกายภาพของยางแผ่นรมควัน

มาตรฐาน International Standard of Quality and Packing for Natural Rubber Grades (The Green Book) รายละเอียดการจัดชั้นยางแผ่นรมควัน ดังนี้

- ยางแผ่นรมควันชั้นพิเศษ (No. 1 X RSS): ต้องเป็นยางแผ่นรมควันที่ผลิต โดยมีการควบคุม อย่างเต็มที่แผ่นยางไม่มีตำหนิไม่ปรากฏจุดหรือริ้วรอยของยางถูกรมควัน มากหรือน้อยเกินไป ยางต้องแห้งดี สะอาด รมควันสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ปราศจาก ฟองอากาศ สิ่งสกปรก หรือสิ่งแปลกปลอม
- ยางแผ่นรมควันชั้น 1 (No.1 RSS): แผ่นยางไม่มีตำหนิไม่ปรากฏจุดหรือริ้วรอยของ ยาง ถูกรมควันมากหรือน้อยเกินไป ยางต้องแห้งดีสะอาด รมควันสม่ำเสมอทั่วทั้ง แผ่น ปราศจากฟองอากาศ สิ่งสกปรก หรือสิ่งแปลกปลอม
- ยางแผ่นรมควันชั้น 2 (No.2 RSS): แผ่นยางมีราขึ้นได้บ้างเล็กน้อย แต่ต้องไม่เกิน กว่าร้อยละ 5 ของตัวอย่างที่ตรวจ อาจจะมีฟองอากาศและสิ่งสกปรกเล็กๆ บ้าง
- ยางแผ่นรมควันชั้น 3 (No.3 RSS): แผ่นยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกินกว่าร้อยละ 10 ของตัวอย่างที่ตรวจ แผ่นยางมีจุดต่างและฟองอากาศบ้าง แต่ต้องไม่มีร่องรอย ของยางถูกรมควันไม่สม่ำเสมอ ยางต้องแห้งดีสะอาด ไม่มีสิ่งแปลกปลอม ยางแผ่น รมควันที่ผลิตในประเทศไทยมากกว่าร้อยละ 80 จะเป็น ยางแผ่นรมควันชั้น 3 (RSS 3) ดังนั้นราคาอ้างอิงยางแผ่นรมควันที่ใช้กันจึงใช้ราคายางแผ่นรมควันชั้น 3 เป็น หลัก
- ยางแผ่นรมควันชั้น 4 (No.4 RSS): แผ่นยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกินกว่าร้อยละ 20 ของตัวอย่างที่ตรวจ แผ่นยางอาจมีจุดต่าง ฟองอากาศ สิ่งสกปรก ร่องรอยของ ยางถูกรมควันและสีต่างดำปาน กลาง ยางต้องแห้งดีไม่มีสิ่งแปลกปลอม
- ยางแผ่นรมควันชั้น 5 (No.5 RSS): แผ่นยางมีราขึ้นได้บ้างแต่ต้องไม่เกินกว่าร้อยละ 30 ของตัวอย่างที่ตรวจ ตำหนิที่มีได้คือ ฟองอากาศและสิ่งสกปรกใหญ่ขึ้น สีคล้ำ มากขึ้น แก่รม และยางเหนียวปาน กลาง ยางพอง และอ่อนรมได้เล็กน้อย

ชั้นของชั้นรองใต้หมอน (USP) ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติที่ใช้ในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบปฏิบัติการด้านกลไกด้วยธรรมชาติ แผ่นรองยางนี้ถูกตัดตามขนาดของหมอนรถไฟจำลอง วางลงด้านล่างของหมอนรถไฟจำลอง ซึ่งมีการควบคุมของความหนาของแผ่นรองใต้หมอนรถไฟ (USP) ในการศึกษาครั้งนี้คือ ความหนาขนาด 15 มม. ซึ่งแผ่นยางรมควันนั้นขนาดความหนาอยู่ที่ประมาณ 3 มม. ต่อแผ่นตามมาตรฐานการผลิตยางแผ่นพารากรมควัน ยิ่งไปกว่านี้ พบว่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus) ของยางพาราเท่ากับ 4.01 MPa โมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus) ถูกกำหนดโดยความเค้นต่อความเครียดของการคืนตัว (Recovering strain) ของวัสดุ ค่าของโมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus) ถูกเลือกจากค่าเฉลี่ยของโมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus) ในแต่ละรอบเมื่อความเค้นมีความเสถียร อ้างอิงจาก (Somkith,2018)



รูปที่ 24 ภาพของยางพาราแผ่นรมควันชั้น 1ที่ใช้เป็นแผ่นรองใต้หมอนรถไฟ

### 3.2.3) คุณสมบัติพื้นฐานและการจัดเตรียมหมอนรถไฟจำลอง

เนื่องจากการทดลองการวิจัยในครั้งนี้ได้จำลองคอนกรีตสี่เหลี่ยมพื้นผ้า ที่มีขนาด (ความกว้าง 250 มม. ความยาว 300 มม. และความสูง 150 มม.) ถูกใช้เพื่อจำลองเป็นส่วนของหมอนรถไฟซึ่งจะถูกวางบนจุดศูนย์กลางของชั้นหินโรยทาง บริเวณบนกล่องทดสอบหินโรยทาง ซึ่งการจัดทำหมอนจำลองนี้ต้องมีการจัดเตรียมไม้แบบ รวมถึงเหล็กโครงสร้างและการผสมปูนซีเมนต์กำลังสูง เพื่อใช้รับน้ำหนักแรงสถิตและแรงพลวัต จากเครื่องไฮดรอลิก



รูปที่ 25 โครงของไม้แบบของหมอนรถไฟจำลอง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
รูปที่ 26 หมอนรถไฟจำลอง  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

● **ระยะที่2. การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบและการตั้งค่าการทดสอบ**

หลังจากการจัดเตรียมหินโรยทาง จัดเตรียมแผ่นยางพารา และจัดเตรียมหมอนรถไฟจำลองแล้วเสร็จ โดยหินโรยทางทุกก้อนจะถูกทำสัญลักษณ์ ก่อนที่ส่วนผสมหินโรยทางจะถูกรินเข้าไปในกล่องและแยกไซนของหินโรยทางโดยแผ่นเหล็ก หินโรยทางในการศึกษานี้มีสองชั้น แต่ละชั้นมีความหนา 150 มม. และอัดให้แน่นโดยเครื่องตอกเสาเข็มแบบสั่น (Vibratory Hammer)



รูปที่ 27 เครื่องตอกเสาเข็มแบบสั่น

จากนั้นแผ่นคอนกรีตสี่เหลี่ยมพื้นผ้า (ความกว้าง 250 มม. ความยาว 300 มม. และความสูง 150 มม.) ถูกใช้เพื่อจำลองเป็นส่วนของหมอนรถไฟซึ่งจะถูกวางบนจุดศูนย์กลางของชั้นหินโรยทาง ซึ่งพื้นที่ระหว่างหมอนรถไฟและผนังแนวตั้ง (Vertical Walls) ที่เหลือจะถูกเติมภายในช่องว่างด้วยหินโรยทางที่มีความหนา 150 มม. (Crib Ballast) หลังจากการเตรียมตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว กล่องทดสอบหินโรยทางจะถูกย้ายไปที่เครื่อง Servopulser เพื่อที่จะใช้แรงบรรทุกน้ำหนักกระทำตามจำนวนรอบที่ถูกกำหนดไว้



รูปที่ 28 การแสดงภาพลักษณะและการวางหินโรยทางลงในกล่องทดสอบ

การบรรทุกน้ำหนักแนวตั้งถูกใช้กับหมอนรถไฟจำลองโดยเครื่องกระตุ้นแรงพลวัต (Dynamic Actuator) หินโรยทางรับน้ำหนักอย่างช้าๆ โดยการสั่น (Pulse) ของการรับน้ำหนักบรรทุกรูปคลื่นไซน์เวฟ (Sine Wave) ที่รอบต่ำสุดที่  $-0.4\text{kN}$  และรอบสูงสุดที่  $-28\text{kN}$  และ  $-70\text{kN}$  (เทียบเท่ากับการโดยสารหนึ่งเที่ยวของการบรรทุกน้ำหนักเพลลา (Axle Load)) ในการทดลองนี้  $-0.4\text{kN}$  คือ การจำลองน้ำหนักบรรทุกซึ่งเป็นการรับน้ำหนักของหมอนรถไฟกับรางรถไฟเป็นน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) ในขณะที่รอบของการบรรทุกน้ำหนักเพลลา (Axle Load) ที่ 20 ตัน และ 50 ตันเพิ่มไป



เป็นการบรรทุกน้ำหนักที่  $-28\text{kN}$  และ  $-70\text{kN}$  เพื่อใช้กับหมอนรถไฟที่ซึ่งถูกคำนวณจากโปรแกรม Geotrack และตัวแปรการบรรทุกน้ำหนักทางพลวัตในการคำนวณนี้ถูกแยกเป็นสองส่วน ซึ่งส่วนแรกคือเพื่อหาแรงดันภายใต้หมอนรถไฟ และส่วนที่สองคือเพื่อหาตัวแปรการรับน้ำหนักพลวัตสูงสุดอ้างอิงจากการคำนวณ พบว่าการบรรทุกน้ำหนักเพลลา (axle load) ที่ 50 ตันสามารถกำหนดเพื่อใช้ในการทดสอบนี้กับค่าสูงสุดของ  $-70\text{kN}$  เพื่อใช้ทดสอบกับส่วนที่เป็นหมอนรถไฟจำลองคอนกรีต  $25 \times 30$  ซม.

ระหว่างทดสอบการด้วยแรงกระทำซ้ำ การวัดรอบน้ำหนักที่กระทำทั้งหมดและการหลุดตัวถูกบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่อง ในตอนท้ายของแต่ละการทดสอบ หินโรยทางจะถูกนำออกมาจากกล่องทดสอบหินโรยทางอย่างเป็นระบบเพื่อระบุการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคหินโรยทาง โดยการชั่งน้ำหนักของหินโรยทางในแต่ละก้อนและโซนการศึกษา

### ● ระยะที่ 3. การวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นภายในกล่องทดสอบ

เพื่อจำลองน้ำหนักบรรทุกของขบวนรถไฟที่วิ่งผ่านทำให้เกิดแรงดันใต้หมอนรถไฟซึ่งกระทำต่อหินโรยทางจะต้องวิเคราะห์และประเมินดังต่อไปนี้:

#### 3.2.1.1 คู่มือการศึกษาหินโรยทางและแรงดันของหมอนรถไฟจากสมาคมวิศวกรมรณไฟแห่งสหรัฐอเมริกาและการบำรุงรักษา

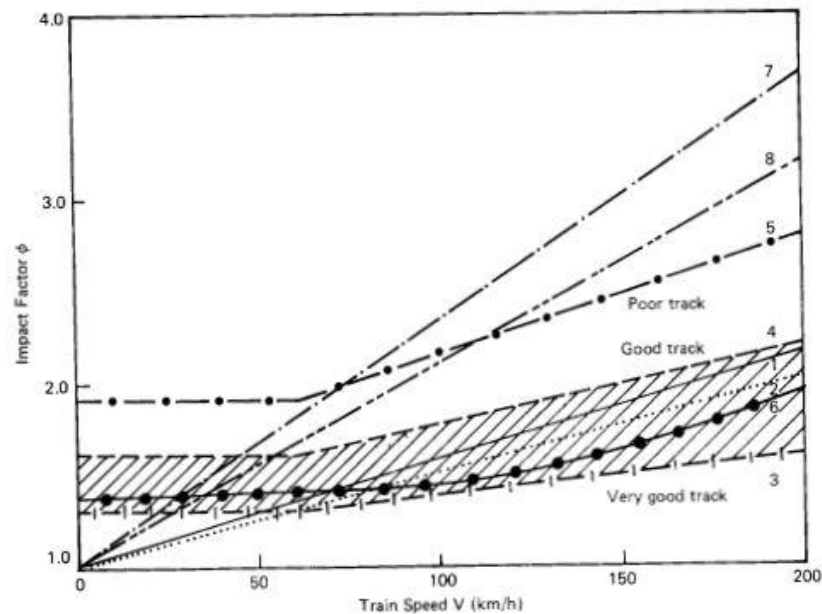
สมาคมวิศวกรมรณไฟแห่งสหรัฐอเมริกาและการบำรุงรักษา (AREMA) เสนอการประมาณค่าแรงดันที่เกิดขึ้นจากหมอนรถไฟกับหินโรยทาง โดยใช้สมการที่ (3.1) ซึ่งเป็นการอธิบายจากน้ำหนักบรรทุกชนิดแผ่สม่ำเสมอ (uniform load) ในการคำนวณนี้ AREMA แนะนำว่าควรคำนวณความดันเฉลี่ยที่ด้านล่างของหมอนรถไฟ เนื่องจากโหลดเพลลาคุณด้วยการปัจจัยการกระจายและค่าการกระแทกและหารด้วยพื้นที่แบกรับของ ตัวหมอนรถไฟ ดังแสดงในสมการที่ (3.1) (AREMA, 2011)

ประเภทของสูตรปัจจัยผลกระทบที่ใช้ในการคำนวณออกแบบโหลดของล้อในแนวตั้งเพื่อให้สามารถคำนวณการออกแบบได้น้ำหนักล้อจะกล่าวถึงด้านล่างโดยมีหลายทฤษฎีโดยผู้วิจัยเลือกใช้วิธีคำนวณสูตรปัจจัยผลกระทบจากสูตรทฤษฎีของ AREA Formula : สมาคมวิศวกรมรณไฟแห่งสหรัฐอเมริกา ถูกยกมาโดย Prause et al. (1974) สำหรับการกำหนดปัจจัยผลกระทบที่ใช้ในการคำนวณการออกแบบโหลดล้อมีผลปัจจัยเป็นหน้าที่ของความเร็วของรถและเส้นผ่าศูนย์กลางล้อดังสมการ

$$\phi(IF) = \left[ 1 + \frac{5.21V}{D} \right]$$

โดยที่ V = ความเร็วรถ (กม. / ชม.)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางล้อ (มม.)



Legend:	No.	Formula	Remarks
	1	Area	Wheel diameter = 900 mm
	2	Area	Wheel diameter = 1000 mm
	3	Eisenmann	Very good track UCL = 99.9%
	4	Eisenmann	Good track UCL = 99.9%
	5	Eisenmann	Poor track UCL = 99.9%
	6	Ore	$\beta'$ assumed = 0.20 $a_0 = 1.5$ , $b_0 = 1.2$
	7	B.R.	Class 55 Deltic Diesel Elec. $P_s = 86.2$ kN $P_u = 65$ t
	8	B.R.	Kestrel Diesel Elec. $P_s = 112.7$ kN $P_u = 2.12$ t

จากรูปภาพแสดงให้เห็นถึงค่าปัจจัยกระทบ (Impact Factor) จาก No.1 และ No.2 โดยใช้สูตรของ Area ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์จากความเร็วและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อรถไฟส่งผลต่อค่าปัจจัยกระทบดังนั้น

$$P_{avg} = \frac{(2P) \times \left[ 1 + \frac{IF}{100} \right] \times \left( \frac{DF}{100} \right)}{A} \quad (3.1)$$

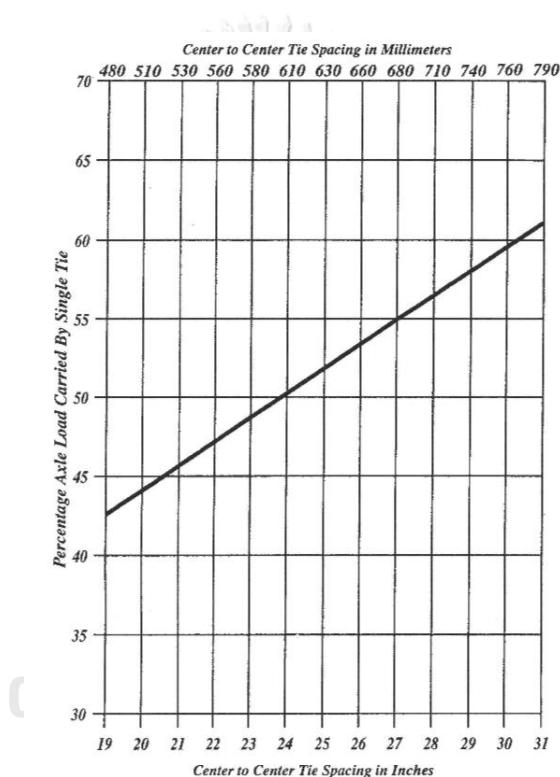
เมื่อ:  $P_{avg}$  คือค่าเฉลี่ยแรงดันที่แบกรับระหว่างหน้าสัมผัสของหินโรยทางกับหมอนรถไฟ

P คือน้ำหนักบรรทุกจากล้อรถไฟ

DF คือค่าปัจจัยการกระจายซึ่งประเมินจากรูปที่ 29

IF คือค่าปัจจัยกระทบ (Impact Factor)

A คือพื้นที่แบกรับของหมอนรถไฟที่ถูกกระทำ



รูปที่ 29 ร้อยละของโหลดบรรทุกกับระยะห่างของหมอนรถไฟเป็นปัจจัยการกระจาย (AREMA, 2011)

จากรูปที่ 29 ระยะห่างของหมอนรถไฟจากการรถไฟแห่งประเทศไทยมีค่าเท่ากับ 60 ซม. (24 นิ้ว) ดังนั้นปัจจัยการกระจายคือ 50% พื้นที่แบกรับของหมอนรถไฟที่ใช้ในการรถไฟแห่งประเทศไทยมีขนาดความกว้างอยู่ที่ 252 มม. และความยาว 2,000 มม. ในขณะที่ปัจจัยกระทบที่ใช้ในการศึกษาครอบคลุมด้วยเงื่อนไขดังนี้:

โดยยกตัวอย่างในกรณีที่เงื่อนไขไม่มีปัจจัยที่ส่งผลกระทบ

$$P_{avg} = \frac{(2P) \times \left[1 + \frac{IF}{100}\right] \times \left(\frac{DF}{100}\right)}{A}$$

$$P_{avg} = \frac{(2 \times 98066.5) \times \left[1 + \frac{0}{100}\right] \times \left(\frac{50}{100}\right)}{0.252 \times 2} = 194 \text{ Kpa}$$

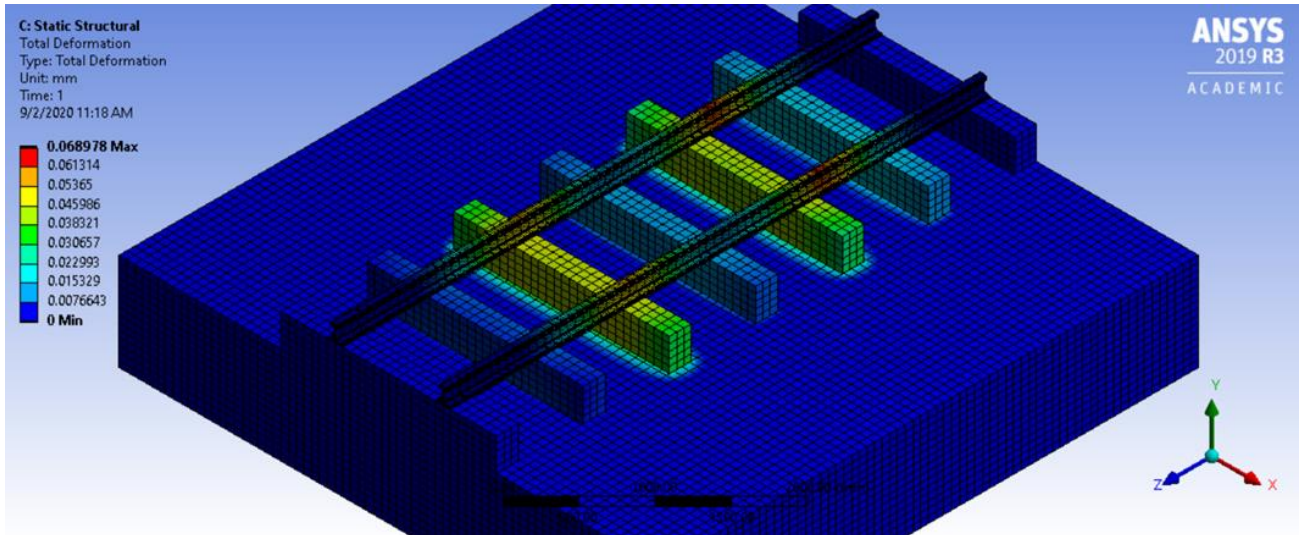
โหลดที่เกิดขึ้นได้หมอนรถไฟ =  $194 \times 2 \times 0.252 = 97.776 \text{ kN}$

### 3.2.1.2 การวิเคราะห์ด้วย ANSYS

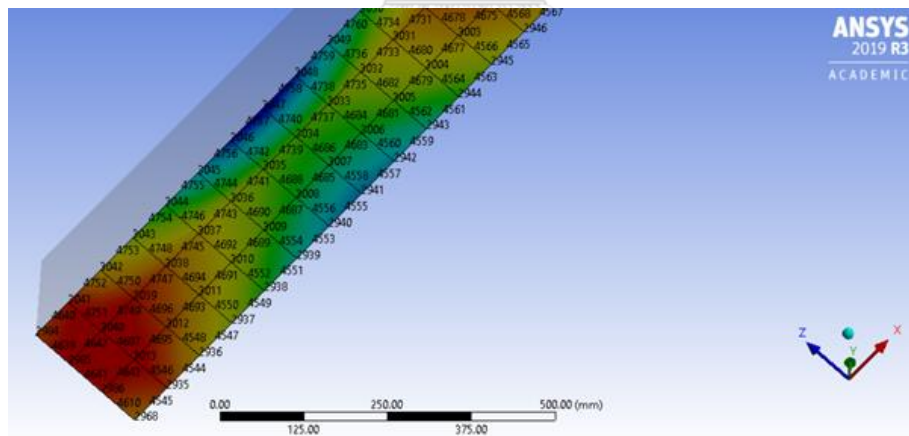
#### A) Ansys

**Ansys** คือโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์งานทางวิศวกรรมด้วยวิธี FEM (Finite Element Method) ถูกใช้ในการศึกษานี้เพื่อใช้สร้างโมเดลแบบจำลองในการวิเคราะห์โครงสร้างทางรถไฟ โดยแบบจำลองได้ถูกกำหนดลักษณะทางเรขาคณิตของทางและองค์ประกอบ อาทิเช่น ความหนาของชั้นหินโรยทาง คุณสมบัติของวัสดุ ระยะห่างของหมอนรถไฟ เป็นต้น โดยมีน้ำหนักกดเพลา 20 ตัน หรือน้ำหนักล้อที่กระทำบนราง 10 ตัน (98,067 นิวตัน) ซึ่งน้ำหนักล้อที่กระทำบนรางมี 2 จุดโดยมีระยะห่างระหว่างล้อ 1.75 เมตร จากการวิเคราะห์แบบจำลองนี้สนใจค่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายใต้หมอนของรถไฟที่มีน้ำหนักของล้อมากระทำที่กึ่งกลางของตัวหมอนรถไฟ

ภาพรวมของโมเดลจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางรถไฟ



ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายใต้ด้านข้างของหมอนรถไฟที่มีน้ำหนักมากกระทำ



โดยลักษณะทางรถไฟแบบใช้หินโรยทางทั่วไปที่ทางรถไฟบนพื้นคอนกรีต(พื้นแข็ง)  
ซึ่งได้แก่ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานในการสร้างแบบจำลองดังตารางนี้

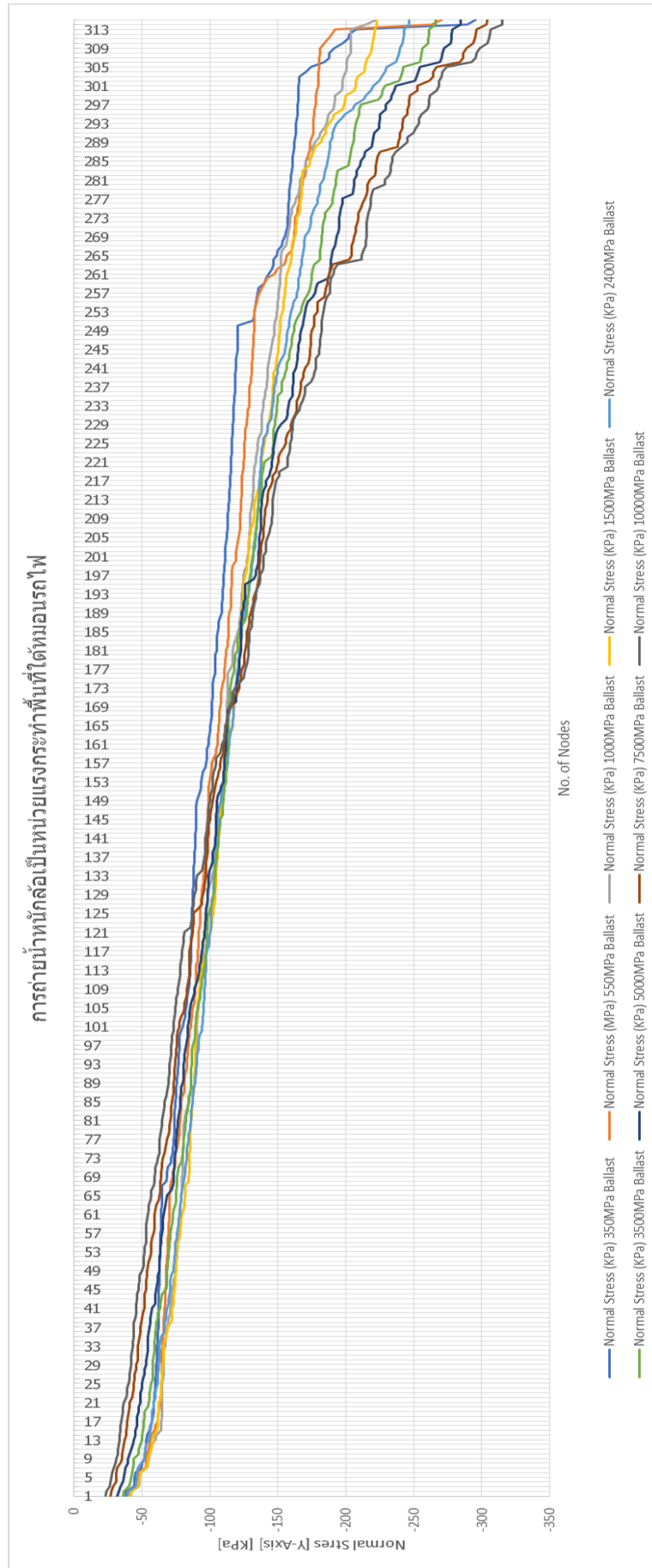
ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างทางรถไฟในแบบจำลองโมเดล

รางรถไฟ (Rails)		หมอนรถไฟ (Tie,Sleeper)	
โมดูลัส	200 GPa	ความกว้างหมอน คอนกรีต	0.2 m
ความหนาแน่น	7850 kg m <sup>-3</sup>	ความสูงหมอน คอนกรีต	0.3 m
อัตราส่วนปัวซอง	0.3	ความยาวหมอน คอนกรีต	2 m
ระยะห่างระหว่างราง	1.000 m	โมดูลัสของหมอน คอนกรีต	30000 MPa
มวล	50.18 kg/m	อัตราส่วนปัวซอง	0.15
		ระยะห่างระหว่าง หมอนรองราง (S)	0.6 m

ชั้นหินโรยทาง (Ballast)	
ความหนาแน่น	1750 kg/m <sup>3</sup>
อัตราส่วนปัวซอง	0.25
โมดูลัสยืดหยุ่น	350 MPa – 10,000 MPa
ความหนา	0.3 m

จากการสรุปผลวิเคราะห์จำลองโมเดลพบว่าค่าความเค้นเฉลี่ยที่วิเคราะห์ที่ได้มาจาก Ansys โดยสนใจที่พื้นที่ใต้หมอนของรถไฟ มีการรับน้ำหนักแรงเค้นที่แตกต่างกันในแต่ละ Nodes ของพื้นที่ชิ้นส่วนใต้ของหมอนรถไฟ โดยมีค่าแรงเค้นภายใต้หมอนรถไฟที่เกิดขึ้น ซึ่งมีจำนวนของ Nodes ที่ได้พื้นที่ของหมอนรถไฟที่สนใจอยู่จำนวน 315 Nodes โดยผู้วิจัยสนใจค่าความเค้นที่เกิดขึ้นใต้หมอนของรถไฟ โดยการใช้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Resilient modulus) ของหินโรยทางที่แตกต่างกัน ดังรูปต่อไปนี้

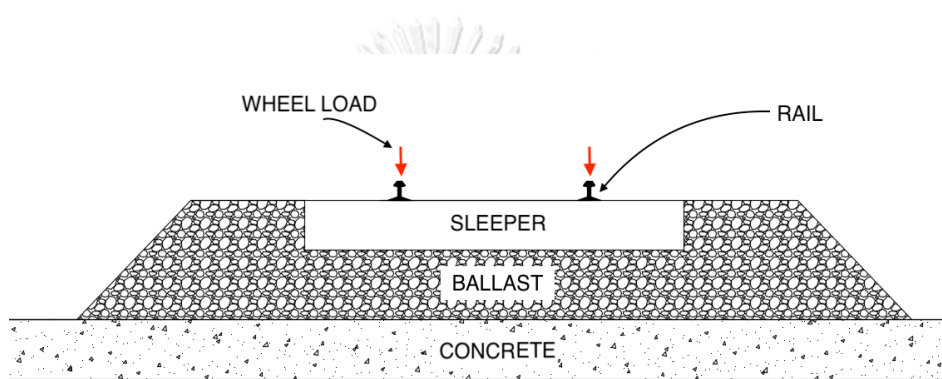
การถ่ายน้ำหนักลงเป็นหน่วยแรงกระทำพื้นที่ใต้หมอนรถไฟ



### 3.2.1.3 การวิเคราะห์ด้วย GEOTRACK

#### B) Geotrack

Geotrack คือซอฟต์แวร์ที่ใช้เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างทางรถไฟภายใต้การรับน้ำหนักแนวตั้งทางพลวัต อ้างอิงจาก (Selig & Waters, 1994) เพื่อใช้ Geotrack ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางรถไฟ หนึ่งจำเป็นต้องระบุตัวแปรที่เป็นวัสดุรูปทรงเรขาคณิตของทางรถไฟ การรับน้ำหนัก และคุณสมบัติของหินโรยทางในรายการและจากนั้นสรุปผลของการวิเคราะห์ความเค้น (stresses) ที่แสดงบนรูปภาพที่ 3.15



รูปที่ 30 ภาคตัดขวางทั่วไปของทางรถไฟที่ปูหินโรยทางแล้ว

รูปที่ 30 แสดงภาพตัดขวางของหินโรยทางที่วางบนฐาน (Foundation) ที่เป็นส่วนแข็ง คุณสมบัติของวัสดุและรูปทรงเรขาคณิตของรางรถไฟที่ใช้ใน Geotrack ได้ให้ไว้ด้านล่าง:

- คุณสมบัติของรางรถไฟ

$$E = 200 \text{ GPa}$$

$$I = 1.961 \times 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$A = 6393 \text{ mm}^2$$

$$\text{มาตรวัด (Gauge)} = 1.000 \text{ เมตร}$$

$$\text{น้ำหนักรางรถไฟ (kg/m)} = 50.18$$

$$\text{ความแข็งแรงในการยึดติดกับราง (kN/mm)} = 7.981 \times 10^5$$



- คุณสมบัติหมอนรถไฟ

การรับน้ำหนักที่กระทำบนหมอนรถไฟแรก (1<sup>st</sup>)

การเว้นช่องของหมอนรถไฟ = 60 ซม.

ความยาวหมอนรถไฟ = 2000 มม.

โมดูลัสของยัง (Young's modulus) ของหมอนรถไฟ =  $3 \times 10^4$  MPa

น้ำหนักของหมอนรถไฟ = 264 kg

$$I = 2.42 \times 10^8$$

- คุณสมบัติของโครงสร้างพื้นฐาน (Substructure)

โมดูลัสความยืดหยุ่น (Resilient modulus) ของหินโรยทาง = 350 MPa

ความหนาของหินโรยทาง = 300 มม.

โมดูลัสความยืดหยุ่น (Resilient modulus) ของชั้นรองหินโรยทาง = 200 MPa

ความหนาของชั้นรองหินโรยทาง = 300 มม.

การสมมุติฐานพื้นดิน (Subgrade) ในฐานะคอนกรีต  $M_r = 30,000$  MPa

- การรับน้ำหนัก

การรับน้ำหนักวงล้อ = 10 ตัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- FIRST SEGMENT should be 1.

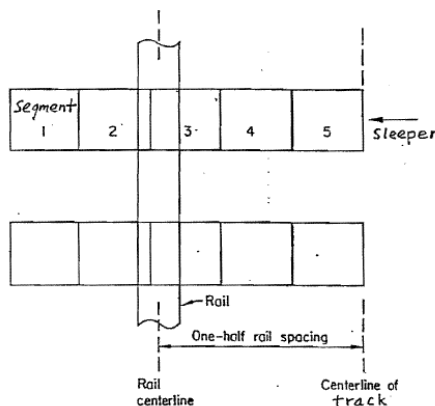
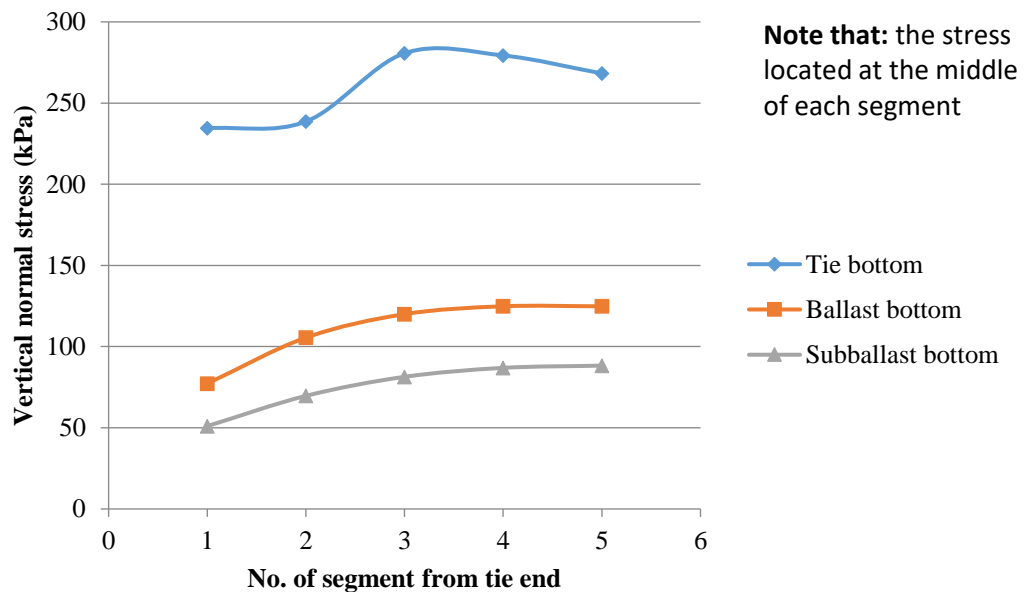


Fig. 3 Sleeper Segment Locations

- FIRST SEGMENT should be 5.



รูปที่ 31 การประเมินแรงเค้นที่เกิดขึ้นบนส่วนของหมอนรถไฟโดยการวิเคราะห์ Geotrack อ้างอิงจาก (Somkith,2018) การสรุปผลวิเคราะห์ที่ได้มาจาก Geotrack โดยแต่ละส่วนพื้นที่บนหมอนรถไฟถูกแบ่งออกเป็น 5 ส่วน จากรูปที่ 31 มีการรับน้ำหนักแรงเค้นที่แตกต่างกันในแต่ละชั้นส่วนของหมอนรถไฟ โดยมีค่าแรงเค้นภายใต้หมอนรถไฟที่เกิดขึ้นดังต่อไปนี้คือ 234.48 KPa 238.65 KPa 280.69 KPa 278.31 KPa และ 268.28 KPa ตามลำดับ ซึ่งชั้นส่วนของหมอนรถไฟที่มีการวางของรางรถไฟพบว่ามีแรงเค้นที่เกิดขึ้นภายใต้หมอนรถไฟมากที่สุด นั่นก็คือในชั้นส่วนที่3 ที่มีแรงเค้นมากถึง 280.69 Kpa จึงเป็นแรงเค้นที่เราจะนำมาวิเคราะห์เนื่องจากมีค่าที่มากที่สุดที่เกิดขึ้น

#### B) การรับน้ำหนักวงล้อจลศาสตร์สูงสุด (Ivan Vanicek, Martin Vanicek ,2008)

ความเค้นที่เกิดขึ้นภายใต้หมอนรถไฟจากทั้งสองวิธีมีความสัมพันธ์กับข้อมูลที่วัดบนโครงสร้างรางรถไฟจริง แต่ในการออกแบบการก่อสร้างทางรถไฟต้องการค่าสูงสุดเพื่อที่จะได้มีการเพิ่มปัจจัยอื่น ๆ โดยจากสมการที่ 3.2 max Q คือแรงกระทำที่เกิดขึ้นภายใต้หมอนจากการวิ่งผ่านของรถไฟ ดังสมการที่ 3.2

$$\max Q = Q_{mean} \times (1 + t.n.\varphi) \quad (3.2)$$

ซึ่ง

$t$  คือตัวแปรความน่าเชื่อถือ

$n$  คือตัวแปรสภาพทางรถไฟ

$\varphi$  คือตัวแปรความเร็ว

- สำหรับตัวแปรความน่าเชื่อถือ

ตารางที่ 3 ตัวแปรความน่าเชื่อถือ

ระดับความน่าเชื่อถือ (%)	68.3	90	95	99.7
t	1	1.65	1.96	3

- สำหรับตัวแปรสภาพทางรถไฟ

ตารางที่ 4 ตัวแปรสภาพทางรถไฟ

สภาพของรางรถไฟ	ตัวอย่างของเส้นทาง (ในประเทศเยอรมัน)	n
ดีมาก	เส้นทางสายหลักเชื่อมระหว่างเมือง	0.1
ดี	เส้นทางสายรองเชื่อมระหว่างเมืองและรถไฟในชนบท	0.15
แย่	เส้นทางอื่นๆ	0.2
แย่มาก	-	0.25

- สำหรับตัวแปรความเร็ว,  $\varphi$  สามารถหาได้จาก:

$$\text{ถ้าความเร็ว } V < 60 \frac{Km}{h} \rightarrow \varphi = 1$$

ถ้าความเร็ว  $V \geq 60 Km/h$  มีสองเงื่อนไข:

$$\text{สำหรับรถไฟโดยสาร } \varphi = 1 + \frac{V-60}{380}$$

$$\text{สำหรับรถไฟขนส่งสินค้า } \varphi = 1 + \frac{V-60}{160}$$

อ้างอิงจากสมการที่ 3.2  $\max Q = Q_{mean} \times (1 + 3 * 0.1 * 1.125)$

ในแง่ของความน่าเชื่อถือในการทดสอบนี้ใช้ระดับความน่าเชื่อถือ 99.7% ได้ถูกนำมาใช้เพราะต้องการความน่าเชื่อถือที่สูงในการทดสอบเพื่อให้ปัจจัยความน่าเชื่อถือที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ  $t = 3$  เช่นเดียวกับสภาพของทางรถไฟ เส้นทางระหว่างเมืองหลัก เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขที่ดีมากที่สุดนั้นปัจจัยเงื่อนไขคือ  $n = 0.1$  และความเร็วของรถไฟบรรทุกสินค้าเท่ากับ 80 กม. / ชม. ซึ่งปัจจัยความเร็วจะเท่ากับ 1.125

### C) สรุปผลการวิเคราะห์การถ่ายน้ำหนักล้อเป็นหน่วยแรงกดกระทำบนหมอน

อ้างอิงจาก (Somkith,2018) จากรูปภาพที่ 31 การรับน้ำหนักบรรทุกทุกเพลลา (Axle load) ที่ 20 ตันพบว่าความเค้นสูงสุดภายใต้ครึ่งหนึ่งของหมอนรถไฟเท่ากับ 280.69 KPa และความเค้นต่ำที่สุดอยู่ที่ 234.48 KPa โดยค่าเฉลี่ยความเค้นที่เกิดขึ้นกับครึ่งหนึ่งหมอนรองรถไฟในโมเดลแบบจำลองนี้อยู่ที่ประมาณ 260.27 KPa เพื่อที่จะกำหนดแรงที่เกิดขึ้นภายใต้หมอนรถไฟและหินโรยทาง ความเค้นแนวตั้งที่เกิดขึ้นจากการคำนวณ GEOTRACK จะถูกคูณด้วยพื้นที่ในแต่ละชั้นส่วนของหมอนรถไฟและผลรวมของแรงที่กระทำ โดยขนาดของหมอนรองรถไฟที่ใช้ในการรถไฟแห่งประเทศไทยมีขนาด ความกว้าง 252 มม. และ ความยาว 2000 มม. จากการวิเคราะห์จาก GEOTRACK

วิเคราะห์โดย GEOTRACK เพื่อคำนวณหาแรงภายใต้ครึ่งหนึ่งของหมอนรถไฟในแต่ละชั้นส่วน

โดยการเพิ่มการรับน้ำหนักบรรทุกทุกเพลลา (Axle load) ที่ 20 ตัน ขึ้นเป็น 50 ตัน ทำให้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์โดย GEOTRACK (รูปภาพที่ 31) มีค่าความเค้นเพิ่มขึ้นต่อทุกส่วนของหมอนรถไฟ จากเดิมเป็นดังนี้: 586.2 KPa 596.625 KPa 701.725 KPa 695.775 KPa และ 670.7 KPa ตามลำดับ โดยความยาวของหมอนรถไฟมีค่า 2000 มม. และวิเคราะห์เพียงครึ่งหนึ่งของหมอนรถไฟ ที่มีความยาว 1000 มม. ทั้งหมด 5 ชั้นส่วน

ดังสมการที่ 3.3

$$F_n = \sigma_n \times A_n \quad n \text{ คือจำนวนแต่ละส่วนของหมอนรถไฟ} \quad (3.3)$$

$$F_1 = \sigma_1 \times A_1 = 586.2 \times (252 \times 200 \times 10^{-6}) = 29.544 \text{ kN}$$

$$F_2 = \sigma_2 \times A_2 = 596.625 \times (252 \times 200 \times 10^{-6}) = 30.07 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} F_3 &= \sigma_3 \times A_3 = 701.725 \times (252 \times 200 \times 10^{-6}) \\ &= 35.367 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_4 &= \sigma_4 \times A_4 = 695.775 \times (252 \times 200 \times 10^{-6}) \\ &= 35.067 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$F_5 = \sigma_5 \times A_5 = 670.7 \times (252 \times 200 \times 10^{-6}) = 33.803 \text{ kN}$$

$$F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 = 163.851 \text{ kN}$$

### 3.2.1.3 สรุปการกำหนดหน่วยแรงที่กระทำต่อหมอนรถไฟที่ใช้

อ้างอิงจาก (Somkith,2018) จากการวิเคราะห์ทั้งวิธีการของ AREMA และ GEOTRACK พบว่าทั้งสองมีแรงที่กระทำต่อหมอนรถไฟแตกต่างกันอยู่ที่ประมาณ 24.12% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการปัจจัยผลกระทบ เนื่องจากข้อมูลของ AREMA เป็นการวิเคราะห์แรงแบบเรียบง่าย ในขณะที่ GEOTRACK เป็นแบบจำลองสามมิติ โดยทั้งสองวิธีการมีวิธีการคำนวณที่ต่างกัน ดังนั้นในการศึกษาแรงดันที่เกิดขึ้นใต้หมอนรถไฟครั้งนี้ GEOTRACK จึงถูกนำมาใช้เพราะวิธีนี้เป็นการพัฒนามาจากซอฟต์แวร์เครื่องมือคำนวณขั้นสูงและใช้ฐานข้อมูลของพารามิเตอร์ในโครงสร้างทางรถไฟ ยิ่งกว่านั้นผลลัพธ์จาก AREMA ไม่ได้ตรวจสอบปัจจัยที่ส่งผลกระทบเนื่องจากผลกระทบนี้มีความซับซ้อนและไม่ทราบว่าจะใช้ในการรถไฟแห่งประเทศไทยหรือไม่

อ้างอิงจากรูปภาพที่ 31 ผลการวิเคราะห์ GEOTRACK โดยการเพิ่มการรับน้ำหนักบรรทุกเพลา (Axle load) ที่ 20 ตัน ขึ้นเป็น 50 ตัน ทำให้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นจากเดิมมีค่าความเค้นที่สูงที่สุดคือ 280.69 KPa ทำให้ความเค้นสูงสุดภายใต้หมอนรถไฟเป็น 701.725

KPa ในการศึกษานี้ใช้ความเค้นสูงสุดนี้เนื่องจากค่านี้สามารถครอบคลุมความเค้นทั้งหมดภายใต้หมอนรถไฟที่มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ย โดยที่หมอนรถไฟจำลองที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด 25x30 ซม. ดังนั้นการรับน้ำหนักของการทดสอบสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\max Q &= 280.69 \times (0.25 \times 0.3) \times (1 + 3 \times 0.1 \times 1.125) \\ &= 28.16 \text{ kN}\end{aligned}$$

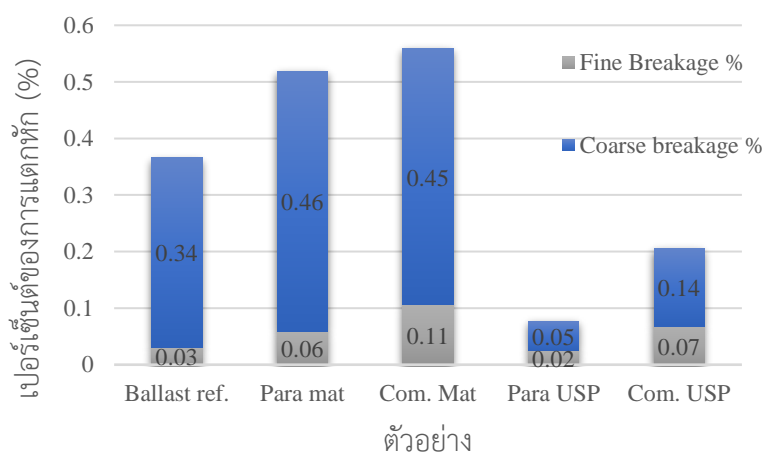
$$\begin{aligned}\max Q &= 701.725 \times (0.25 \times 0.3) \times (1 + 3 \times 0.1 \times 1.125) \\ &= 70.39 \text{ kN}\end{aligned}$$

#### ● ระยะที่4. การทดสอบนําร่อง

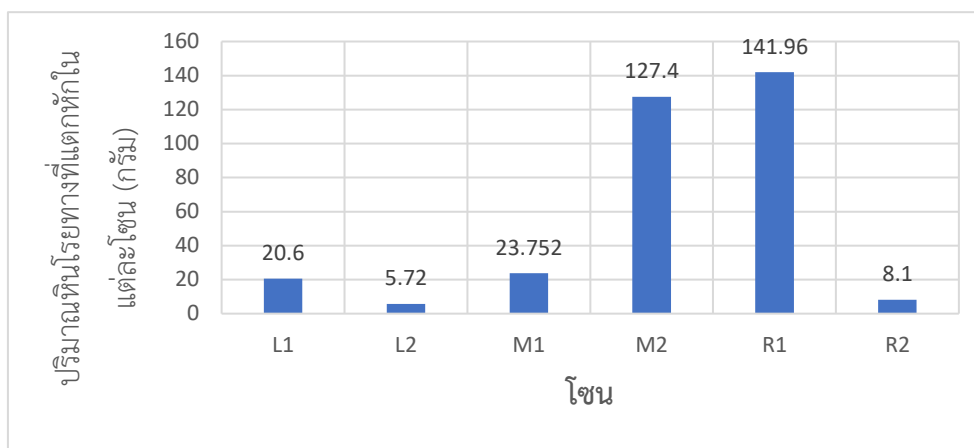
อ้างอิงจาก (Somkith,2018) พบว่าจำนวนอนุภาคของหินโรยทางหลังจากผ่านแรงกระทำซ้ำที่จำนวน 1,000,000 cyclic มีลักษณะการแตกเป็นลักษณะละเอียดและหยาบจากการแยกด้วยตะแกรงขนาด 9.5 มม.(3/8 นิ้ว) และมีการสูญเสียน้ำหนักของหินโรยทางในแต่ละโซนการศึกษาดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5 จำนวนของอนุภาคหินโรยทางที่เกิดการสึกหรอจากการทดสอบ

กล่องทดสอบหินโรยทาง	อนุภาคหินโรยทางแตกแบบละเอียด	อนุภาคหินโรยทางแตกแบบหยาบ	จำนวนของอนุภาคหินโรยทาง
Ballast Ref	758	12	770



รูปที่ 32 อ้างอิงจาก (Somkith,2018) เปอร์เซนต์ของลักษณะการแตกหักของอนุภาคหินโรยทางทั้งแบบหยาบและแบบละเอียด



**รูปที่ 33** อ้างอิงจาก (Somkith,2018) ปริมาณหินโรยทางที่แตกหักในแต่ละโซนที่แรงกระทำ 1 ล้านรอบ

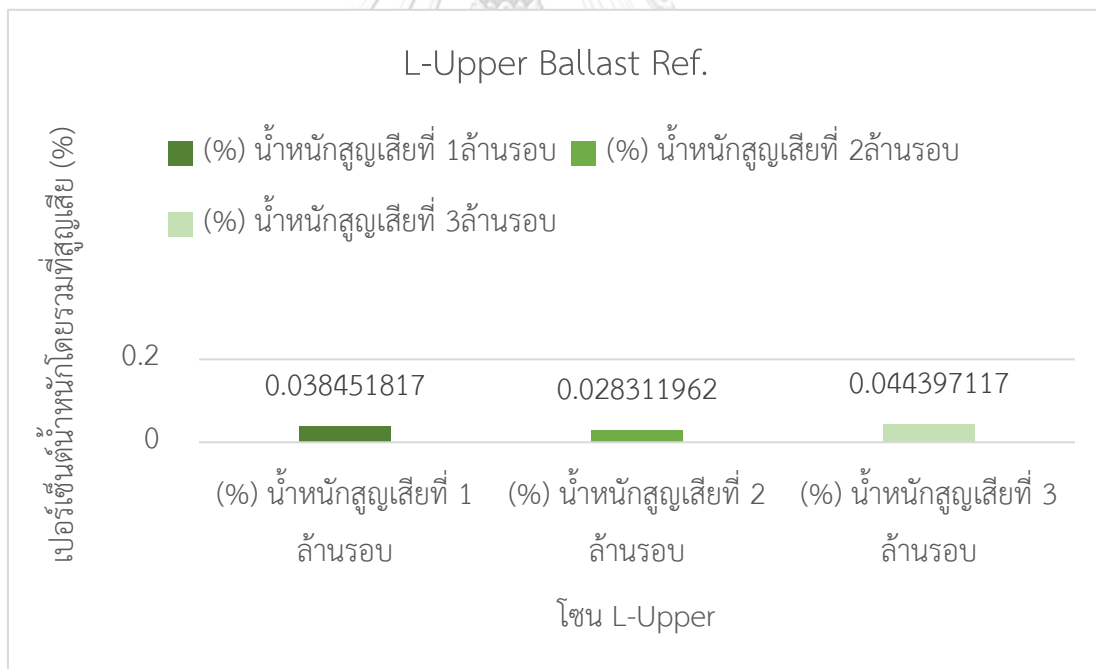
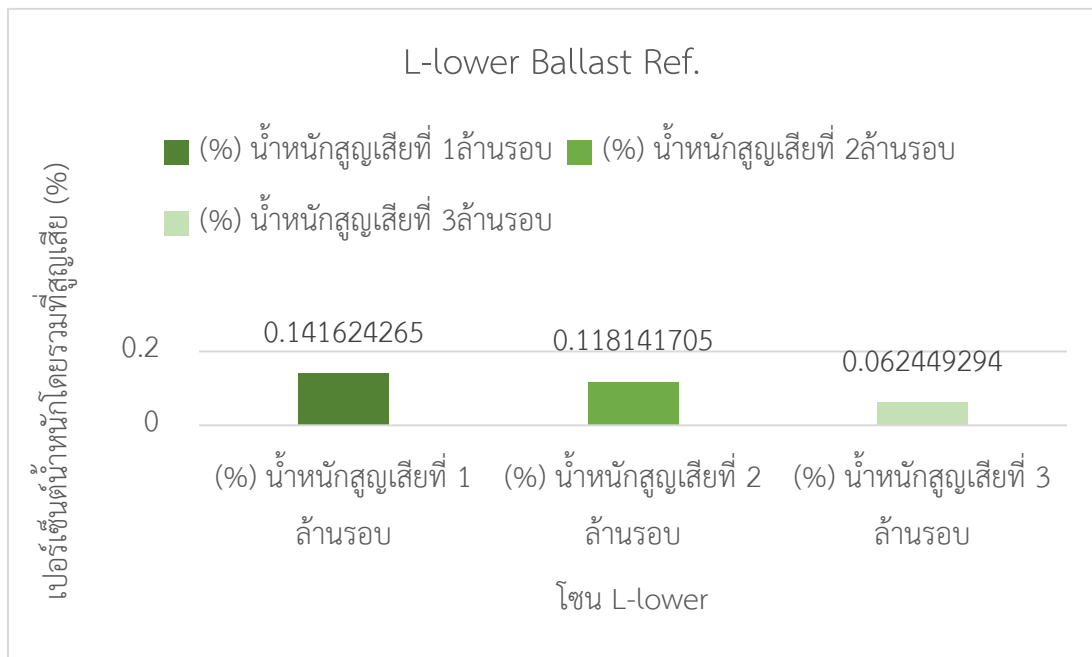
จากรูปที่ 32 และ 33 ตามลำดับ พบว่า เปอร์เซ็นการแตกหักของหินโรยทางในกล่องทดสอบ Ballast Ref. มีการแตกหักของหินโรยทางที่ 0.36587% หรือ (327.532g) ในลักษณะสูญเสียน้ำหนักแบบละเอียดถึง 758 ก้อน และสูญเสียน้ำหนักแบบหยาบถึง 12 ก้อน หรือคิดเป็น การแตกแบบละเอียด 0.03% หรือ (26.8563g) ของน้ำหนักทั้งหมด และ การแตกแบบหยาบ 0.34% หรือ (304.372g) ของน้ำหนักทั้งหมด

#### วิเคราะห์การสึกหรอของหินโรยทาง

ได้มีการจำลองการทดสอบของกล่องทดสอบหินโรยทางต่อด้วยแรงกระทำซ้ำที่จำนวนสะสม 3,000,000 cyclic ด้วยน้ำหนักกดเพลลาที่ 20 ตัน (Axle load)

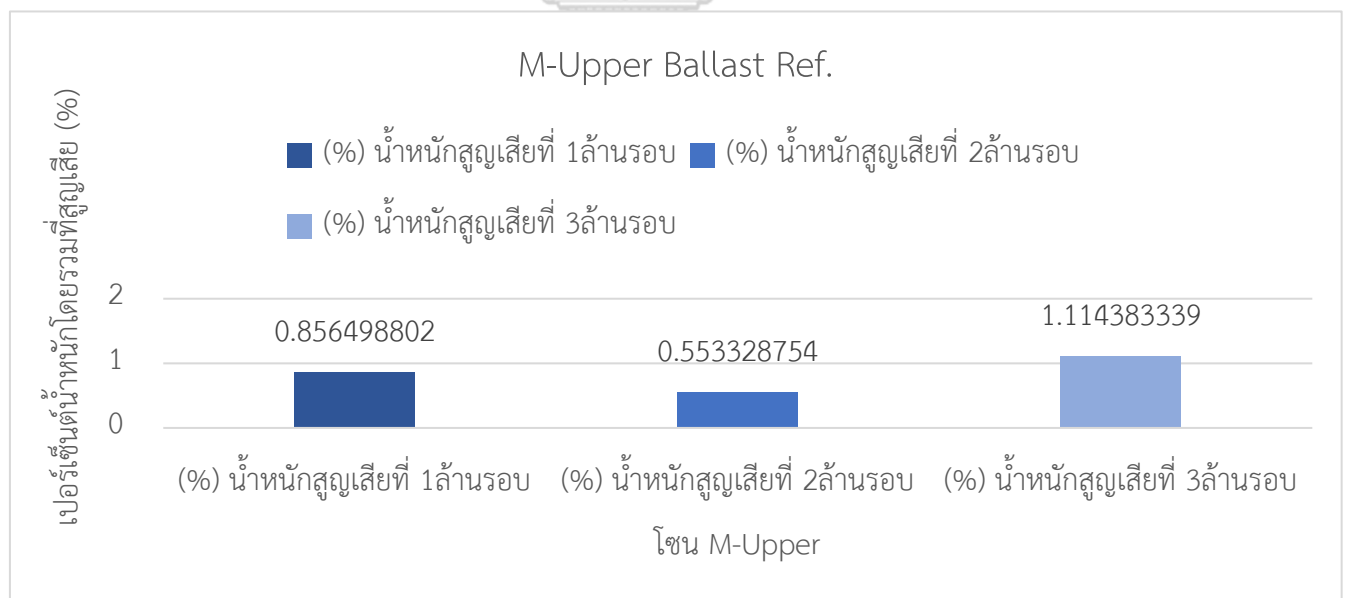
**ตารางที่ 6** ปริมาณการแตกหักของหินโรยทางในแต่ละโซนภายในกล่องทดสอบหินโรยทาง

โซนของหินโรยทางภายในกล่องทดสอบ	ปริมาณน้ำหนักสูญเสียที่ 1 ล้านรอบ	ปริมาณน้ำหนักสูญเสียที่ 2 ล้านรอบ	ปริมาณน้ำหนักสูญเสียที่ 3 ล้านรอบ
L1	20.6 g	17.16 g	9.06 g
L2	5.72 g	4.21 g	6.6 g
M1	23.752 g	82.67 g	46.54 g
M2	127.4 g	81.6 g	163.43 g
R1	141.96 g	7.76 g	10.877 g
R2	8.1 g	187.37 g	4.51 g

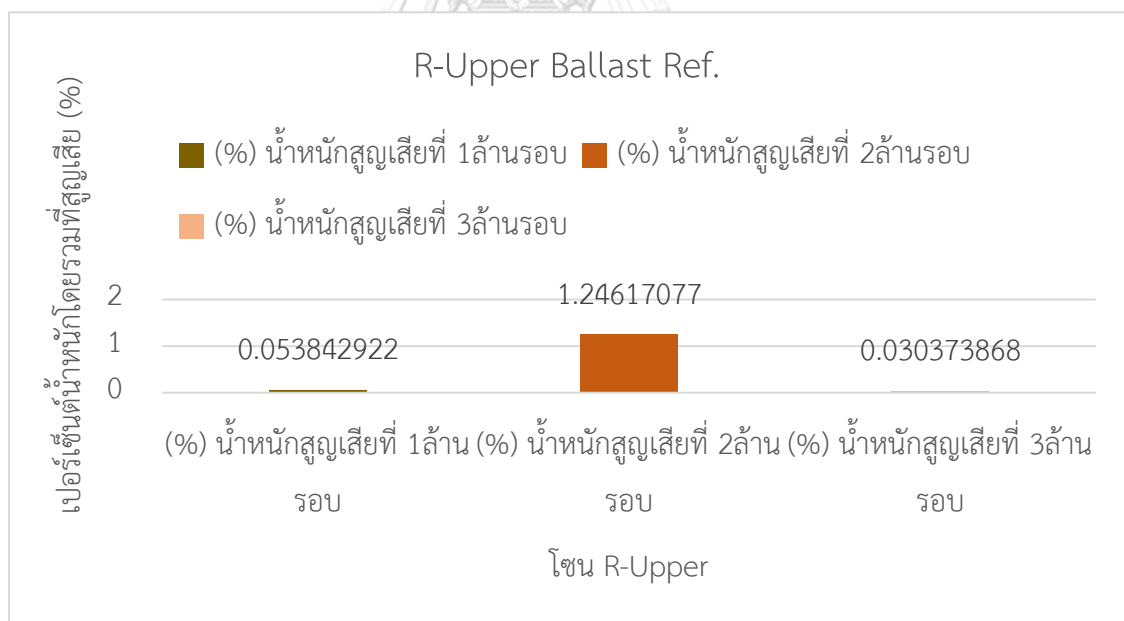
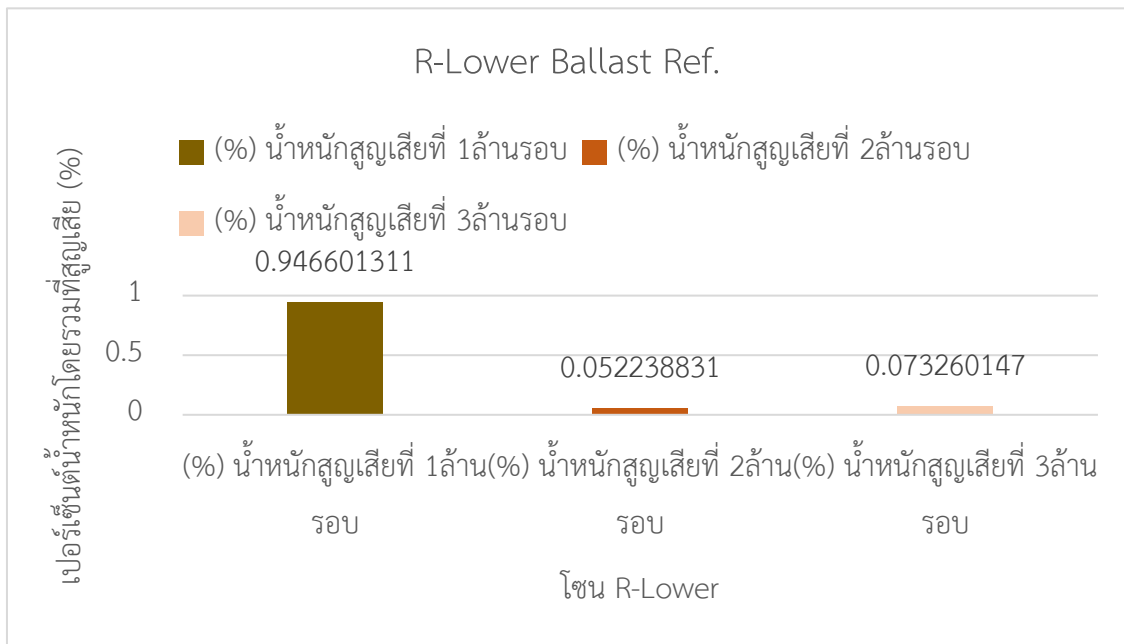


รูปที่ 34 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักรวมที่สูญเสียในโซน L



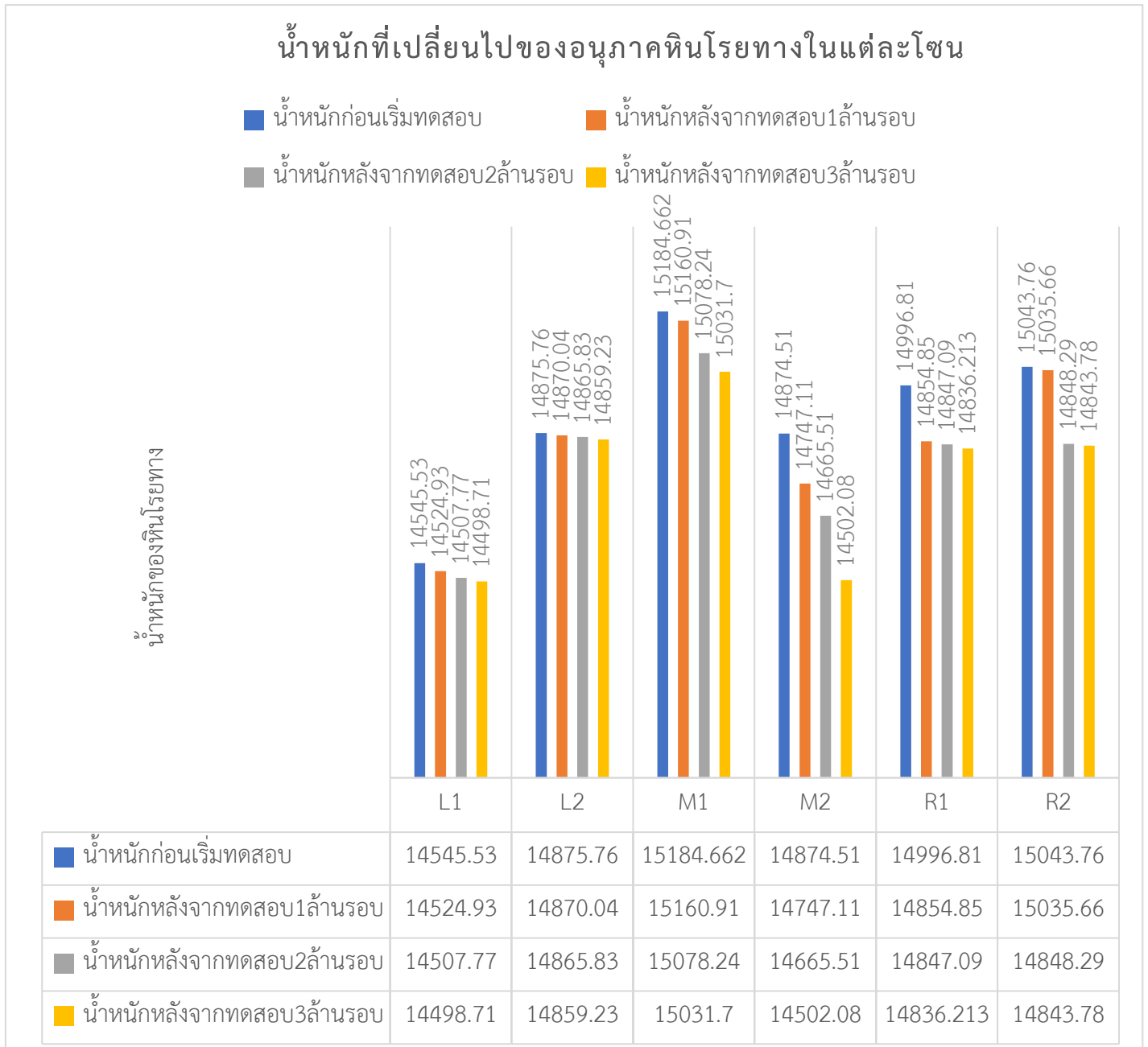


รูปที่ 35 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักรวมที่สูญเสียในโชน M



รูปที่ 36 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักรวมที่สูญเสียในโชน R

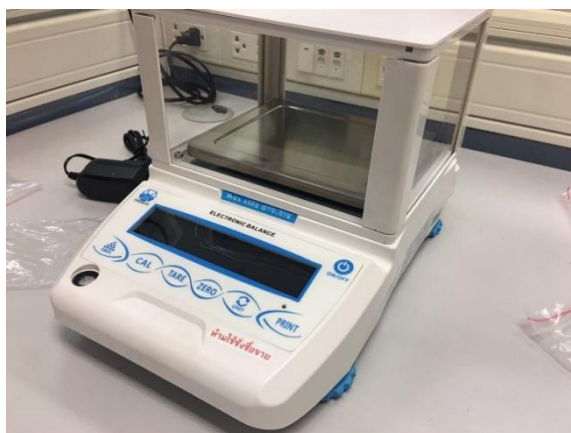
ตารางที่ 7 สรุปปริมาณการแตกหักในโซนทั้งส่วนบนและส่วนล่างของภายในกล่องทดสอบหินโรยทาง



### 3.3. เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

#### 3.3.1 เครื่องมือหาน้ำหนักของหินโรยทาง

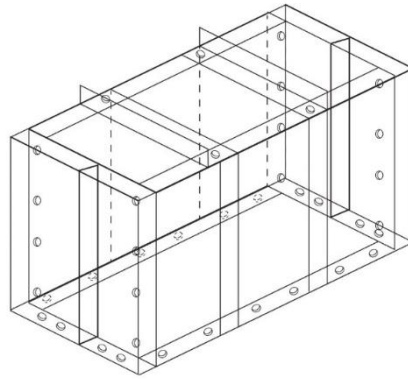
- 1) เครื่องมือที่ใช้ในการชั่งน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางคือเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถอ่านค่าน้ำหนักได้ที่ 0.01กรัม ดังแสดงในรูปที่ 37



รูปที่ 37 เครื่องชั่งน้ำหนักสำหรับหินโรยทาง

#### 3.3.2 เครื่องมือการทดสอบแบบแรงกระทำซ้ำ

การทดสอบแบบแรงกระทำซ้ำเป็นรอบถูกดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบไฮดรอลิก SERVOPULSER การดำเนินการทดสอบนี้แสดงในรูปภาพที่ 38 และ รูปภาพที่ 39 ซึ่งรวมไปถึงกล่องหินโรยทางโลหะและเครื่องทดสอบไฮดรอลิก Servo-pulser อนุภาคหินโรยทางทั้งหมดถูกทำสัญลักษณ์ตัวเลขของแต่ละโซน จากนั้นหินโรยทางจะถูกวางในพื้นที่ที่ถูกออกแบบไว้ภายในกล่องหินโรยทาง และทำให้อัดให้แน่นโดยการใช้เครื่องตอกเสาเข็มแบบสั่น (Vibratory Hammer) และจากนั้นหมอนรถไฟจำลองและหินโรยทางที่เหลือจะถูกวางในส่วนบนสุดของหินโรยทาง กล่องทดสอบที่เตรียมตัวอย่างเสร็จจะถูกย้ายเข้าไปในโครงสร้างเพื่อรับการบรรทุกน้ำหนัก (รูปที่ 39, ค) ซึ่งรับน้ำหนักแรงดันไปที่หมอนรถไฟจำลองเพื่อที่จะจำลองการรับน้ำหนักรถไฟ รูปแบบการรับน้ำหนักและรอบการรับน้ำหนักถูกควบคุมผ่านตัวควบคุม (รูปที่ 39, ข) และมันยังเป็นเครื่องมือเพื่อใช้ในการรวบรวมข้อมูลอีกด้วย



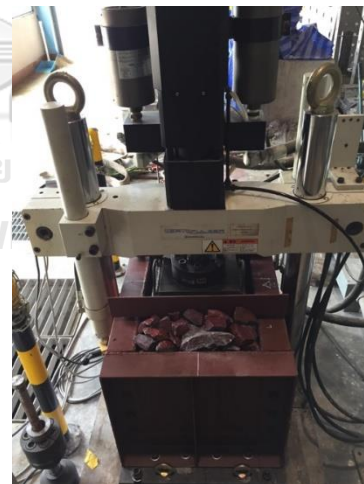
รูปที่ 38 มุมมองของอุปกรณ์กล่องทดสอบหินโรยทาง



ก. เครื่องทดสอบ



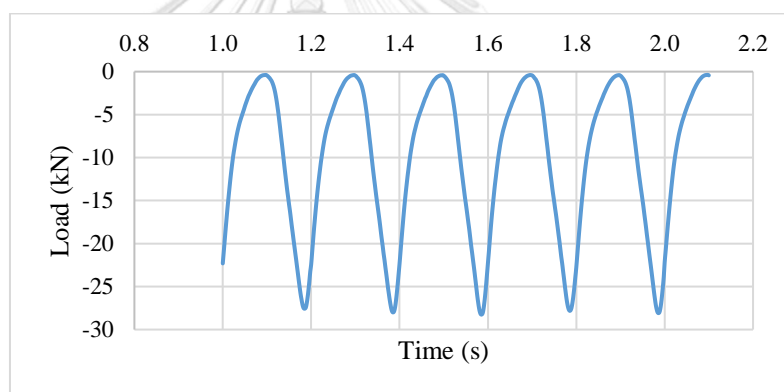
ข. คอนโทรลเลอร์



ค. โครงสร้างของแรงที่กระทำต่อตัวอย่าง

รูปที่ 39 ระบบ SERVOPULSER และการจำลองกระบวนการ

อ้างอิงจาก (Somkith,2018) การบรรทุกน้ำหนักแบบเป็นจำนวนรอบที่จำลองการเคลื่อนผ่านของรถไฟดำเนินการโดยการบรรทุกน้ำหนักรูปคลื่นไซน์เวฟ (sine wave) ระหว่าง  $-0.4\text{kN}$  และ  $-28\text{kN}$  โดยอ้างอิงจากการวิเคราะห์โปรแกรม Geotrack ที่น้ำหนักกดเพลา (axle load) ที่ 20 ตัน ตามที่แสดงในรูปที่ 40 ความถี่การบรรทุกน้ำหนักที่ใช้สำหรับแต่ละการกระตุ้น (actuator) คือ 5Hz ซึ่งการจำลองรถไฟที่ความเร็ว 36 Km/ชั่วโมง ความเร็วนี้ค่อนข้างต่ำกว่าความเร็วจริงของรถไฟบรรทุกสินค้าในประเทศไทย อ้างอิงจาก ((Shenton, 1978) แนะนำว่าความถี่ของโหลดไม่มีผลต่อพฤติกรรมการเสียรูปของหินโรยทางอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ในขณะที่การทดสอบตัวคอนโทรลเลอร์จะมีการเก็บรวบรวมข้อมูลจากเครื่องมือที่ผู้ทดสอบได้จัดเตรียมไว้ เพราะข้อมูลจะมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะเก็บรวบรวมรอบทั้งหมดของการรับน้ำหนัก ดังนั้นจึงมีการตั้งค่าของการเก็บรวบรวมข้อมูลในระดับตามที่แสดงในตารางที่ 8



รูปที่ 40 ลักษณะของรูปแบบการรับน้ำหนักสำหรับกล่องทดสอบหินโรยทาง

ตารางที่ 8 วงจรของการเก็บรวบรวมข้อมูล

ขั้นตอน	รอบ	การเก็บข้อมูล	ข้อมูล
เงื่อนไขก่อนเริ่มการทดสอบ	1-2000 รอบ	เก็บข้อมูลทุกๆ 100 รอบ	แรง การทรุดตัว
	2000-10000 รอบ	เก็บข้อมูลทุกๆ 500 รอบ	
เงื่อนไขสภาพระหว่าง การทดสอบ	1-2,000 รอบ	เก็บข้อมูลทุกๆ 100 รอบ	แรง การทรุดตัว
	2,000- 100,000 cycles	เก็บข้อมูลทุกๆ 500 รอบ	
	100,000- 500,000 รอบ	เก็บข้อมูลทุกๆ 1,000 รอบ	
	500,000- 1,000,000 รอบ	เก็บข้อมูลทุกๆ 2,000 รอบ	

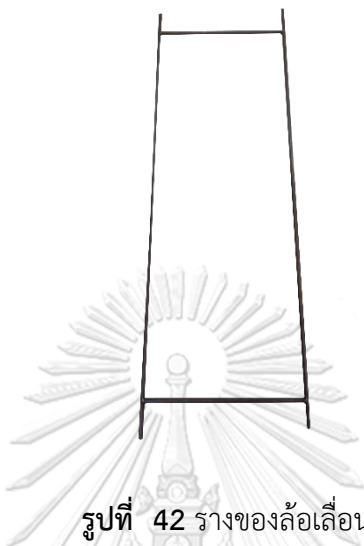
### 3.3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบวิเคราะห์ปริมาตรของแผ่นยางรองใต้หมอน

1) แผ่นเหล็กสแตนเลสนำมาม้วนให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีขนาด 20 เซนติเมตร และมีความสูงถึงปลายกรวยตัด 20 เซนติเมตร และตัดปลายเพื่อติดต่อวาล์วเปิดปิดเพื่อใช้ในการบรรจุทรายภายในกรวยตัดนี้ดังรูป



รูปที่ 41 กรวยสแตนเลสพับที่ติดตั้งวาล์วใช้ในการบรรจุทรายทดสอบ

- 2) นำเหล็กปลอกขนาด 9 มิลลิเมตร ที่มีขนาดความยาว 120 เซนติเมตร จำนวนสองเส้น และที่มีขนาดความยาว 36.5 เซนติเมตร จำนวนสองเส้น ทำการเชื่อมที่ตำแหน่งห่างจากปลายของความยาวเหล็กปลอกโดยมีระยะ 8.5 เซนติเมตร ดังรูป เพื่อใช้เป็นรางของล้อเลื่อน



รูปที่ 42 รางของล้อเลื่อน

- 3) เตรียมแผ่นเหล็กที่มีความหนา 1 เซนติเมตร ความกว้าง 10 เซนติเมตร และความยาว 25 เซนติเมตร โดนทำการเชื่อมแผ่นเหล็กที่มีการเชื่อมแหวนรองน็อตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6 เซนติเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.5 เซนติเมตร ที่จุดกึ่งกลางและทำการติดตั้งเหล็กปลอกเชื่อมดังรูปเพื่อประกอบกรวยตัดที่บรรจุทราย เพื่อใช้เป็นตัวเลื่อนในทิศทาง ซ้ายและขวา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 43 ตัวสไลด์และตัวค้ำยันกรวยตัดที่บรรจุทรายทดสอบ



- 4) เตรียมขาตั้งประคองตั้งรูปเพื่อใช้ในการชั่งน้ำหนักทรายที่บรรจุภายในกรวยตลับนี้



รูปที่ 44 ขาตั้งประคองกรวยตลับที่บรรจุทรายใช้ในการชั่งน้ำหนักทรายบนตราชั่ง

- 5) เตรียมแผ่นเหล็กขนาด ความกว้าง 30 เซนติเมตรและความยาว 40 เซนติเมตร จำนวน3แผ่น เชื่อมกันและติดตั้งล้อเลื่อนตั้งรูป



รูปที่ 45 รถรางล้อเลื่อนใช้ในการทดสอบหาปริมาณของทรายทดสอบ

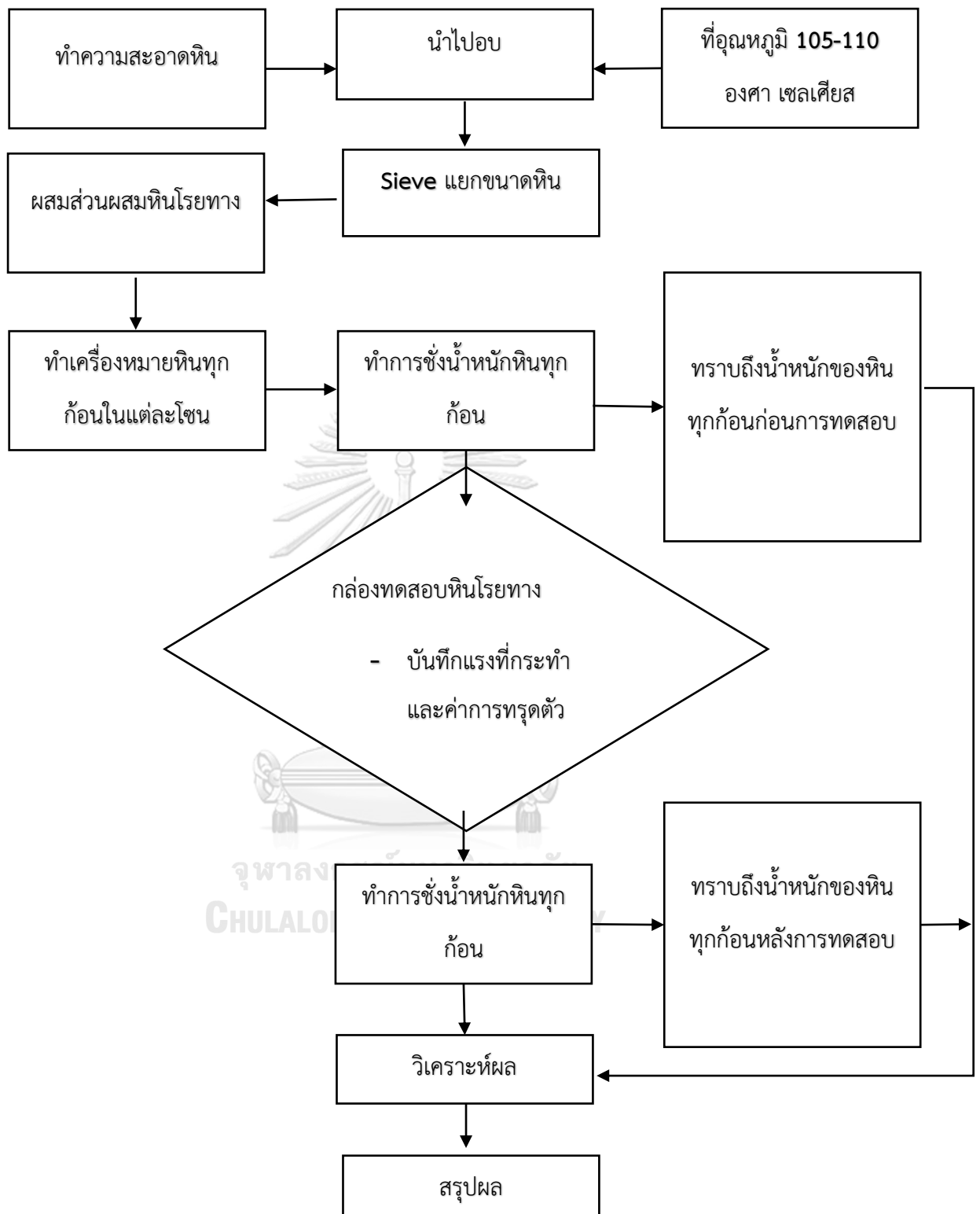
## 3.4 กรณีศึกษาของการทดลอง

ตารางที่ 9 สรุปรูปแบบการทดสอบและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

กรณีศึกษา	วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	ค่าพารามิเตอร์ที่ศึกษา	จำนวนกล่องทดสอบหินโรยทาง	รอบความถี่ในการבודอัดหิน	เวลาทดสอบ (วัน)	การทดสอบ
การศึกษา กล่องหินโรยทาง	หินโรยทางที่ไร้ซึ่งแผ่นรองใต้หมอนใช้ในการอ้างอิง	การสีกหรือของหินโรยทาง	3	ทุกๆ น้ำหนักบรรทุกทุกสะสมที่ 1 ล้านรอบ	27	ทดสอบโดยแรงกระทำซ้ำจำนวน (3,000,000 รอบที่ 5Hz)
	หินโรยทางที่มีแผ่นยางพารารองยกใต้หมอน		3	รอบ	30	
	รถไฟโดยมีความหนา 15 มม.)		1	-	10	
เวลาการทดสอบทั้งหมด					67	

### 3.5 ขั้นตอนของการทดสอบและผลคาดหวังที่จะได้รับ

รูปที่ 46 แสดงกระบวนการดำเนินงานในการศึกษานี้ ก่อนการทดสอบ ผู้ทดลองได้รับวัสดุหินโรยทางที่ปนเปื้อนมา อาทิเช่น ฝุ่น ความชื้น เปื้อนดิน จึงต้องมีการล้าง ชัดถู แล้วนำไปอบในเตาอบ เพื่อให้ได้น้ำหนักหินที่ไม่มีความชื้นหรือน้ำหนักปนเปื้อนต่างๆ แล้วจึงจะทำการคละขนาดหินด้วยการร่อนตะแกรงเพื่อแบ่งขนาดของหินก่อนที่จะทำการผสมเป็นวัสดุมวลรวมหินโรยทาง โดยขั้นตอนก่อนหน้านั้นคือการทำสัญลักษณ์และแบ่งโซนการศึกษาของหินโรยทางออกเป็น 6 โซนตามบทความข้างต้น แล้วจึงมาหาน้ำหนักมวลโดยการชั่งน้ำหนักของหินโรยทาง หลังจากนั้นหินโรยทางจะถูกเติมเข้าไปในกล่องทดสอบและอัดให้แน่นด้วยเครื่องตอกเสาเข็มแบบสั่น (vibratory hammer) ในแต่ละชั้น หมอนรถไฟถูกวางที่จุดกึ่งกลางบนชั้นของหินโรยทาง และจากนั้นใช้รอบการรับบรรทุกน้ำหนักตามเงื่อนไขจนครบตามที่ถูกกำหนดไว้ หลังจากการทดสอบทำไปได้ทุก 1,000,000 รอบ 2,000,000 รอบ และ 3,000,000 รอบ หินโรยทางจะถูกนำออกจากกล่องเพื่อแยกหินโรยทางที่แตกและการปนเปื้อนจากการรับน้ำหนักบรรทุก หินโรยทางจากการทดสอบแรงกระทำซ้ำยังถูกชั่งน้ำหนักเพื่อเก็บรวบรวมการเปลี่ยนแปลงของหิน สำหรับการทดสอบ ผลที่ได้คือจากการเก็บรวบรวมมาจากตัวควบคุม (คอนโทรลเลอร์) อาทิเช่น แรงกระทำที่รับน้ำหนัก การเสียรูปทรง (สูญเสียน้ำหนัก) จำนวนของรอบการบรรทุก และรวมถึงค่าการทรุดตัว เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผล นำไปสู่การสรุปและอภิปรายผลการทดลอง

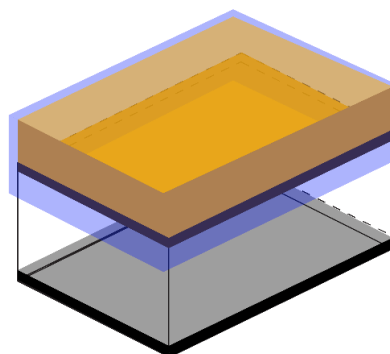


รูปที่ 46 กระบวนการของการทดสอบ

### 3.6 วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณการยุบตัวของแผ่นยางพารา

นอกจากการสรุปผลที่ได้จากกระบวนการทดสอบกล่องหินโรยทางโดยมุ่งเน้นศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของหินโรยทางเพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างในแต่ละตัวแปรของการทดสอบ ตามการทดสอบนำร่องและตามที่แสดงจากตารางที่ 9 แสดงการวิเคราะห์ผลแต่ละการทดสอบในการศึกษานี้ โดยก่อนจะหาข้อสรุปของแต่ละตัวอย่าง ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของการสึกหรอของหินโรยทางและวิธีการที่การสึกหรอของแต่ละตัวอย่าง (วิธีการที่ทำให้หินโรยทางเกิดความเปลี่ยนแปลง-เสื่อมสภาพ) ในการทดลองยังมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแผ่นยางพารารมควันที่ใช้ในการทดสอบรับแรงกระทำซ้ำภายในกล่องทดสอบหินโรยทาง โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ :

1. เมื่อกล่องทดสอบหินโรยทางที่มีการใช้แผ่นยางพาราเป็นแผ่นรองใต้หมอนของรถไฟจำลองมีการทดสอบถึงกำหนดรอบความถี่ในการบดอัดหิน ทั้งในกรณีของที่มีการบรรจุทุกน้ำหนักระยะสมที่ 1 ล้านรอบ ในแต่ละกรณี ตัวหมอนรถไฟจำลองที่มีแผ่นยางที่ถูกติดตั้งไว้ข้างใต้จะถูกนำมาทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณที่ยุบตัวของแผ่นยางพารารมควัน ทั้งก่อนเริ่มทำการทดสอบ ระหว่างการทดสอบ และหลังการทดสอบ
2. นำหมอนรถไฟจำลองที่มีแผ่นยางพารา คว่ำกลับหัว เพื่อติดตั้งอุปกรณ์แผ่นอะคริลิกเพื่อบีบรัดตัวหมอนรถไฟจำลองโดยอ้างอิงระดับที่ความสูงเท่ากันทุกด้านของหมอนรถไฟจำลองก่อนทำการติดตั้งตัวแผ่นอะคริลิก
3. เมื่อติดตั้งอุปกรณ์กรอบอะคริลิกแล้ว จึงทำการเททรายภายในกรอบอะคริลิกลงบนตัวแผ่นยางพารา โดยใช้ทราย อาทิเช่น ASTM 20-30 Sand หรือ Ottawa Sand ที่ทราบถึงความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) เพื่อจะได้ทราบถึง น้ำหนักของทรายที่เข้าไปแทนที่และปริมาณของทรายที่เพิ่มขึ้นเมื่อเข้าไปแทนที่ปริมาตรที่สูญหายไปของแผ่นยางพารารมควัน



รูปที่ 47 หมอนรถไฟจำลองที่ถูกติดตั้งด้วยกรอบอะคริลิกที่บรรจุด้วยทรายเพื่อหาปริมาณ

### 3.7 การวิเคราะห์ตัวแปรและการตั้งสมมติฐาน

#### สมมติฐาน

**ชื่องานวิจัย** การประยุกต์ใช้แผ่นยางพารารมควันเป็นยางรองใต้หมอนรถไฟที่มีหินโรยทางในการใช้งานระยะยาวเพื่อลดการสึกหรอและจำนวนรอบของการบดอัดหิน

1. การใช้แผ่นยางพารารมควันเป็นยางรองใต้หมอนรถไฟสามารถลดการสึกหรอของหินโรยทางได้ดีกว่าการไม่ใช่อายางรองใต้หมอนรถไฟ
2. การใช้ยางแผ่นพารารมควันเป็นยางรองใต้หมอนรถไฟสามารถลดความถี่ในการบดอัดหินโรยทางได้ดีกว่า

#### 3.6.1.1 ตัวแปรอิสระ

- 1) การใช้แผ่นยางพารารมควันเป็นยางรองใต้หมอนรถไฟ
- 2) การที่มีน้ำหนักสะสมของอนุภาคหินโรยทางที่เพิ่มขึ้นเพื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีใช้และไม่ใช้แผ่นยางรองใต้หมอนรถไฟ

#### 3.6.1.2 ตัวแปรตาม

- 1) ปริมาณของการแตกหักสึกหรอการสูญเสียน้ำหนักของหินโรยทางภายในกล่องทดสอบ

#### 3.6.1.3 ตัวแปรควบคุม

- 1) ชนิดของหินโรยทาง
- 2) การคัดแยกขนาดคละและแบ่งโซนของส่วนผสมหินโรยทาง
- 3) การกำหนดแรงที่จะกระทำต่อตัวอย่างและจำนวนรอบในการทดสอบ
- 4) การกำหนดความหนาของแผ่นยางพารารมควันที่รองใต้หมอนรถไฟจำลองที่ 15 มม.
- 5) ภาระน้ำหนักบรรทุกทุกสะสมของหินโรยทางรวมถึงการมีและไม่มีการจัดเรียงอนุภาคของหินโรยทาง

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

#### 4.1 การสึกหรอของหินโรยทาง

หลังจากทดลองทดสอบหินโรยทางได้ทำการทดสอบด้วยแรงกระทำซ้ำจนครบตามจำนวนของการทดสอบที่ 1 ล้านรอบ 2 ล้านรอบ และ 3 ล้านรอบ ตามลำดับ โดยหินโรยทางได้ผ่านการรับน้ำหนักบรรทุกทุกสะสมที่ 20 ล้านตัน 40 ล้านตัน และ 60 ล้านตัน ด้วยการจำลองน้ำหนักเพลาคดที่ 20 ตัน และหินโรยทางได้ผ่านการรับน้ำหนักบรรทุกทุกสะสมที่ 50 ล้านตัน 100 ล้านตัน และ 150 ล้านตัน ด้วยการจำลองน้ำหนักเพลาคดที่ 50 ตัน จึงทำการวิเคราะห์ผลของการสึกหรอของหินโรยทาง จากตัวอย่างทดลองทดสอบหินโรยทางทั้งหมด 7 กลุ่มการทดสอบ

##### 4.1.1 ลักษณะการแตกแบบละเอียดและการแตกแบบหยาบ

จากการศึกษาการสึกหรอของหินโรยทางมีการพิจารณาและการจำแนกลักษณะการแตกออกเป็น 2 ประเภท คือการแตกแบบหยาบและการแตกแบบละเอียด โดยการแตกแบบหยาบหมายถึงอนุภาคหินโรยทางที่แตกเป็นชิ้นขนาดมากกว่า 9.5 มม. (3/8 นิ้ว) ในขณะที่การแตกแบบละเอียดอธิบายหมายถึงอนุภาคหินโรยทางที่แตกออกเป็นขนาดน้อยกว่า 9.5 มม. (3/8 นิ้ว) โดยการแตกทั้งสองลักษณะนี้จะถูกนำเสนอเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักอนุภาคหินโรยทาง ซึ่งเปอร์เซ็นต์ของการแตกแบบหยาบและแบบละเอียดคำนวณโดยสมการ (4.1) และ (4.2) ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การแตกแบบละเอียด} = \frac{W_f}{W_{\text{all}}} \times 100 (\%) \quad (4.1)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การแตกแบบหยาบ} = \frac{W_c}{W_{\text{all}}} \times 100 (\%) \quad (4.2)$$

เมื่อ:

$W_f$  คือการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรง 9.5 มม.  
(3/8 นิ้ว) หลังจากการทดสอบ

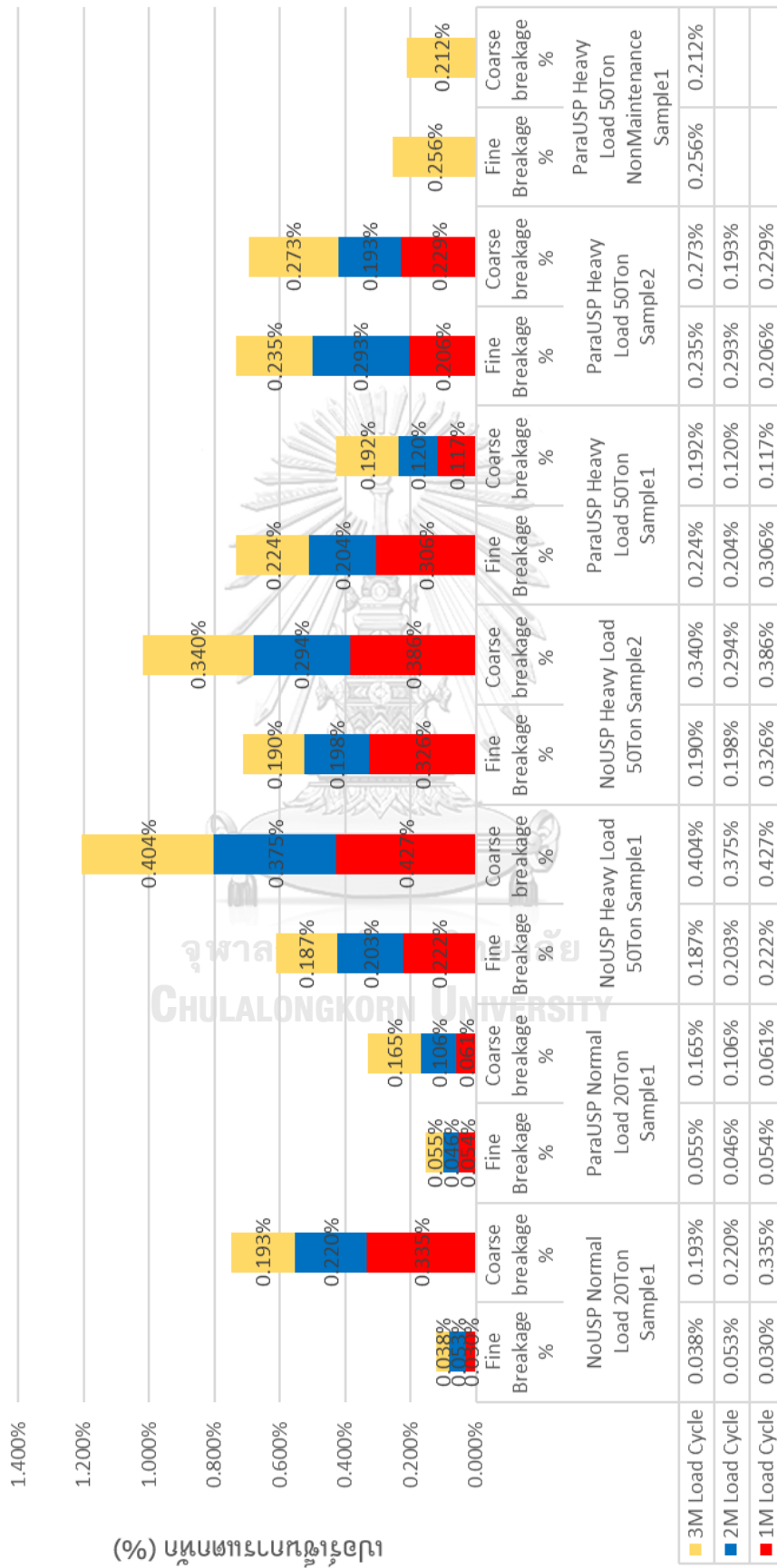
$W_c$  คือการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางที่มีขนาดใหญ่กว่าตะแกรง 9.5 มม.  
(3/8 นิ้ว) หลังจากการทดสอบ

$W_{all}$  คือน้ำหนักมวลรวมทั้งหมดของหินโรยทาง ก่อนจากการทดสอบ





รูปที่ 48 การสีกทรของอนุภาคหินโรยทาง



ตัวอย่างของกล่องทดสอบหินโรยทาง

■ 1M Load Cycle ■ 2M Load Cycle ■ 3M Load Cycle

ตารางที่ 10 จำนวนอนุภาคของหินโรยทางที่พบการสึกหรอในแต่ละกล่องทดสอบหินโรยทาง

กล่องทดสอบ	อนุภาคการ แตกแบบ ละเอียด ที่ 1 ล้านรอบ	อนุภาคการ แตกแบบ หยาบ ที่ 1 ล้าน รอบ	อนุภาคการ แตกแบบ ละเอียด ที่ 2 ล้านรอบ	อนุภาคการ แตกแบบ หยาบ ที่ 2 ล้าน รอบ	อนุภาคการ แตกแบบ ละเอียด ที่ 3 ล้านรอบ	อนุภาคการ แตกแบบ หยาบ ที่ 3 ล้านรอบ	จำนวนรวมของอนุภาคหิน โรยทาง
NoUSP Normal Load 20Ton	758	12	749	21	760	10	770
NoUSP Heavy Load 50Ton Sample 1	611	100	642	69	637	74	711
NoUSP Heavy Load 50Ton Sample 2	597	114	654	57	655	56	711
Para USP Heavy Load 50Ton Sample 1	600	111	541	170	620	91	711
Para USP Normal Load 20Ton	698	13	701	10	695	16	711
Non- Maintenance Para USP Heavy Load 50Ton	-	-	-	-	619	92	711
Para USP Heavy Load 50Ton Sample 2	639	72	598	113	631	80	711

**จากตารางที่ 10** ตัวอย่างกล่องทดลองแต่ละกล่องทดสอบสามารถอธิบายไว้ดังต่อไปนี้:

- ❖ NoUSP Normal Load 20 ตัน (หินโรยทางเพียงอย่างเดียวเป็นข้อมูลอ้างอิง) ตัวอย่างที่ 1
- ❖ NoUSP Heavy Load 50 ตัน (หินโรยทางเพียงอย่างเดียวเป็นข้อมูลอ้างอิง) ตัวอย่างที่ 1
- ❖ NoUSP Heavy Load 50 ตัน (หินโรยทางเพียงอย่างเดียวเป็นข้อมูลอ้างอิง) ตัวอย่างที่ 2
- ❖ Para USP Heavy Load 50 ตัน (หินโรยทางที่ติดตั้งแผ่นยางรองใต้หมอนที่เป็นแผ่นยางพารารมควัน) ตัวอย่างที่ 1
- ❖ Para USP Normal Load 20 ตัน (หินโรยทางที่ติดตั้งแผ่นยางรองใต้หมอนที่เป็นแผ่นยางพารารมควัน) ตัวอย่างที่ 1
- ❖ Para USP Non-Maintenance Heavy Load 50 ตัน (หินโรยทางที่ติดตั้งแผ่นยางรองใต้หมอนที่เป็นแผ่นยางพารารมควัน) ตัวอย่างที่ 1
- ❖ Para USP Heavy Load 50 ตัน (หินโรยทางที่ติดตั้งแผ่นยางรองใต้หมอนที่เป็นแผ่นยางพารารมควัน) ตัวอย่างที่ 2

จากรูปภาพที่ 48 พบว่าเปอร์เซ็นต์การแตกของหินโรยทางทั้งในกรณีการแตกหักแบบหยาบและแบบละเอียดจากกล่องทดสอบหินโรยทางทั้ง 7 ตัวอย่างนั้นมีปริมาณการแตกหักสะสมที่มีค่ามากที่สุดคือในกรณีกล่องทดสอบ NoUSP Heavy Load 50 ตัน ทั้งตัวอย่างที่ 1 และ 2 มากที่สุดถึง 1.818% และ 1.734% ตามลำดับ ซึ่งเป็นปริมาณสะสมของทั้งสองประเภทของลักษณะการแตกหัก ในทางตรงกันข้ามกลับพบว่าการแตกหักในกรณีกล่องทดสอบ Para USP Normal Load 50 ตัน ตัวอย่างที่ 1 และ 2 พบว่าการแตกหักสะสมที่น้อยกว่า โดยมีปริมาณการแตกหักเพียง 1.163% และ 1.429% โดยสรุปได้ว่าการใช้แผ่นยางพารารองใต้หมอนรถไฟสามารถลดการสึกหรอของหินโรยทางได้ 26.23% ถึง 56.32%

ทั้งนี้เมื่อมีการเปรียบเทียบกับกรณีที่มีแต่เฉพาะหินโรยทาง (NoUSP) พบว่าการใช้แผ่นยางรองใต้หมอนรถไฟ (ParaUSP) ในกรณีทดสอบที่มีการใช้น้ำหนักดเพลลาที่ 20 ตัน จากการที่หินโรยทางที่ใช้ยางพารารองใต้หมอนรถไฟมีค่าเปอร์เซ็นต์การแตกสะสมแบบหยาบและแบบละเอียดอยู่ที่ 0.487% ของ Para USP Heavy Load 20 ตัน และเปอร์เซ็นต์การแตกสะสมแบบหยาบและแบบละเอียดของ NoUSP Heavy Load 20 ตัน อยู่ที่ 0.869% จึงสามารถสรุปได้ว่าในกรณีของการใช้น้ำหนักดเพลลาที่ 20 ตัน ของ ParaUSP จะทำให้มีการ

ลดปริมาณการแตกสะสมของทั้งการแตกแบบละเอียดและแบบหยาบอยู่ที่ 78.44% โดยสามารถอธิบายเป็นนัยสำคัญได้ว่าการใช้แผ่นยางพารารวมควันมารองข้างใต้ของหมอนรถไฟสามารถลดการกระจายการสึกหรอของอนุภาคหินโรยทางไปยังโซนอื่นๆของอนุภาคหินโรยทางภายในได้ก่ล่งดีกว่กรณีไม่มีแผ่นยางพารารวมควันที่มีปริมาณการสึกหรอของอนุภาคหินโรยทางที่อยู่ใต้ของหมอนรถไฟ

โดยสามารถให้คำอธิบายที่เป็นไปได้สำหรับกรณีของการทดสอบที่มีการใช้น้ำหนักกดเพลลาที่มากขึ้นถึง50ตัน โดยผลที่ได้ทำให้มีการแตกของอนุภาคหินโรยทางมากขึ้นนั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่มากขึ้นของรูปแบบของการยึดหยุ่นที่สูงขึ้นและโมดูลัสความยึดหยุ่นที่ต่ำลงของก่ล่งทดสอบหินโรยทาง เนื่องจากการหลุดตัวที่สูงในกรณีที่มีการใช้แผ่นยางพารารองใต้หมอนทำให้เป็นผลเกิดการจัดเรียงของอนุภาคหินโรยทางซึ่งอาจทำให้เกิดการเสียดสีของอนุภาคหินโรยทางที่มากขึ้น หากเปรียบเทียบกับกรณีที่มีการใช้น้ำหนักกดเพลลาที่น้อยกว่าที่ 20ตัน

#### 4.1.2 ปริมาณการแตกหักของหินโรยทางในแต่ละโซนภายในก่ล่งทดสอบหินโรยทาง

ในการพิจารณาผู้ทดสอบได้มีการทำสัญลักษณ์ทั้งเครื่องหมายตัวอักษรและตัวเลขลงบนหินโรยทางตามจำนวนอนุภาคของหินโรยทางในการแยกหินโรยทางในแต่ละโซนการศึกษาที่ได้ทำการแบ่งไว้เบื้องต้นเป็นทั้งหมด6โซนภายในก่ล่งทดสอบแต่แรกภายในก่ล่งทดสอบหินโรยทางก่อนที่จะเริ่มทำการทดสอบแรงกระทำซ้ำ รวมถึงการหาน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางทั้งหมดโดยการชั่งน้ำหนักในแต่ละโซนเพื่อทำการบันทึกก่อนการทดสอบในแต่ละรอบอีกด้วย

หลังจากทำการทดสอบรับแรงกระทำซ้ำทุกๆการทดสอบที่1ล้านรอบกระทำซ้ำ ก่ล่งทดสอบหินโรยทางและตัวอย่างทดสอบหินโรยทางทั้งหมดจะถูกนำออกจากก่ล่งทดสอบ ดังนั้นผู้ทดสอบจะได้ข้อมูลของน้ำหนักหินโรยทางทั้งก่อนและหลังจากการทดสอบเพื่อใช้ในการหาน้ำหนักเปอร์เซ็นต์ของหินโรยทางที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละโซนการศึกษาโดยอาศัยสมการข้างล่างดังนี้ :

$$\text{เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักในแต่ละโซน} = \frac{W_{Li}}{W_{all}} \times 100 (\%) \quad (4.3)$$

$$W_{Li} = W_{Bi} - W_{Ai} \quad (4.4)$$

โดย :

$W_{Li}$  คือ น้ำหนักที่สูญเสียในโซน  $i$

$W_{Bi}$  คือ น้ำหนักของหินโรยทางก่อนการทดสอบในโซน  $i$

$W_{Ai}$  คือ น้ำหนักของหินโรยทางหลังการทดสอบในโซน  $i$

$W_{all}$  คือ น้ำหนักของหินโรยทางทั้งหมดภายในกล่องก่อนการทดสอบ

การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างตัวแปร 2 ตัวที่เป็นอิสระต่อกัน ด้วยค่า Independent Sample T Test เป็นการทดสอบสมมติฐานของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่มที่เป็นอิสระจากกัน ซึ่งเป็นกาทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่มที่เป็นอิสระจากกัน

ขั้นตอนในการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรม SPSS

### ขั้นที่ 1 การตั้งสมมติฐาน

สมมติฐานการทดสอบ

H0 : ปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางของตัวอย่างที่1และตัวอย่างที่2เท่ากัน

H1 : ปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางของตัวอย่างที่1และตัวอย่างที่2ไม่เท่ากัน

ขั้นที่ 2 การกำหนดค่าอัลฟา (ค่าความเชื่อมั่น) โดยปกติค่าที่ใช้จะมี 2 ค่า คือ .01 กับ .05 จากกาทดสอบทางสถิติผู้วิจัยเลือกใช้ ค่าความเชื่อมั่นที่ 95%

ขั้นที่ 3 ตัวสถิติที่ใช้ทดสอบ (Test Statistic)

กรณีที่1:  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$  เมื่อสันนิษฐานว่าตัวอย่างอิสระทั้งสองตัวอย่างมาจากประชากรที่มีความแปรปรวนของประชากรเหมือนกันโดยที่

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

$$s_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

จากนั้นค่า t ที่คำนวณได้จะถูกเปรียบเทียบกับค่า t วิกฤตจากตารางการแจกแจง t ที่มีองศาเสรี (degrees of freedom)  $df = n_1 + n_2 - 2$  และระดับความเชื่อมั่นที่เลือก หากค่า t ที่คำนวณได้มากกว่าค่า t วิกฤตเราจะปฏิเสธสมมติฐานว่าง ( $H_0$ )

กรณีที่ 2:  $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$  เมื่อสันนิษฐานว่าตัวอย่างอิสระทั้งสองตัวอย่างมาจากประชากรที่มีความแปรปรวนของประชากรไม่เหมือนกัน

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

โดยการแจกแจงแบบที (t-Distribution) มีองศาเสรี (Degree of Freedom , v ) ดังนี้

$$df = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{1}{n_1-1} \left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2 + \frac{1}{n_2-1} \left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}$$

จากนั้นค่า t ที่คำนวณได้จะถูกเปรียบเทียบกับค่า t วิกฤตจากตารางการแจกแจง t ที่มีองศาเสรีและระดับความเชื่อมั่นที่เลือก หากค่า t ที่คำนวณได้ > ค่า t วิกฤตเราจะปฏิเสธสมมติฐานว่าง ( $H_0$ )



Independent Samples Test										
ผลการทดสอบค่า ความแปรปรวนของกลุ่ม		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2- tailed)	Mean Differe nce	Std. Error Differe nce	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
NoUSP ตัวอย่าง ที่1,2 โชน R,L Lower 1M	Equal variances assumed	.014	.905	-.446	460	.656	-.05782	.12973	-.31275	.19711
	Equal variances not assumed			-.447	402.542	.655	-.05782	.12928	-.31197	.19634

การพิจารณาผลการทดสอบสมมติฐานด้วย T Test จะพิจารณาค่า P จาก Sig. (2-tailed) ในช่อง 2 ซึ่งมี 2 ตัว คือ ตัวบนที่เป็น Equal variances assumed และตัวล่างที่เป็น Equal variances not assumed จึงต้องมีหลักการพิจารณาว่าจะเลือกใช้ค่า P จากตัวใดได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : ให้พิจารณาค่าความแปรปรวนของกลุ่มในช่อง 1 ว่า Sig. หรือไม่ (Sig. หมายถึงมีความน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าอัลฟา .05 ที่ผู้วิจัยได้กำหนดไว้) จากตารางมีค่า 0.905 ซึ่งไม่ Sig.

ขั้นตอนที่ 2 : ในกรณี ค่าความแปรปรวนของกลุ่มในช่อง 1 Sig. แสดงว่า Equal variances not assumed ให้เลือกใช้ค่า P Sig. (2-tailed) จากตัวล่าง จากตารางตัวอย่างก็คือ 0.655

ขั้นตอนที่ 3 : ในกรณี ค่าความแปรปรวนของกลุ่มในช่อง 1 ไม่ Sig. แสดงว่า Equal variances assumed ให้เลือกใช้ค่า P Sig. (2-tailed) จากตัวบน จากตารางตัวอย่างก็คือ 0.656

**ขั้นที่ 4** การสรุปผลการทดสอบสมมติฐาน สมมติฐานทางสถิติ P (ความน่าจะเป็น) = .656, ค่าอัลฟา (ระดับนัยสำคัญ) = .05 ดังนั้น ค่า P มากกว่าค่าอัลฟา (ระดับนัยสำคัญ) (เท่ากับไม่ Sig.) จึงยอมรับ  $H_0$  ปฏิเสธ  $H_1$

จึงสรุปได้ว่า จากการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของตัวอย่างที่ 1 กับ ตัวอย่างที่ 2 มีค่าไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05



จากตัวอย่างการทดลองกรณีของไม้ใช้และใช้แผ่นยางพารารวมวันที่น่าหนักกดเพลลา50ตันได้ มีการทดลองทั้งหมดในแต่ละกรณีอย่างละ 2 ตัวอย่าง ซึ่งมีจำนวนอนุภาคและขนาดคละคล้ายคลึงกัน ตามกำหนดของการรถไฟแห่งประเทศไทยทั้งตัวอย่างที่1และตัวอย่างที่2 ของทั้ง2กรณีคือไม้ใช้กับใช้ แผ่นยางพารารวมวันรองใต้หมอนโดยจำนวนอนุภาคภายในกล่องทดสอบหินโรยทาง มีจำนวนที่ถูก ระบุไว้ทั้งหมดจากการจัดบันทึกสัญลักษณ์และการติดตามการวัดโดยการชั่งน้ำหนัก ซึ่งภายในกล่อง ทดสอบหินโรยทางมีตำแหน่งที่ใช้ในการระบุตำแหน่งของอนุภาคหินโรยทางภายในกล่องทดสอบมี ทั้งหมด 6 โซน โดยมีโซนการศึกษาที่อยู่พื้นที่ใต้หมอน คืออนุภาคหินโรยทางที่เรียงตัวกันเพื่อรับแรง กระทำซ้ำโดยมีตำแหน่งอยู่ที่ข้างใต้ของหมอนรถไฟที่ทดสอบ ซึ่งระบุโซนดังกล่าวว่า M1 หรือ M-Lower และ M2 หรือ M-Upper ในอีกโซนการศึกษาคืออนุภาคหินโรยทางที่เรียงตัวกันอยู่ด้านข้าง ระบุโซนดังกล่าวว่า L1,L2,R1 และ R2 โดยจากการทดสอบมีการควบคุมจำนวนอนุภาคหินโรยทางทั้ง ตัวอย่างที่1และตัวอย่างที่2 ให้มีปริมาณเท่ากัน ซึ่งแต่ละโซนการศึกษามีจำนวนอนุภาคหินโรยทาง ดังนี้ R1 (118 ก้อน) M1 (116 ก้อน) L1 (115 ก้อน) R2 (128 ก้อน) M2 (106 ก้อน) และ L2 (128 ก้อน) จำนวนดังกล่าวเป็นจำนวนอนุภาคหินโรยทางของกรณีทดสอบโดยไม้ใช้แผ่นยางพารารองใต้ หมอนที่ทดสอบทั้งในตัวอย่างที่1และตัวอย่างที่2

ทั้งนี้จำนวนดังกล่าวข้างต้นทั้ง2ตัวอย่างที่ทดสอบผู้วิจัยต้องใช้การวิเคราะห์เชิงสถิติเข้ามา ตัดสินใจในการเลือกใช้ข้อมูลเพื่อที่จะนำเสนอและเป็นการยืนยันผลจากการทดลองว่าการทดลองนี้ที่ ได้มีการทดสอบตัวอย่างการทำซ้ำ (Repetition) ว่ามีความแตกต่างหรือความเหมือนกันจากการ ทดลองหรือไม่ ซึ่งผู้ทดลองใช้วิธีทางสถิติด้วยการทดสอบการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง 2 กลุ่มตัวอย่าง (Independent t tests) โดยผู้ทดลองนำโซนการศึกษาภายในกล่องทดสอบหินโรยทาง ที่มีด้วยกันทั้งหมด6โซนภายในกล่องทดสอบนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยการแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ลักษณะคือ 1.โซนการศึกษาอนุภาคหินโรยทางที่อยู่บริเวณใต้หมอนในส่วนบนและส่วนล่าง (M-Upper , M-Lower) และ 2.โซนการศึกษาอนุภาคหินโรยทางที่อยู่บริเวณด้านข้างของหมอนรถไฟทั้ง ในส่วนบนและส่วนล่าง (R,L-Upper , R,L-Lower) ทั้งนี้ซึ่งในการทดสอบในทั้ง2รูปแบบมีจำนวนรอบ ของการทดสอบรับแรงกระทำซ้ำรวมกันทั้งหมดจำนวน 3ล้านรอบ โดยในทุกๆการทดสอบที่ครบ จำนวน 1ล้านรอบ แรงกระทำซ้ำนั้น ทั้ง2รูปแบบการทดสอบจะมีการนำอนุภาคหินโรยทางออกจาก กล่องทดสอบหินโรยทางเพื่อทำการเก็บข้อมูลและบันทึกผลเหมือนกัน ผู้ทดลองจึงตัดสินใจแยกการ วิเคราะห์ในแต่ละช่วงของการทดสอบในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติออกเป็น3ช่วง คือ ช่วงจำนวนที่

อนุภาคหินโรยทางรับแรงกระทำเข้ามาแล้ว 1 ล้านรอบ (1M) 2 ล้านรอบ (2M) และ 3 ล้านรอบ (3M) เพื่อเป็นการยืนยันและตัดสินใจข้อมูลทางสถิติในแต่ละช่วงของการทดสอบ

โดยก่อนทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิตินั้นผู้ทดลองได้ทำการหาตัวอย่างที่ผิดปกติหรืออนุภาคหินโรยทางที่มีการสึกหรอที่ผิดปกติเพื่อป้องกันการประมาณค่าสถิติจะอ่อนไหวต่อตัวอย่างที่ผิดปกติ ทำให้ประมาณค่าสถิติผิด มักทำให้ตัวแปรไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ จึงเป็นที่มาของการตัดตัวอย่างที่ผิดปกติ ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลในลำดับต่อไป

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีการทดสอบค่าเฉลี่ยของการวัดซ้ำของกลุ่มตัวอย่างในกรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควั่นรองใต้หมอนของรถไฟ (NoUSP) ตัวอย่างที่1และตัวอย่างที่2

การเปรียบเทียบปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางในแต่ละโซนการศึกษา และช่วงของการทดสอบระหว่างตัวอย่างที่1กับตัวอย่างที่2

สมมติฐานการทดสอบ

H0 : ปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางของตัวอย่างที่1และตัวอย่างที่2

เท่ากัน

H1 : ปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางของตัวอย่างที่1และตัวอย่างที่2ไม่

เท่ากัน

โชนการศึกษา R,L Lower (R1,L1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ1ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
NoUSP โชน R,L Lower 1M	ตัวอย่างที่1	229	.2646	1.08356	.07160
	ตัวอย่างที่2	233	.3224	1.64309	.10764

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper	
NoUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน R,L Lower 1M	Equal variances assumed	.014	.905	-.446	460	.656	-.05782	.12973	-.31275	.19711
	Equal variances not assumed			-.447	402.542	.655	-.05782	.12928	-.31197	.19634

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา R,L Lower (R1,L1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ1ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนมีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.656 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน H0

โชนการศึกษา R,L Upper (R2,L2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ1ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
NoUSP โชน R,L Upper 1M	ตัวอย่างที่1	250	.3484	1.43248	.09060
	ตัวอย่างที่2	251	.6360	2.15869	.13626

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
NoUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน R,L Upper 1M	Equal variances assumed	5.112	.024	-1.757	499	.080	-.28766	.16375	-.60939	.03407
	Equal variances not assumed			-1.758	434.626	.079	-.28766	.16363	-.60925	.03394

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา R,L Upper (R2,L2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ1ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนมีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนแตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.079 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสีย น้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน H0

### โชนการศึกษา M Lower (M1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ1ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
NoUSP โชน M Lower 1M	ตัวอย่างที่1	113	1.4816	3.85198	.36236
	ตัวอย่างที่2	113	1.0496	3.21222	.30218

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
NoUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน M Lower 1M	Equal variances assumed	2.783	.097	.916	224	.361	.43204	.47183	-.49775	1.36182
	Equal variances not assumed			.916	216.996	.361	.43204	.47183	-.49792	1.36199

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา M Lower (M1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ1ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.361 ซึ่งมีความมากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั่นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสีย น้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน  $H_0$

### โชนการศึกษา M Upper (M2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ1ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
NoUSP โชน M Upper 1M	ตัวอย่างที่1	99	1.0880	2.16225	.21731
	ตัวอย่างที่2	90	1.4021	2.53697	.26742

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
NoUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน M Upper 1M	Equal variances assumed	1.332	.250	-.919	187	.360	-.31413	.34198	-.98877	.36050
	Equal variances not assumed			-.912	175.753	.363	-.31413	.34459	-.99419	.36593

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา M Upper (M2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ1ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.360 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั่นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน  $H_0$

โชนการศึกษา R,L Lower (R1,L1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 2 ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
NoUSP โชน R,L Lower 2M	ตัวอย่างที่1	230	.2763	1.04742	.06906
	ตัวอย่างที่2	233	.3538	1.65718	.10857

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
NoUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน R,L Lower 2M	Equal variances assumed	.657	.418	-.601	461	.548	-.07756	.12903	-.33112	.17600
	Equal variances not assumed			-.603	392.629	.547	-.07756	.12867	-.33053	.17541

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา R,L Lower (R1,L1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 2 ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนของตัวอย่างที่1และ2เท่ากัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.548 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน H0

โชนการศึกษา R,L Upper (R2,L2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 2 ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
NoUSP โชน R,L Upper 2M	ตัวอย่างที่1	249	.4054	1.96060	.12425
	ตัวอย่างที่2	255	.3320	1.84703	.11567

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
NoUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน R,L Upper 2M	Equal variances assumed	1.221	.270	.433	502	.665	.07338	.16963	-.25989	.40666
	Equal variances not assumed			.432	498.531	.666	.07338	.16975	-.26014	.40690

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา R,L Upper (R2,L2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 2 ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.665 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน H0



โชนการศึกษา M Lower (M1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 2 ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
NoUSP โชน M Lower 2M	ตัวอย่างที่1	115	.9023	2.35657	.21975
	ตัวอย่างที่2	111	.9345	2.70568	.25681

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
NoUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน M Lower 2M	Equal variances assumed	.159	.690	-.095	224	.924	-.03216	.33717	-.69660	.63228
	Equal variances not assumed			-.095	217.529	.924	-.03216	.33800	-.69833	.63401

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา M Lower (M1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 2 ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.924 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั่นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน  $H_0$

### โชนการศึกษา M Upper (M2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 2 ล้ารอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
NoUSP โชน M Upper 2M	ตัวอย่างที่1	99	1.3947	3.89123	.39108
	ตัวอย่างที่2	90	1.0824	3.38185	.35648

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
NoUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน M Upper 2M	Equal variances assumed	.981	.323	.586	187	.558	.31230	.53271	-.73860	1.36321
	Equal variances not assumed			.590	186.634	.556	.31230	.52917	-.73162	1.35623

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา M Upper (M2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 2 ล้ารอบพบว่าค่าความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.558 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสีย น้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน  $H_0$

โชนการศึกษา R,L Lower (R1,L1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 3 ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
NoUSP โชน R,L Lower 3M	ตัวอย่างที่1	230	.3403	1.19892	.07905
	ตัวอย่างที่2	233	.4697	1.92723	.12626

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
NoUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน R,L Lower 3M	Equal variances assumed	3.815	.051	-.866	461	.387	-.12931	.14939	-.42288	.16427
	Equal variances not assumed			-.868	388.997	.386	-.12931	.14896	-.42219	.16357

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา R,L Lower (R1,L1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 3 ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนของตัวอย่างที่1และ2เท่ากัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.387 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน H0

โชนการศึกษา R,L Upper (R2,L2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ3ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
NoUSP โชน R,L Upper 3M	ตัวอย่างที่1	250	.3334	.95185	.06020
	ตัวอย่างที่2	255	.3379	1.20630	.07554

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
NoUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน R,L Upper 3M	Equal variances assumed	.276	.600	-.047	503	.962	-.00456	.09682	-.19478	.18566
	Equal variances not assumed			-.047	481.120	.962	-.00456	.09659	-.19436	.18524

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา R,L Upper (R2,L2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 3 ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.962 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน  $H_0$

### โชนการศึกษา M Lower (M1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ3ล้ารอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
NoUSP โชน M Lower 3M	ตัวอย่างที่1	113	1.0611	3.35937	.31602
	ตัวอย่างที่2	112	1.4789	4.40741	.41646

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
NoUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน M Lower 3M	Equal variances assumed	3.417	.066	-.800	223	.424	-.41787	.52217	-1.44689	.61116
	Equal variances not assumed			-.799	207.463	.425	-.41787	.52279	-1.44853	.61280

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา M Lower (M1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 3 ล้ารอบพบว่าค่าความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.424 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน  $H_0$

### โชนการศึกษา M Upper (M2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 3 ล้ารอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
NoUSP โชน M Upper 3M	ตัวอย่างที่1	99	.9014	2.04285	.20531
	ตัวอย่างที่2	90	.7940	1.92199	.20260

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
NoUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน M Upper 3M	Equal variances assumed	.126	.723	.371	187	.711	.10741	.28928	-.46327	.67809
	Equal variances not assumed			.372	186.773	.710	.10741	.28844	-.46161	.67644

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา M Upper (M2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 3 ล้ารอบพบว่าค่าความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.711 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสีย น้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน  $H_0$

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีการทดสอบค่าเฉลี่ยของการวัดซ้ำของกลุ่มตัวอย่างในกรณีใช้  
แผ่นยางพารารวมควั่นรองใต้หมอนของรถไฟ (ParaUSP) ตัวอย่างที่1และตัวอย่างที่2

การเปรียบเทียบปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางในแต่ละโซนการศึกษา  
และช่วงของการทดสอบระหว่างตัวอย่างที่1กับตัวอย่างที่2

สมมติฐานการทดสอบ

H0 : ปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางของตัวอย่างที่1และตัวอย่างที่2  
เท่ากัน

H1 : ปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางของตัวอย่างที่1และตัวอย่างที่2ไม่  
เท่ากัน

โซนการศึกษา R,L Lower (R1,L1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ1ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ParaUSP โซน R,L Lower 1M	ตัวอย่างที่1	232	.3131	1.75284	.11508
	ตัวอย่างที่2	231	.5199	2.41078	.15862

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2- taile d)	Mean Differe nce	Std. Error Differe nce	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
ParaUSP ตัวอย่างที่1,2 โซน R,L Lower 1M	Equal variances assumed	1.655	.199	-1.056	461	.291	-.20685	.19584	-.59169	.17799
	Equal variances not assumed			-1.056	419.994	.292	-.20685	.19597	-.59205	.17834

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา R,L Lower (R1,L1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 1 ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนมีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.291 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่ 1 และ 2 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน  $H_0$

โชนการศึกษา R,L Upper (R2,L2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 1 ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ParaUSP โชน R,L Upper 1M	ตัวอย่างที่1	251	.4455	2.46760	.15575
	ตัวอย่างที่2	254	.3081	1.57342	.09873

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
ParaUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน R,L Upper 1M	Equal variances assumed	3.112	.078	.747	503	.455	.13739	.18394	-.22401	.49878
	Equal variances not assumed			.745	423.664	.457	.13739	.18441	-.22508	.49985

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา R,L Upper (R2,L2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 1 ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนมีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนแตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.455 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$



ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสีย น้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน  $H_0$

โชนการศึกษา M Lower (M1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ1ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ParaUSP โชน	ตัวอย่างที่1	110	1.2681	2.63036	.25080
M Lower 1M	ตัวอย่างที่2	116	.7684	1.84406	.17122

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper	
ParaUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน M Lower 1M	Equal variances assumed	7.497	0.007	1.660	224	.098	.49964	.30092	-.09335	1.0926
	Equal variances not assumed			1.645	194.281	.102	.49964	.30367	-.09926	1.0985

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา M Lower (M1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ1ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนมีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนแตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.102 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสีย น้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน  $H_0$

### โชนการศึกษา M Upper (M2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ1ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ParaUSP โชน	ตัวอย่างที่1	101	2.2646	4.88328	.48590
M Upper 1M	ตัวอย่างที่2	102	1.5912	3.99254	.39532

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
ParaUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน M Upper 1M	Equal variances assumed	2.017	.157	1.076	201	.283	.67338	.62579	-.56057	1.90733
	Equal variances not assumed			1.075	192.633	.284	.67338	.62640	-.56211	1.90887

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา M Upper (M2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ1ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.283 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน H0

โชนการศึกษา R,L Lower (R1,L1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 2 ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ParaUSP โชน R,L Lower 2M	ตัวอย่างที่1	233	.2751	1.06974	.07008
	ตัวอย่างที่2	233	.3243	1.33089	.08719

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
ParaUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน R,L Lower 2M	Equal variances assumed	.460	.498	-.440	464	.660	-.04923	.11186	-.26905	.17059
	Equal variances not assumed			-.440	443.495	.660	-.04923	.11186	-.26908	.17062

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา R,L Lower (R1,L1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 2 ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนของตัวอย่างที่1และ2เท่ากัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.660 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน H0

โชนการศึกษา R,L Upper (R2,L2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ2ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ParaUSP โชน R,L Upper 2M	ตัวอย่างที่1	255	.3414	1.88852	.11826
	ตัวอย่างที่2	256	.5192	2.37985	.14874

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
ParaUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน R,L Upper 2M	Equal variances assumed	2.602	.107	-.935	509	.350	-.17777	.19011	-.55127	.19573
	Equal variances not assumed			-.935	484.807	.350	-.17777	.19003	-.55114	.19561

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา R,L Upper (R2,L2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ2ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.350 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน  $H_0$

โชนการศึกษา M Lower (M1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 2 ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ParaUSP โชน	ตัวอย่างที่1	115	.6226	1.41573	.13202
M Lower 2M	ตัวอย่างที่2	109	.8798	2.04388	.19577

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
ParaUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน M Lower 2M	Equal variances assumed	3.580	.060	-1.100	222	.273	-.25721	.23390	-.71816	.20374
	Equal variances not assumed			-1.089	191.118	.277	-.25721	.23612	-.72295	.20853

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา M Lower (M1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 2 ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.273 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน  $H_0$

### โชนการศึกษา M Upper (M2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 2 ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ParaUSP โชน	ตัวอย่างที่1	99	1.6762	4.88712	.49117
M Upper 2M	ตัวอย่างที่2	102	1.9047	4.02526	.39856

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
ParaUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน M Upper 2M	Equal variances assumed	.053	.817	-.362	199	.717	-.22854	.63072	-1.47230	1.01521
	Equal variances not assumed			-.361	189.729	.718	-.22854	.63254	-1.47625	1.01916

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา M Upper (M2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 2 ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.717 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั่นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน  $H_0$

โชนการศึกษา R,L Lower (R1,L1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 3 ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ParaUSP โชน R,L Lower 3M	ตัวอย่างที่1	231	.3895	2.06799	.13606
	ตัวอย่างที่2	233	.2118	.96443	.06318

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
ParaUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน R,L Lower 3M	Equal variances assumed	5.589	.018	1.188	462	.236	.17768	.14960	-.11631	.47166
	Equal variances not assumed			1.184	324.906	.237	.17768	.15002	-.11745	.47281

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา R,L Lower (R1,L1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 3 ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนมีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนของตัวอย่างที่1และ2ไม่เท่ากัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.237 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน H0

โชนการศึกษา R,L Upper (R2,L2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 3 ล้านรอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ParaUSP โชน R,L Upper 3M	ตัวอย่างที่1	255	.8192	4.17397	.26138
	ตัวอย่างที่2	255	.7670	3.60809	.22595

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
ParaUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน R,L Upper 3M	Equal variances assumed	.138	.710	.151	508	.880	.05220	.34551	-.62660	.73099
	Equal variances not assumed			.151	497.586	.880	.05220	.34551	-.62663	.73103

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา R,L Upper (R2,L2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 3 ล้านรอบพบว่าค่าความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.880 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน  $H_0$



โชนการศึกษา M Lower (M1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ3ล้ารอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ParaUSP โชน	ตัวอย่างที่1	114	1.1160	3.93233	.36830
M Lower 3M	ตัวอย่างที่2	115	1.2066	3.41736	.31867

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
ParaUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน M Lower 3M	Equal variances assumed	.007	.935	-.186	227	.852	-.09064	.48673	-1.04972	.86844
	Equal variances not assumed			-.186	222.126	.853	-.09064	.48702	-1.05042	.86914

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา M Lower (M1) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 3 ล้ารอบพบว่าค่าความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.852 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน H0

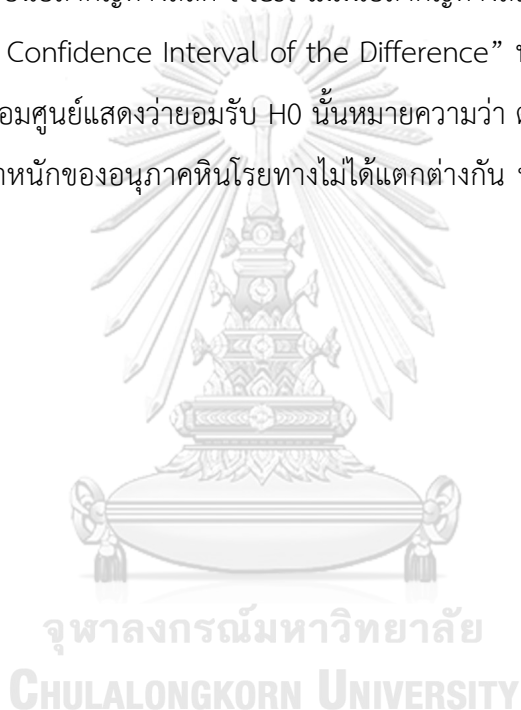
โชนการศึกษา M Upper (M2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ3ล้ารอบ

Group Statistics					
	Group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ParaUSP โชน	ตัวอย่างที่1	102	2.2239	4.94746	.48987
M Upper 3M	ตัวอย่างที่2	102	2.1538	4.69139	.46452

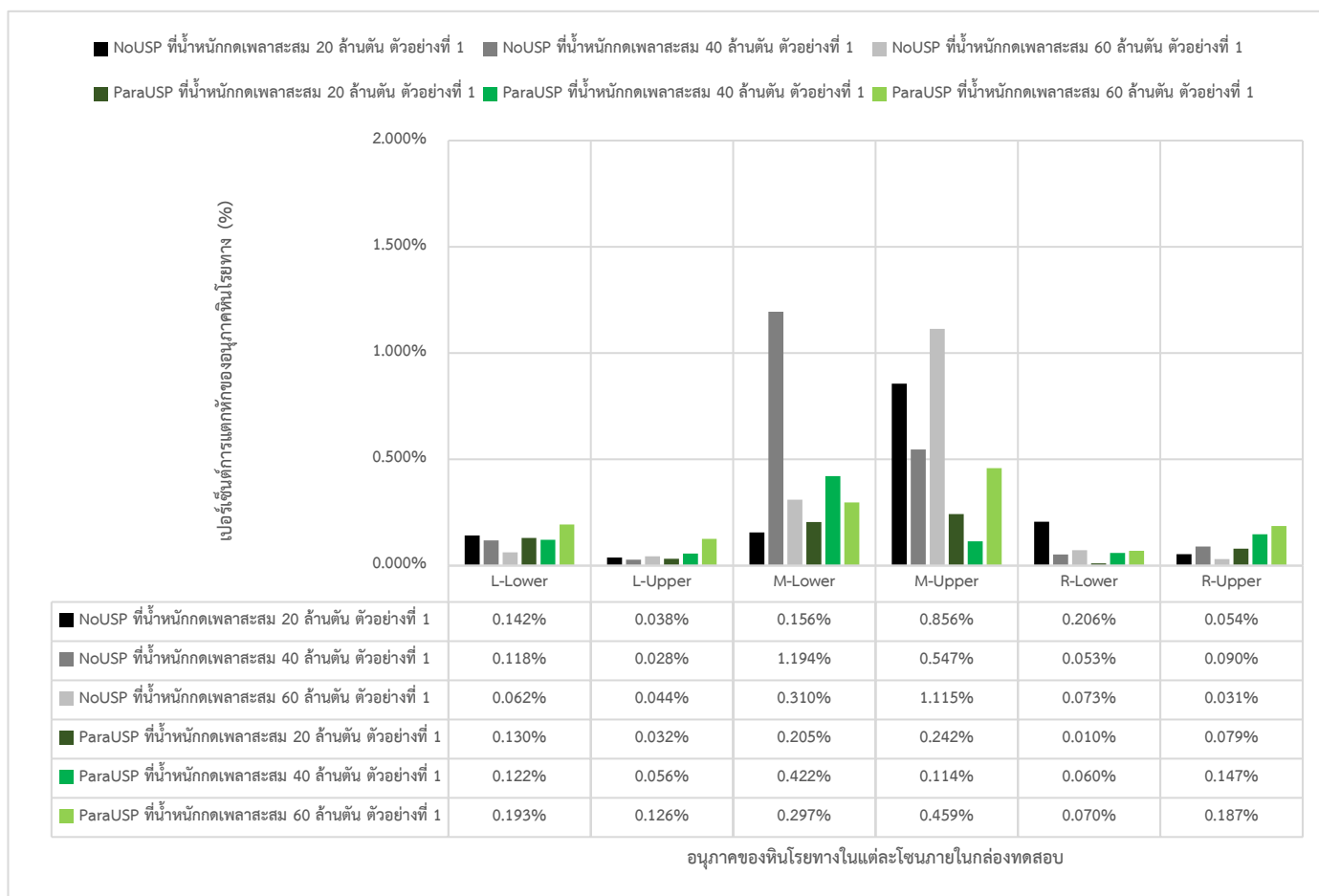
Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
ParaUSP ตัวอย่างที่1,2 โชน M Upper 3M	Equal variances assumed	.252	.616	.104	202	.917	.07010	.67509	-1.26103	1.40123
	Equal variances not assumed			.104	201.432	.917	.07010	.67509	-1.26106	1.40125

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโชนการศึกษา M Upper (M2) ที่จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ 3 ล้ารอบพบว่าค่าความแปรปรวนไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.917 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานว่าง นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่1และ2 มีปริมาณการสูญเสีย น้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน จึงยอมรับสมมติฐาน H0

จากผลการทดสอบทางสถิติเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการสูญเสียน้ำหนักหินของตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 สามารถสรุปได้ว่าในกรณีการทดสอบที่ไม่ใช้แผ่นยางพาราและใช้แผ่นยางพารารองใต้หมอนรถไฟ (NoUSP) และ (ParaUSP) ที่มีการทดสอบแบบ (Repetition) สองกรณี ที่กล่าวข้างต้น ทั้งในตัวอย่างที่ 1 และ ตัวอย่างที่ 2 พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางในแต่ละช่วงของการทดสอบและในแต่ละโซนการศึกษาภายในกล่องทดสอบมีค่าความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน (Pooled Variance) ตามที่สันนิษฐานไว้ด้วยสูตร F-test รวมถึงการทดสอบทางสถิติเพื่อการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่ 1 และกลุ่มตัวอย่างที่ 2 พบว่าจากการทดสอบทางสถิติสำหรับนัยสำคัญทางสถิติ t-test ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ รวมถึงการสังเกตในช่วงความเชื่อมั่น “95% Confidence Interval of the Difference” พบว่าค่าต่ำสุด (Lower) และค่าสูงสุด (Upper) คร่อมศูนย์แสดงว่ายอมรับ  $H_0$  นั้นหมายความว่า ตัวอย่างการทดสอบที่ 1 และ 2 มีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางไม่ได้แตกต่างกัน ทั้งในกรณีของไม่ใช้และใช้แผ่นยางพารารวมควัน



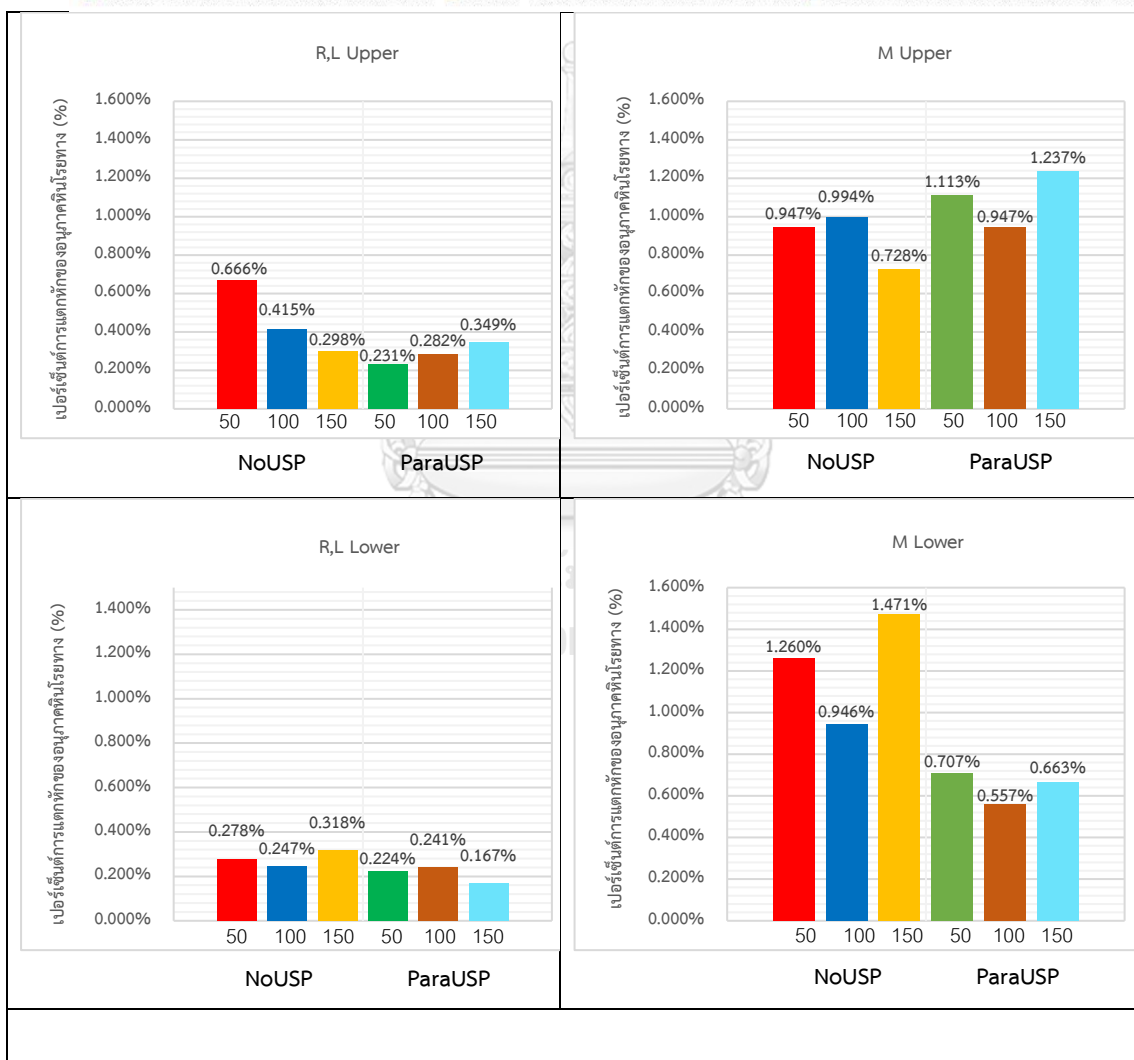
กรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารวมควันเป็นแผ่นรองใต้หมอนของรถไฟ (NoUSP) กับ ใช้แผ่นยางพารารวมควันเป็นแผ่นรองใต้หมอนของรถไฟ (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลาสะสมทีละ 20 ล้านตัน



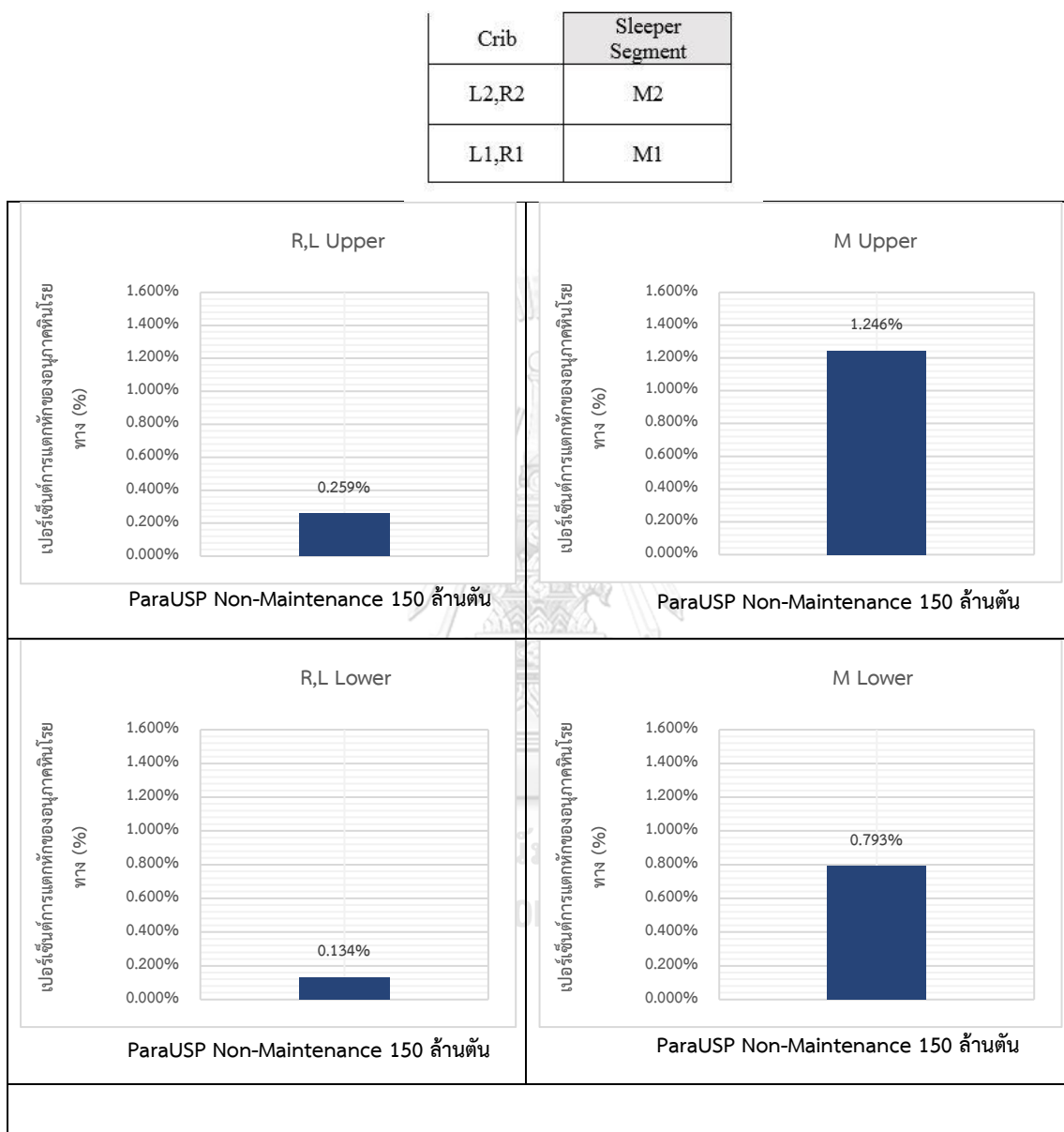
กรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควันเป็นแผ่นรองใต้หมอนของรถไฟ (NoUSP) กับ ใช้แผ่นยางพารารมควันเป็นแผ่นรองใต้หมอนของรถไฟ (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลาสะสมทีละ 50 ล้านตัน

Crib	Sleeper Segment
L2,R2	M2
L1,R1	M1

■ NoUSP ที่น้ำหนักกดเพลาสะสม 50 ล้านตัน   
 ■ NoUSP ที่น้ำหนักกดเพลาสะสม 100 ล้านตัน   
 ■ NoUSP ที่น้ำหนักกดเพลาสะสม 150 ล้านตัน  
■ ParaUSP ที่น้ำหนักกดเพลาสะสม 50 ล้านตัน   
 ■ ParaUSP ที่น้ำหนักกดเพลาสะสม 100 ล้านตัน   
 ■ ParaUSP ที่น้ำหนักกดเพลาสะสม 150 ล้านตัน



กรณีใช้แผ่นยางพารารวมควั่นเป็นแผ่นรองใต้หมอนของรถไฟ (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลาสะสมทีละ 50 ล้านตัน โดยไม่มีการจัดเรียงอนุภาคหินโรยทางใหม่ตลอดช่วงของการทดสอบ



รูปที่ 49 รูปแบบและปริมาณการแตกหักของหินโรยทางที่ตำแหน่งต่างๆภายในกล่องทดสอบหินโรยทาง

จากรูปที่ 49 ข้างต้นสามารถแสดงระบุเปอร์เซ็นต์การแตกหักของหินโรยทางในแต่ละโซน ทั้งหมด 6 โซนที่ศึกษาภายในกล่องทดสอบหินโรยทางตามที่ระบุไว้ก่อนหน้านี้ แม้ว่าการทดสอบกล่องทดสอบหินโรยทางจะถูกตั้งค่าแบบสมมาตรกับตำแหน่งการบรรจุ แต่ก็พบว่าการแตกของอนุภาคหินโรยทางที่สูงขึ้นสามารถเกิดขึ้นได้ในด้านเดียว (ซ้ายหรือขวา) สิ่งเหล่านี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นของการบดอัดที่ไม่สามารถควบคุมได้ของอนุภาคหินโรยทางภายในกล่องทดสอบระหว่างการเตรียมวัสดุชิ้นงาน ในขณะที่เดียวกันปริมาณการแตกของโซนบนและล่างดูเหมือนจะให้ข้อมูลที่ น่าสนใจ โดยสามารถวิเคราะห์ข้อมูลต่อไปนี้โดยสังเกตจากกราฟ

- ในการเปรียบเทียบของกรณีการใช้น้ำหนักกดเพลลาที่ 20 ตัน ระหว่างกล่องทดสอบหินโรยทางที่มีการใช้และไม่ใช้ แผ่นยางพารารมควันรองใต้หมอนรถไฟ พบว่าระหว่าง NoUSP กับ ParaUSP มีปริมาณการแตกในโซนด้านบนรวมทั้งโซนด้านล่างสะสมตลอดช่วงของการทดสอบที่ 3 ล้านรอบมีค่าปริมาณการแตกหักสะสม อยู่ที่ 5.119% กับ 2.954% ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอยู่ถึง 2.165% ซึ่งสรุปได้ว่ากรณีการไม่ใช้แผ่นยางพารารมควันที่ น้ำหนักกดเพลลา 20Ton สามารถที่จะลดการแตกหักของหินโรยทางได้ถึง 73.29% ของปริมาณหินโรยทางทั้งหมดภายในกล่องทดสอบ
- จะเห็นได้ว่าในกรณีของการทดสอบที่ใช้น้ำหนักกดเพลลาที่ 50 ตัน ในกรณีของไม่ใช้แผ่นยางพารารมรองใต้หมอน NoUSP มีเปอร์เซ็นต์ของการแตกของอนุภาคหินโรยทางสะสมที่ 3 ล้านรอบสะสมอยู่ที่ 11.003% ของตัวอย่างที่ 1 และ 10.57% ของตัวอย่างที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้แผ่นยางรองใต้หมอน ParaUSP มีการแตกของอนุภาคหินโรยทาง อยู่ที่ 7.55% ของตัวอย่างที่ 1 และ 8.87% ของตัวอย่างที่ 2 โดยสรุปได้ว่ากรณีของ NoUSP มีปริมาณการแตกหักที่มากกว่าอยู่ประมาณ 31.382 % จากค่าเฉลี่ย ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่าเมื่อมีการติดตั้งแผ่นยางพารารมควันที่ใต้หมอนสามารถลดการแตกหักภายในกล่องทดสอบจากปริมาณหินโรยทางทั้งหมด และจากอีกกรณีการทดสอบที่มีการใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSP) โดยไม่มีการจัดเรียงอนุภาคหินโรยทางใหม่กลับพบว่าปริมาณการแตกหักเพียง 2.825% ซึ่งมีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่มีการจัดเรียงอนุภาคหินโรยทาง

ตารางที่ 11 สรุปผลของอัตราการแตกของอนุภาคหินโรยทางระหว่างโซนด้านบนและโซน  
ด้านล่าง

กล่องทดสอบ หินโรยทาง	การแตกในโซน ด้านบน	การแตกในโซน ด้านล่าง	อัตราส่วนการแตก ระหว่างโซน บน:ล่าง
NoUSP Normal Load 20ตัน ตัวอย่างที่ 1	0.463%	0.389%	54.34 : 45.66
ParaUSP Normal Load 20ตัน ตัวอย่างที่ 1	0.310%	0.243%	56.06 : 43.94
NoUSP Heavy Load 50ตัน ตัวอย่างที่ 1	1.417%	1.173%	54.71 : 45.29
NoUSP Heavy Load 50ตัน ตัวอย่างที่ 2	1.905%	1.271%	59.98 : 40.02
Para USP Heavy Load 50ตัน ตัวอย่างที่ 1	1.631%	0.633%	72.04 : 27.96
Para USP Heavy Load 50ตัน ตัวอย่างที่ 2	2.113%	1.11%	65.56 : 34.44
ParaUSP Non- Maintenance Heavy Load 50ตัน ตัวอย่างที่ 1	0.428%	0.549%	43.81 : 56.19



- จากตารางที่ 11 แสดงอัตราส่วนของการแตกหักระหว่างโซนบนและโซนล่าง โดยอ้างอิงผลจากการบันทึกสะสมของการทดสอบก็สามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนของทุกกรณีกล่องทดสอบหินโรยทางมีอัตราส่วนของการแตกหักสะสมที่โซนด้านบนมากกว่าการแตกหักสะสมที่โซนด้านล่าง ยกเว้นในกรณีการทดสอบของกล่องทดสอบ ParaUSP Non-Maintenance Heavy Load 50Ton Sample 1 ที่มีการแตกหักในโซนล่างมากกว่าโซนบนเมื่อเปรียบเทียบกับกล่องทดสอบหินโรยทางอื่นๆที่พบว่าอนุภาคหินโรยทางแตกในโซนบนมีมากกว่าโซนด้านล่าง ซึ่งเกิดจากการที่ กล่องทดสอบ ParaUSP Non-Maintenance Heavy Load 50Ton Sample 1 มีการทดสอบแรงกระทำซ้ำโดยไม่มีจัดเรียงอนุภาคหินโรยทางใหม่เลยตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบทำให้เกิดการปนเปื้อนสะสมจากแรงกระทำซ้ำอยู่ที่โซนด้านล่างภายในกล่องทดสอบหินโรยทางที่การรับแรงกระทำซ้ำสะสมเป็นระยะเวลาสั้น จึงอาจที่จะเป็นสาเหตุที่ทำให้พบว่าการแตกหักที่โซนด้านล่างมากกว่าโซนด้านบน

#### 4.1.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ

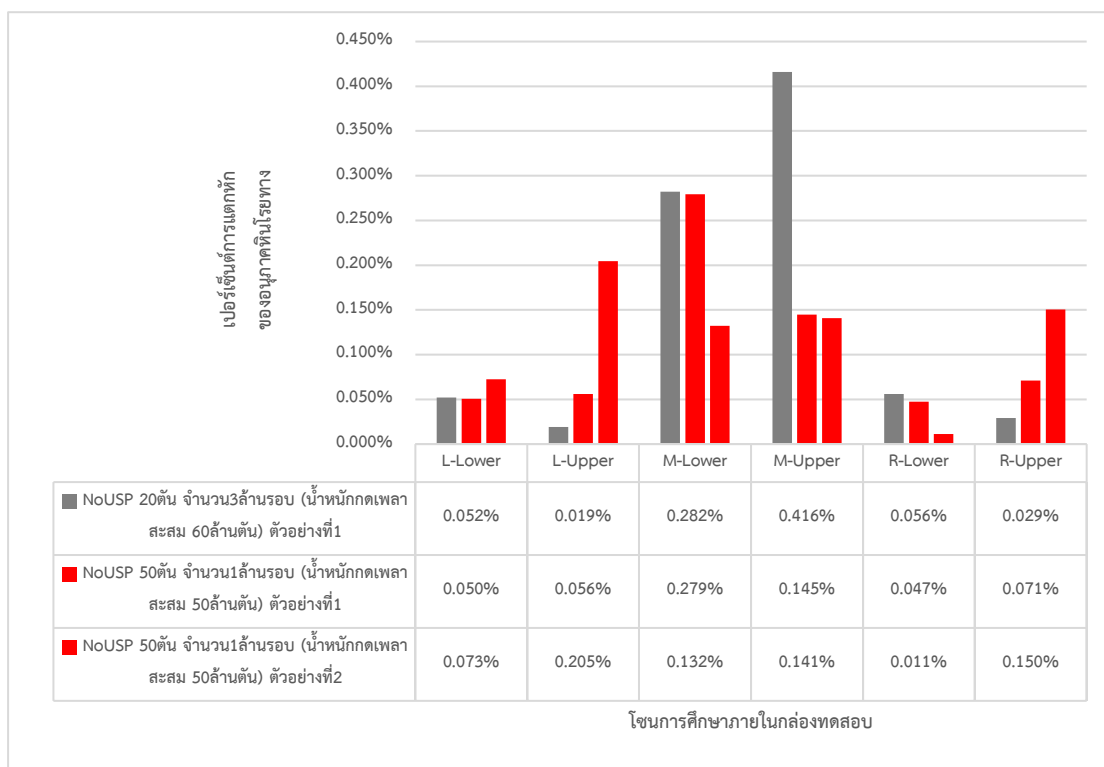
##### 4.1.3.1 กรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา20ตันจำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่3ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง เปรียบเทียบกับ กรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา50ตันจำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่1ล้านรอบ

จากการทดสอบที่ไม่ใช้แผ่นยางพารารมควันรองใต้หมอนของรถไฟ (NoUSP) มีการใช้น้ำหนักกดเพลลาที่แตกต่างกันมีทั้งการใช้น้ำหนักกดเพลลาที่20ตัน ซึ่งมีจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำสะสมอยู่ที่ประมาณ3ล้านรอบโดยประมาณทุกๆ1 ล้านรอบจะมีการจัดเรียงอนุภาคหินโรยทางใหม่ กับการใช้น้ำหนักกดเพลลาที่50ตัน ซึ่งมีจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำที่อยู่ที่ประมาณ1ล้านรอบ ทั้งสองกรณีที่กล่าวไว้ข้างต้นค่อนข้างที่จะมีภาระน้ำหนักเพลลาที่กระทำสะสมต่ออนุภาคหินโรยทางใกล้เคียงกัน

ผลการวิเคราะห์จากเปอร์เซ็นต์การแตกหักของอนุภาคหินโรยทาง พบว่าปริมาณการแตกหักของอนุภาคหินโรยทางมีแนวโน้มที่น่าสนใจโดยเฉพาะโซนการศึกษาที่อยู่ใต้หมอนของรถไฟ (M-Upper) ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การแตกหักค่อนข้างจะแตกต่างกัน โดยพบจากการทดสอบว่าในกรณีของการทดสอบที่มีการจัดเรียง

อนุภาคหินโรยทาง มีแนวโน้มที่จะทำให้ส่งผลกระทบต่ออนุภาคหินโรยทางที่สัมผัสอยู่ข้างใต้ของหมอนรถไฟ มีปริมาณการแตกหักที่สูงกว่าอันเนื่องมาจากการรับแรงกระทำซ้ำโดยตรงภายใต้หมอน โดยอนุภาคหินโรยทางมีการจัดชุดมุมกันใหม่ระหว่างช่วงของการทดสอบ และเป็นที่น่าสนใจในกรณีของการทดสอบที่มีการใช้น้ำหนักกดเพลลาที่สูงกว่าส่งผลให้ปริมาณการแตกหักของอนุภาคหินโรยทางภายในกล่องทดสอบที่อยู่บริเวณอื่นนอกจากโซนการศึกษาที่อยู่ใต้หมอนของรถไฟมีปริมาณการแตกหักที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้น้ำหนักกดเพลลาที่น้อย

แต่ถึงอย่างนั้นปริมาณการแตกหักที่เกิดขึ้นภายในกล่องทดสอบ พบว่ากรณีน้ำหนักกดเพลลาสะสมที่ 60 ล้านตัน และมีการจัดเรียงอนุภาคหินโรยทางใหม่มีปริมาณการแตกหักอยู่ที่ 0.854% ของปริมาณอนุภาคหินโรยทางทั้งหมดภายในกล่อง และ กรณีน้ำหนักกดเพลลาสะสมที่ 50 ล้านตัน โดยไม่มีการจัดเรียงอนุภาคหินโรยทาง มีปริมาณการแตกหักอยู่ที่ 0.649% และ 0.712% ของตัวอย่างที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

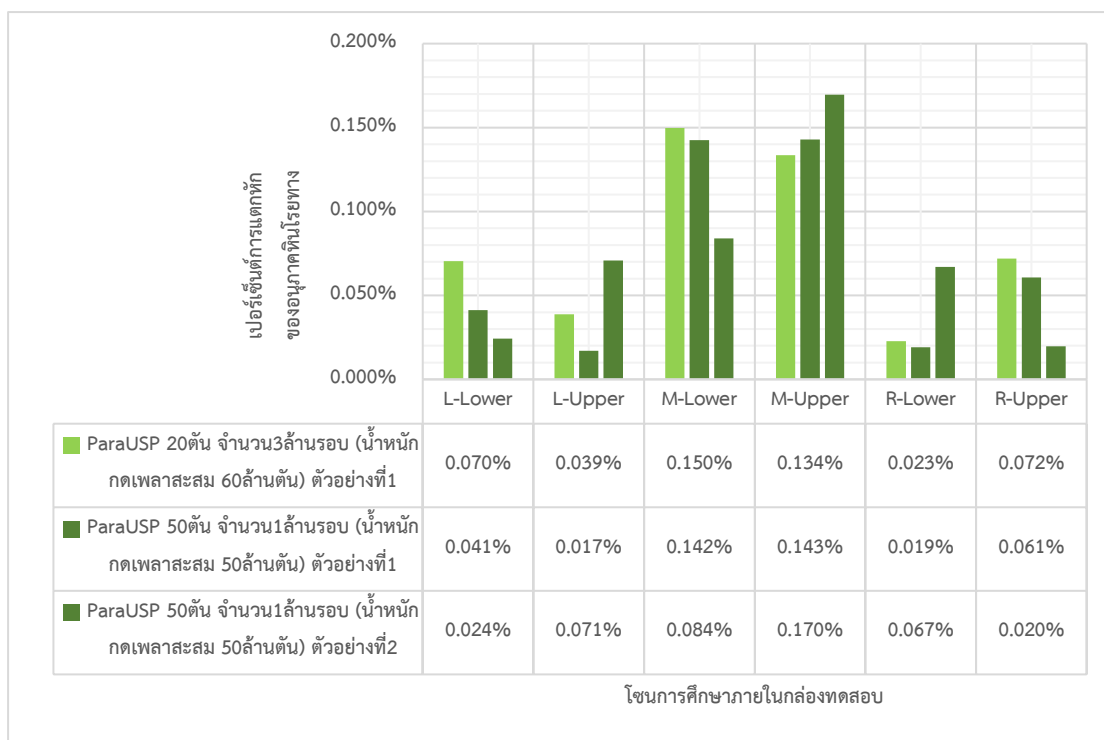


รูปที่ 50 เปรียบเทียบปริมาณการแตกหักของกรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) ในกรณีของน้ำหนักกตเพลาคือ 20 ตัน กับ 50 ตัน โดยมีจัดเรียงหินใหม่ ในกรณี 20 ตัน จำนวน 2 ครั้ง

**4.1.3.2 กรณีใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSPs) ที่น้ำหนักกดเพลลา20ตันจำนวนรอบ แรงกระทำซ้ำสะสมที่3ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง เปรียบเทียบกับ กรณีไม่ใช้ แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSPs) ที่น้ำหนักกดเพลลา50ตันจำนวนรอบแรง กระทำซ้ำสะสมที่1ล้านรอบ**

จากการทดสอบที่ใช้แผ่นยางพารารมควันรองใต้หมอนของรถไฟ (ParaUSPs) มีการใช้น้ำหนักกดเพลลาที่แตกต่างกันมีทั้งการใช้น้ำหนักกดเพลลาที่20ตัน ซึ่งมีจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำสะสมอยู่ที่ประมาณ3ล้านรอบโดยประมาณทุกๆ1ล้านรอบจะมีการจัดเรียงอนุภาคหินโรยทางใหม่ กับการใช้น้ำหนักกดเพลลาที่50ตัน ซึ่งมีจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำที่อยู่ประมาณ1ล้านรอบ ทั้งสองกรณีที่กำลังกล่าวไว้ข้างต้นค่อนข้างที่จะมีภาระน้ำหนักเพลลาที่กระทำสะสมต่ออนุภาคหินโรยทางใกล้เคียงกัน

ผลการวิเคราะห์จากเปอร์เซ็นต์การแตกหักของอนุภาคหินโรยทาง พบว่าปริมาณการแตกหักของอนุภาคหินโรยทางมีแนวโน้มที่น่าสนใจโดยเฉพาะโซนการศึกษาที่อยู่ใต้หมอนของรถไฟ (M-Lower และ M-Upper) ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การแตกหักค่อนข้างจะสอดคล้องและใกล้เคียงกัน รวมถึงปริมาณการแตกหักสะสมภายในกล่อง ที่ ใกล้เคียงกัน โดยในกรณีของ ParaUSP ที่น้ำหนักกดเพลลาสะสมที่60 ล้านตัน มีค่าการแตกสะสมอยู่ที่ 0.487% ต่อปริมาณอนุภาคหินโรยทางภายในกล่องทดสอบ และ ที่น้ำหนักกดเพลลาสะสมที่ 50 ล้านตัน มีปริมาณแตกการหักของอนุภาคหินโรยทาง 0.423% และ 0.435% ของตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 ตามลำดับ



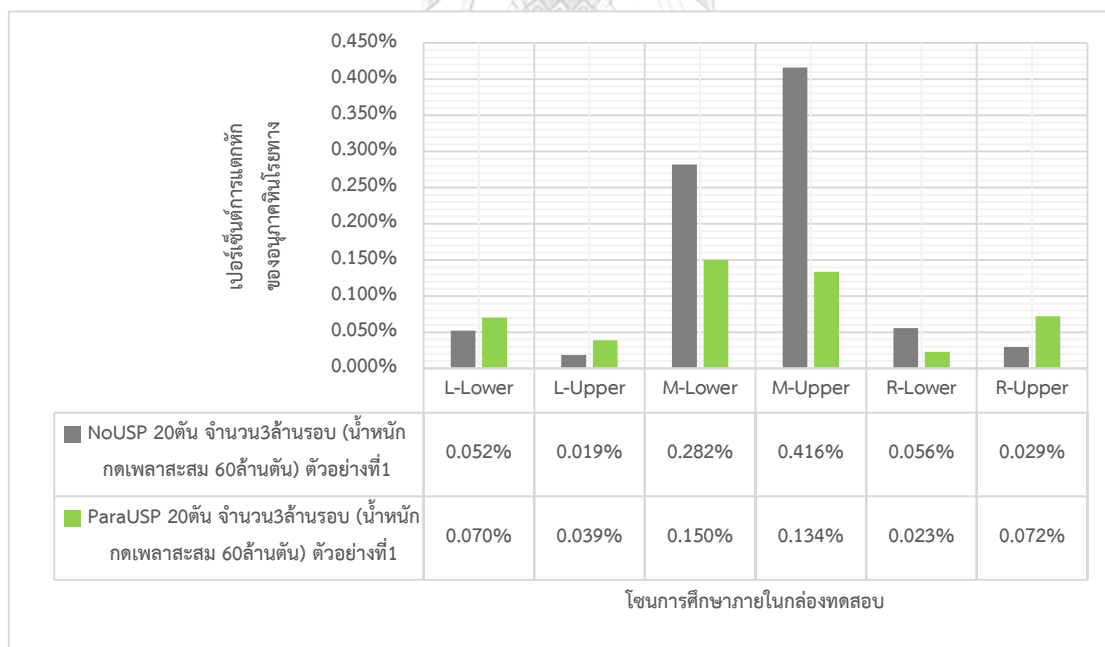
รูปที่ 51 เปรียบเทียบปริมาณการแตกหักของกรณีใช้แผ่นยางพารารมควัน(ParaUSP)ในกรณีของน้ำหนักกตเพลาน้ำหนักที่ 20 ตัน กับ 50 ตัน โดยมีจัดเรียงหินใหม่ในกรณี20ตัน จำนวน2ครั้ง

#### 4.1.3.3 กรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) เปรียบเทียบกับ กรณีใช้แผ่น

ยางพารารมควัน (ParaUSPs) ที่น้ำหนักกดเพลลา20ตันจำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ  
สะสมที่3ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง

จากการทดสอบที่ใช้แผ่นยางพารารมควันรองใต้หมอนของรถไฟ  
(ParaUSPs) มีการใช้น้ำหนักกดเพลลาที่แตกต่างกันมีทั้งการใช้น้ำหนักกดเพลลาที่20  
ตัน ซึ่งมีจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำสะสมอยู่ที่ประมาณ 3ล้านรอบโดยประมาณ  
ทุกๆ1ล้านรอบจะมีการจัดเรียงอนุภาคหินโรยทางใหม่ โดนทั้งสองกรณีมีปริมาณ  
น้ำหนักกดเพลลาสะสมที่เท่ากันที่ 60ล้านตัน

จากผลที่ได้สรุปได้ชัดเจนว่าปริมาณได้แตกหักของกรณีที่ไม่ใช้แผ่น  
ยางพารารมควันที่(NoUSP) ปริมาณการแตกหักมากกว่ากรณีที่ใช้แผ่นยางพารา  
รุมควัน (ParaUSP) มากขึ้นถึง 75% ของการใช้ของน้ำหนักกดเพลลาที่20ตัน ซึ่งเป็น  
ที่แน่ชัดแล้วว่า ยางพารารมควันที่รองใต้หมอนของรถไฟสามารถลดการแตกหักของ  
อนุภาคหินโรยทางได้อย่างดีในกรณีของน้ำหนักกดเพลลาที่20ตัน



รูปที่ 52 เปรียบเทียบปริมาณการแตกหักของกรณีใช้และไม่ใช้แผ่นยางพารารมควันในกรณีของน้ำหนักกดเพลลาที่ 20 ตัน โดยมีจัดเรียงหินใหม่

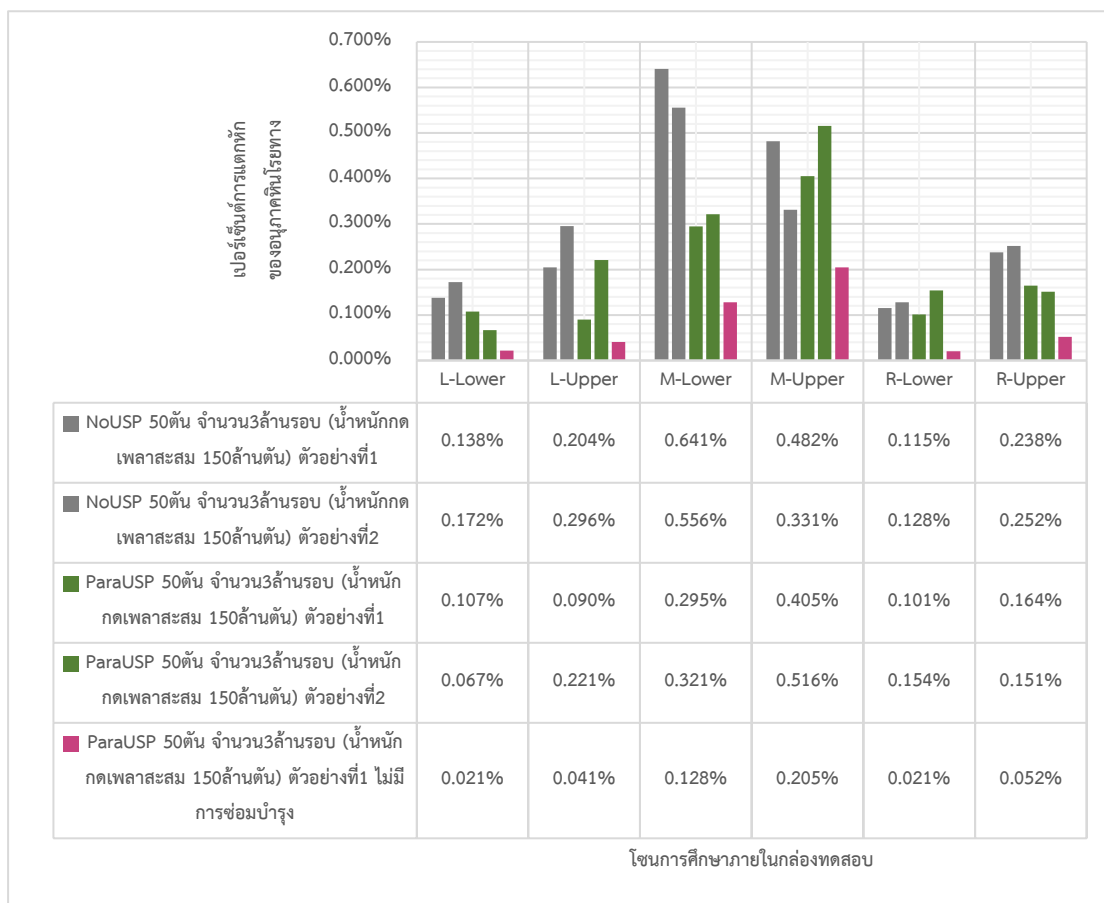
#### 4.1.3.4 กรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) เปรียบเทียบกับ กรณีใช้แผ่น

ยางพารารมควัน (ParaUSPs) ที่น้ำหนักกดเพลลา50ตันจำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ  
สะสมที่3ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุงและไม่มีการซ่อมบำรุง

จากการทดสอบที่ใช้และไม่ใช้แผ่นยางพารารมควันรองใต้หมอนของรถไฟ มีทั้งการใช้  
น้ำหนักกดเพลลาที่50ตัน ซึ่งมีจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำสะสมอยู่ที่ประมาณ3ล้านรอบ  
โดยประมาณทุกๆ1ล้านรอบจะมีการจัดเรียงอนุภาคหินโรยทางใหม่ และไม่มีการจัดเรียง  
อนุภาคของหินโรยทางใหม่เลยในกรณีของการใช้แผ่นยางพารารมควัน โดยทั้งสองกรณีมี  
ปริมาณน้ำหนักกดเพลลาสะสมที่เท่ากันที่ 150ล้านตัน

สรุปผลการทดสอบจากการพบพบว่าในกรณีของใช้น้ำหนักกดเพลลาที่50ตัน พบว่าการ  
ใช้แผ่นยางพารารมควันรองข้างใต้หมอน (ParaUSP) ในโซนศึกษา (M-Upper) มีปริมาณ  
การแตกหักที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของการที่ไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP)  
เมื่อเทียบกับการแตกหักเฉลี่ยของกรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) แต่ในส่วนของ  
โซนการศึกษา (M-Lower) พบว่ากรณีที่ใช้แผ่นยางพารารมควัน มีปริมาณการแตกหักที่น้อย  
กว่า กรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) ซึ่งตรงกันข้ามกับโซนการศึกษา (M-Upper)  
โดยมีปริมาณการแตกหักที่น้อยกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบในกรณีที่มีปริมาณการแตกหักสะสม  
ภายในกล่องทดสอบ กรณีของไม่ใช้แผ่นยางรองใต้หมอน (NoUSP) มีค่าการแตกสะสมอยู่ที่  
1.818% และ 1.734% ของตัวอย่างที่1 และ 2 เทียบกับ กรณีใช้แผ่นยางรองใต้หมอน  
(ParaUSP) มีค่าการแตกสะสมอยู่ที่ 1.163% และ 1.430% ของตัวอย่าง ที่1 และ 2 ซึ่ง  
กรณีของไม่ใช้แผ่นยางรองใต้หมอน (NoUSP)มีค่าปริมาณการแตกสะสมเพิ่มสูงสุดถึง  
56.32% เมื่อเทียบกับค่าการแตกหักที่น้อยที่สุดของกรณีใช้แผ่นยางรองใต้หมอน (ParaUSP)

ในทางตรงกันข้ามจากการทดสอบของกรณีที่ใช้แผ่นยางพารารมควันและไม่มีการ  
จัดเรียงอนุภาคของหินโรยทางใหม่ทุกๆรอบแรงกระทำซ้ำที่1ล้านรอบ กลับพบว่า ปริมาณ  
การแตกหักของกรณีดังกล่าวมีเปอร์เซ็นต์ที่ค่อยข้างจะน้อยมากเพียง 0.468% ถึงแม้ว่าจะมี  
การรับน้ำหนักสะสมที่เท่ากัน จึงสรุปได้ว่าทุกๆครั้งที่มีการจัดเรียงกันของอนุภาคหินโรยทาง  
ใหม่นั้นจะทำให้เกิดการแตกหักที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเห็นผลได้ชัดในบริเวณพื้นที่โซนการศึกษา  
ใต้หมอนของรถไฟโดยตรง (M-Upper) อันเนื่องมาจากการเรียงตัวของอนุภาคใหม่ทำให้เกิด  
การจัดชิดมุมกันของอนุภาคหินโรยทางในการรับแรงกระทำซ้ำ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Chulalongkorn University

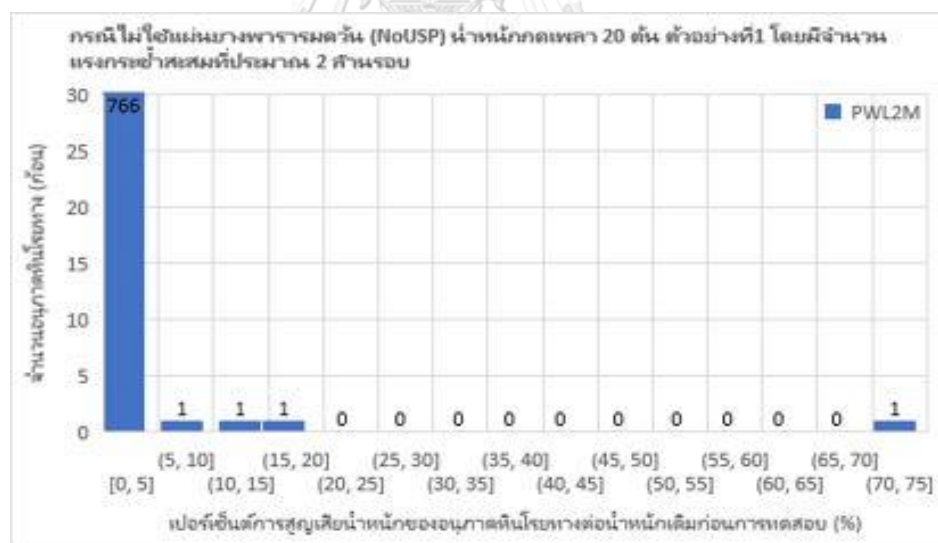
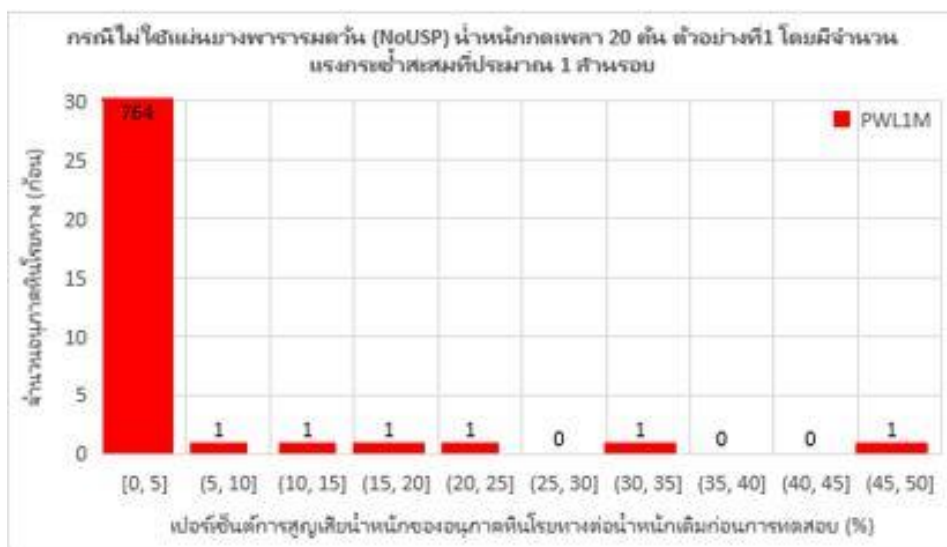
รูปที่ 53 เปรียบเทียบปริมาณการแตกหักของกรณีใช้และไม่ใช้แผ่นยางพารารวมควมวันในกรณีของน้ำหนักรัดเพลลาที่ 50 ตัน โดยมีกรณีที่มีและไม่มีการจัดเรียงหินใหม่

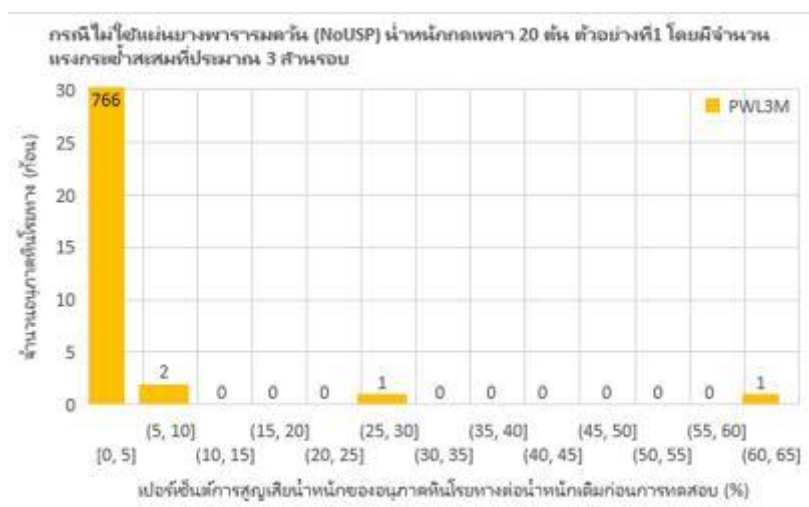


## 4.2 อนุภาคหินโรยทางที่แตกหัก

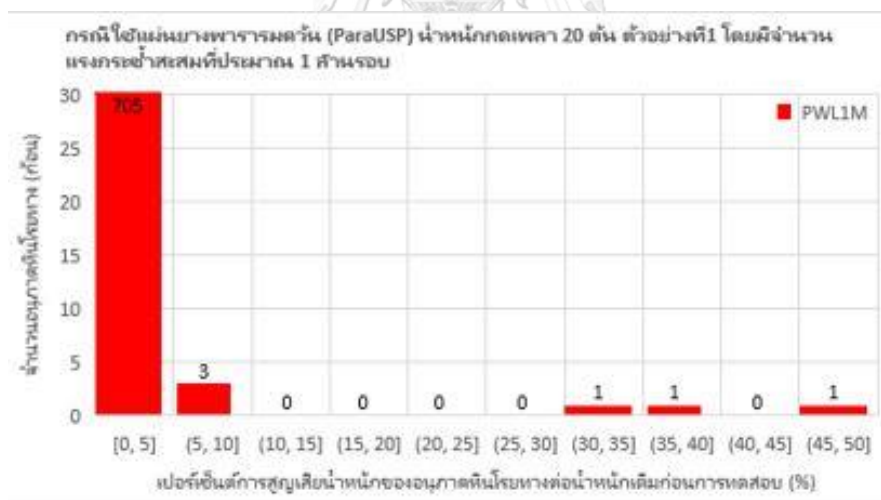
### 4.2.1 อนุภาคหินโรยทางที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละขนาด

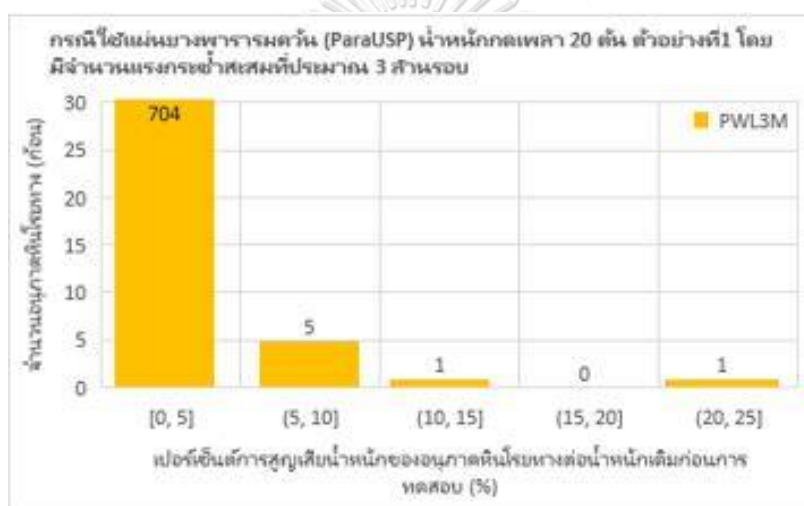
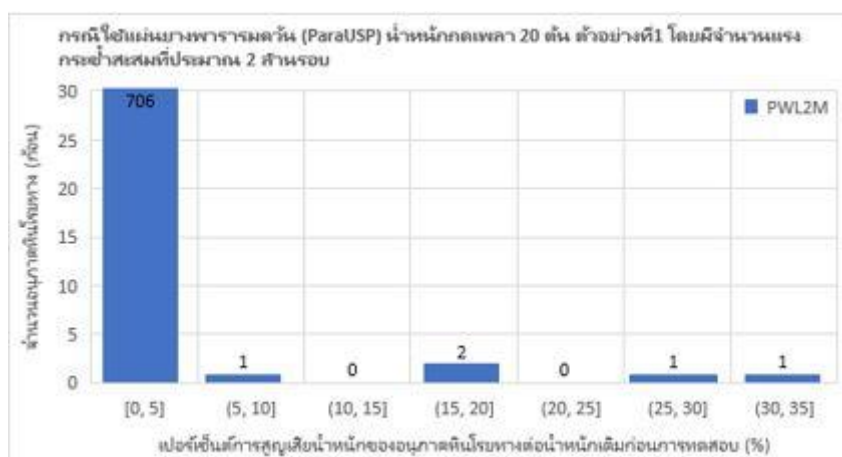
4.2.1.1 กรณีไม่ใช้แผ่นยางพาราคลุมวัน (NoUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 20 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 1



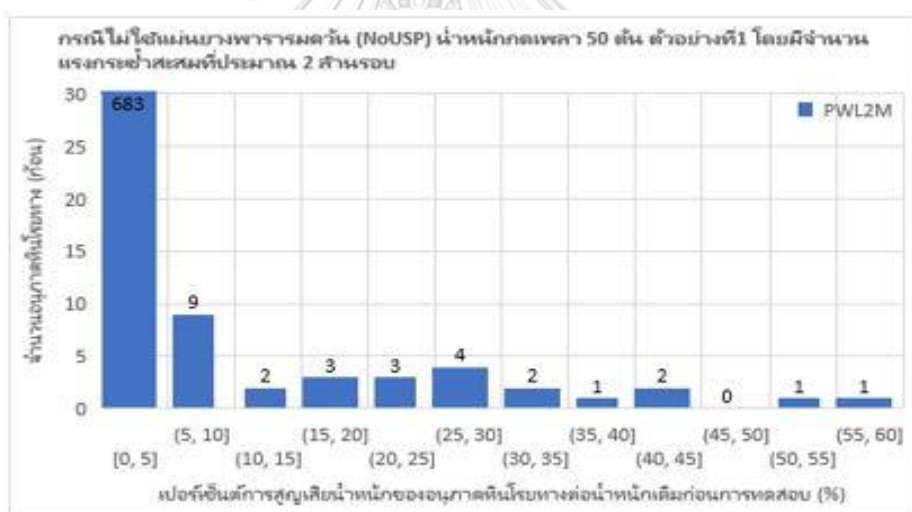
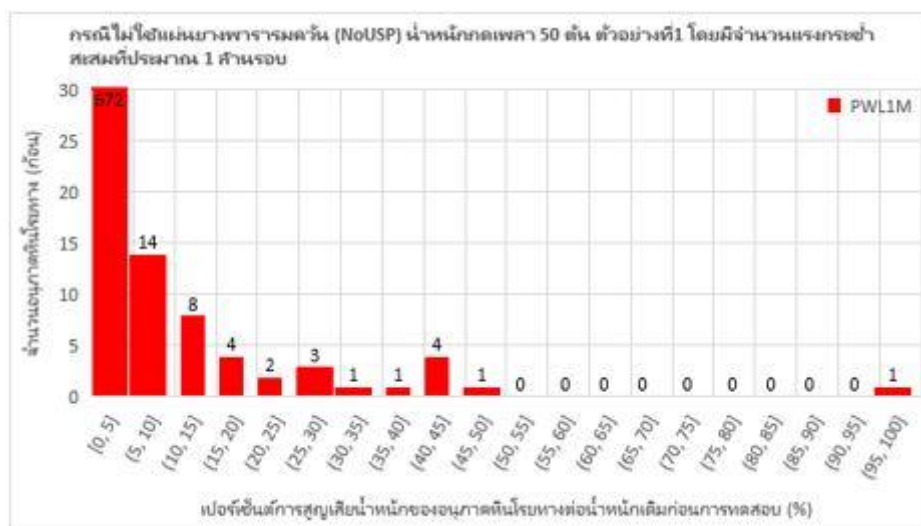


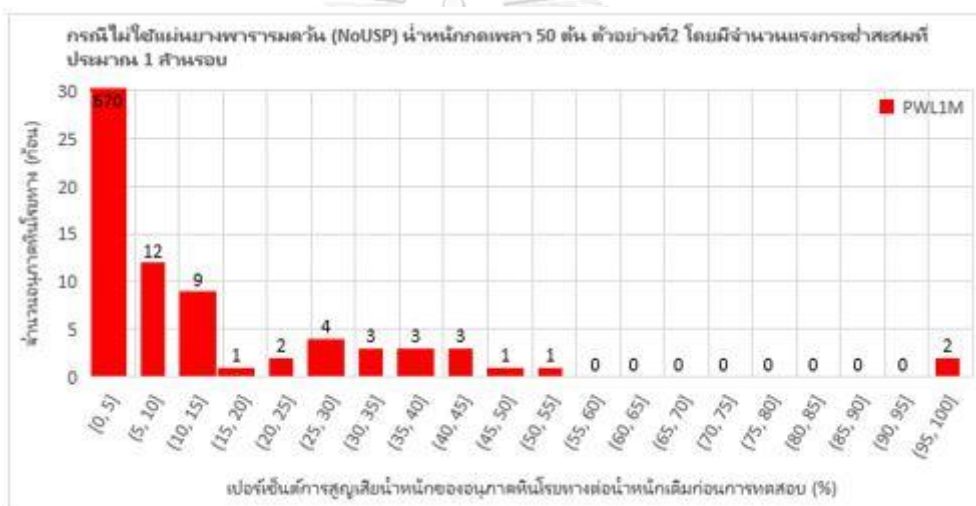
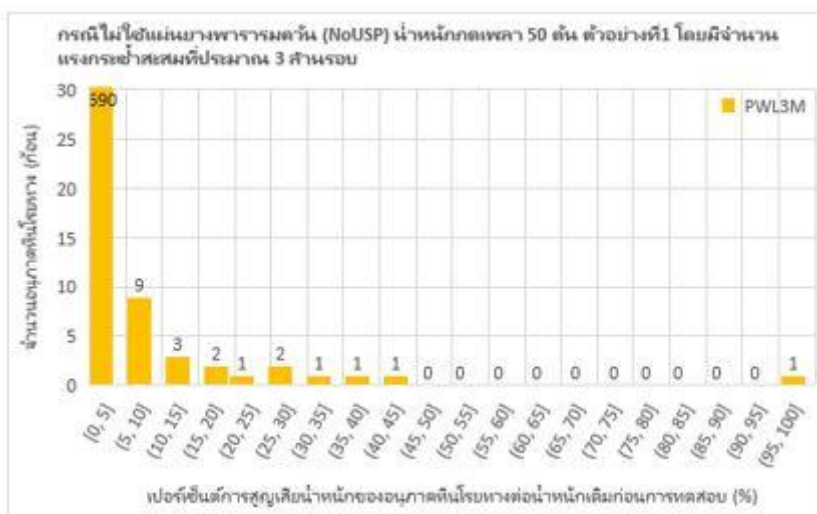
4.2.1.2 กรณีใช้แผ่นยางพาราธรรมดวัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักดผลเพลลา 20 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำเข้าสะสมที่3ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่1

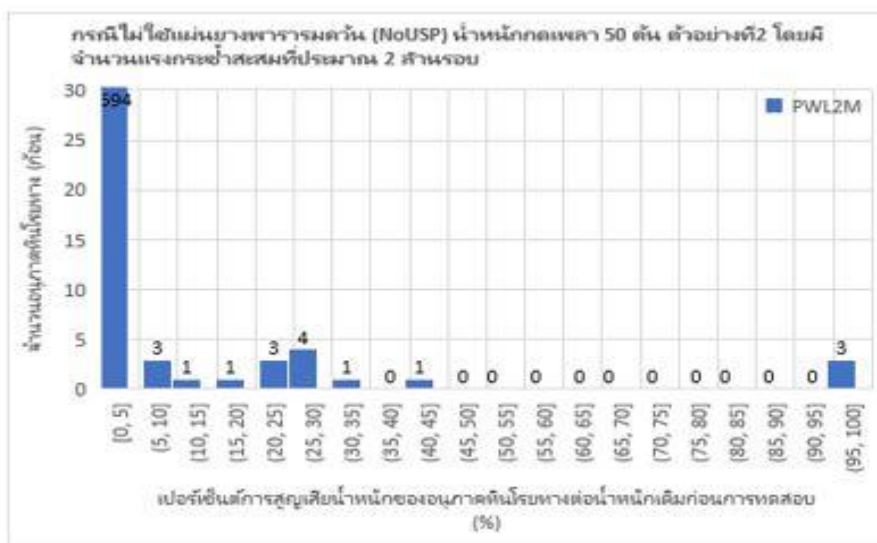




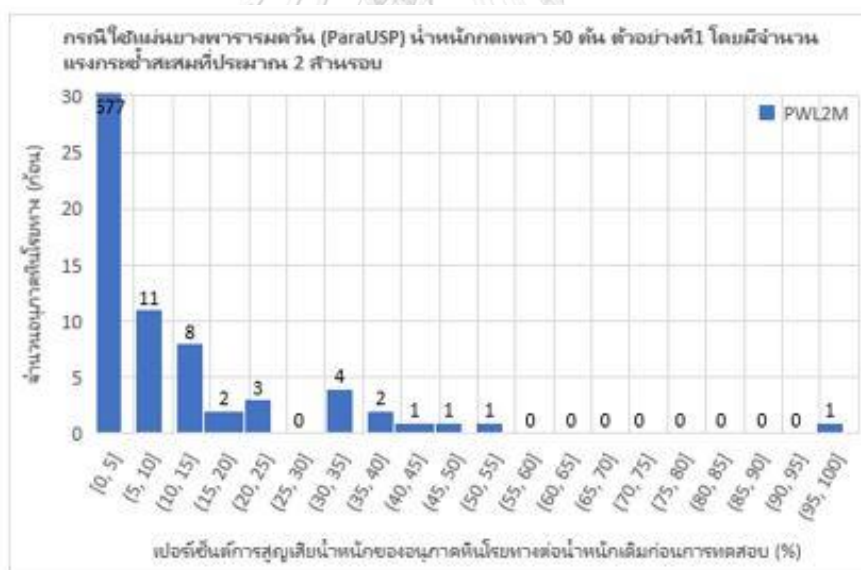
4.2.1.3 กรณีไม่ใช่แผนยางพารารมควัน (NoUSP) ที่น้ำหนักกตเพลลา 50 ตัน จำนวนรอบแรง  
กระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 1 และ ตัวอย่างที่ 2

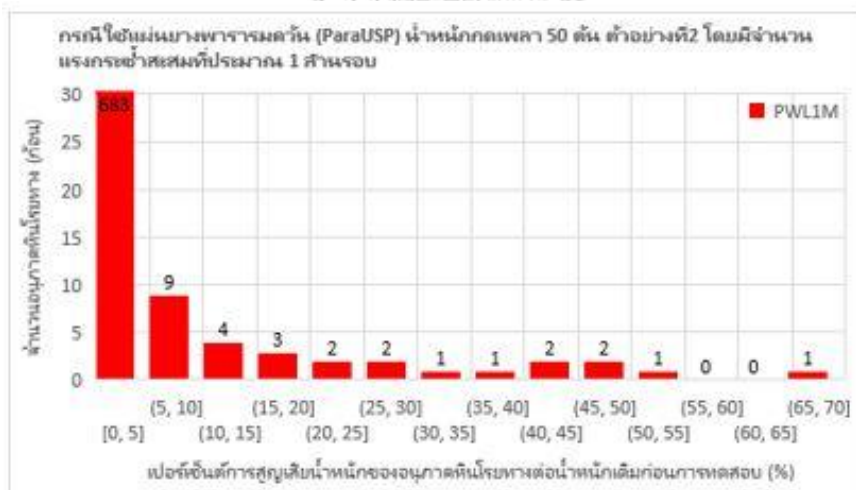
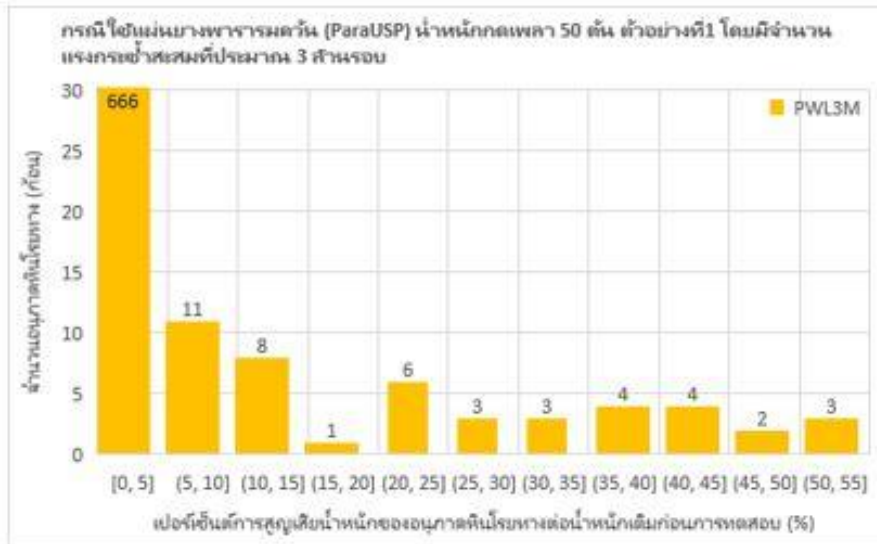




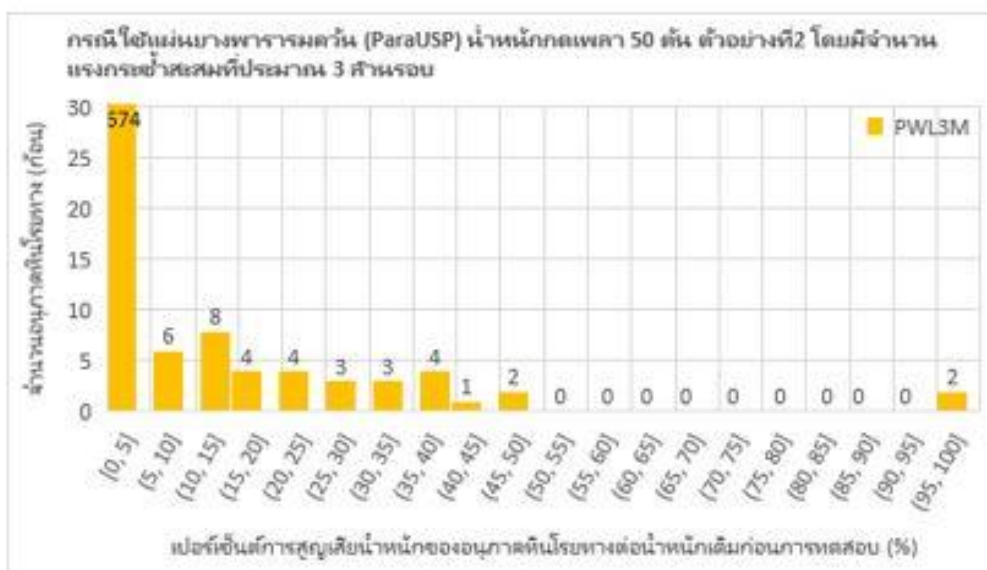
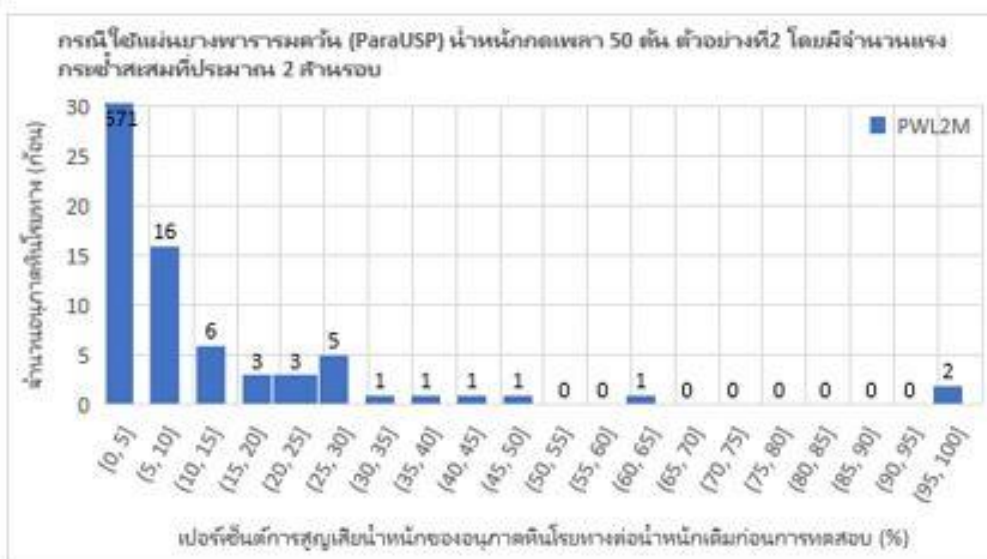


4.2.1.4 กรณีใช้แผ่นยางพารารวมคว้น (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 1 และ ตัวอย่างที่ 2

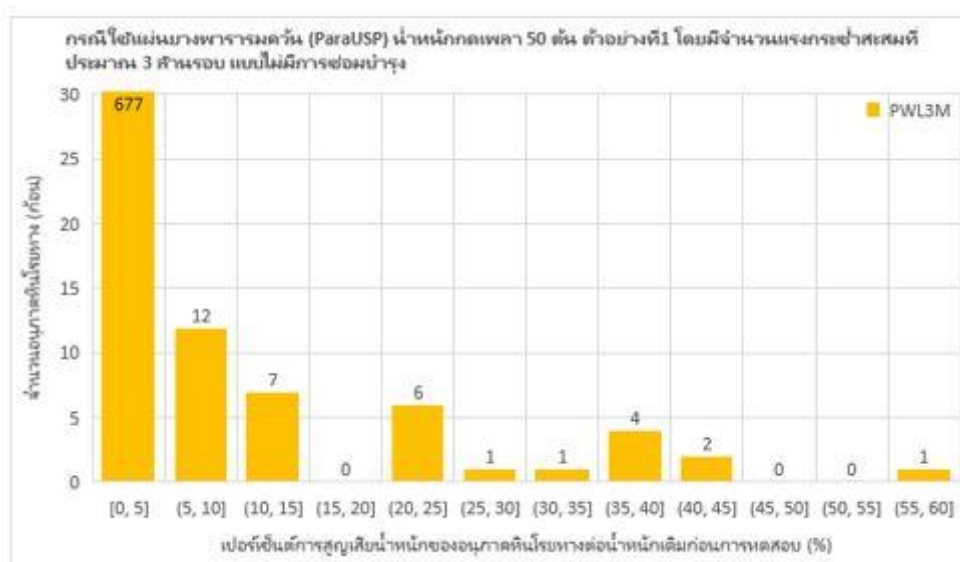








4.2.1.5 กรณีใช้แผ่นยางพาราธรรมดวัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบโดยไม่มีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 1



#### 4.2.2 วิเคราะห์ความแตกต่างของการแตกหักระหว่างตัวอย่าง

จากตารางที่ 10 จำนวนอนุภาคของหินโรยทางที่พบการสึกหรอในแต่ละกล่องทดสอบหินโรยทางซึ่งจำนวนของอนุภาคในการแตกหยาบใหญ่ค่อนข้างต่ำดังนั้นการวิเคราะห์ทางสถิติได้ดำเนินการเฉพาะในส่วนของการแตกละเอียดและแบบหยาบซึ่งเกิดขึ้นในอนุภาคจำนวนมาก ตามที่ระบุไว้ในส่วนก่อนหน้าว่าการแตกทั้งสองชนิดจะถูกกำหนดเป็นชิ้นส่วนที่หักที่มีขนาดตะแกรง 9.5 มม. (3/8 นิ้ว) เป็นตัวกำหนด ในส่วนนี้อนุภาคที่มีปัญหาการแตกหักละเอียดคืออนุภาคที่มีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าน้ำหนักสูงสุดของชิ้นส่วนที่หักที่ผ่านตะแกรงขนาด 9.5 มม. การสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคของกล่องแต่ละกล่องมีดังนี้

- สำหรับกรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 20 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 1 ล้านรอบ พบน้ำหนักสูงสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ (ที่ติดค้างบนตะแกรง 9.5 มม.) คือ 35.48 กรัม (M2-71) และน้ำหนักต่ำสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ คือ 0.96 กรัม ดังนั้นอนุภาคที่มีการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่า 0.96 กรัม อนุภาคทั้งหมดจะถูกพิจารณาว่าเป็นการสูญเสียน้ำหนักแบบละเอียดในกรณีนี้ ในส่วนของการทดสอบ จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 2 ล้านรอบ พบน้ำหนักสูงสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ (ที่ติดค้างบนตะแกรง 9.5 มม.) คือ 6.92 กรัม (L1-99) และน้ำหนักต่ำสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ คือ 0.94 กรัม ดังนั้นอนุภาคที่มีการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่า 0.94 กรัม อนุภาคทั้งหมดจะถูกพิจารณาว่าเป็นการสูญเสียน้ำหนักแบบละเอียดในกรณีนี้ ในส่วนของการทดสอบ จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบ พบน้ำหนักสูงสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ (ที่ติดค้างบนตะแกรง 9.5 มม.) คือ 6.49 กรัม (M2-19) และน้ำหนักต่ำสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ คือ 2.13 กรัม ดังนั้นอนุภาคที่มีการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่า 2.13 กรัม อนุภาคทั้งหมดจะถูกพิจารณาว่าเป็นการสูญเสียน้ำหนักแบบละเอียดในกรณีนี้

- สำหรับกรณีใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 20 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 1 ล้านรอบ พบน้ำหนักสูงสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ (ที่ติดค้างบนตะแกรง 9.5 มม.) คือ 9.78 กรัม (M2-96) และน้ำหนักต่ำสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ คือ 1.25 กรัม ดังนั้นอนุภาคที่มีการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่า 1.25 กรัม อนุภาคทั้งหมดจะถูกพิจารณาว่าเป็นการสูญเสียน้ำหนักแบบละเอียดในกรณีนี้ ในส่วนของการทดสอบ จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 2

ล้านรอบ พบน้ำหนักสูงสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ (ที่ติดค้ำบนตะแกรง 9.5 มม.) คือ 6.72 กรัม (M1-85) และน้ำหนักต่ำสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ คือ 2.05 กรัม ดังนั้นอนุภาคที่มีการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่า 2.05 กรัม อนุภาคทั้งหมดจะถูกพิจารณาว่าเป็นการสูญเสียน้ำหนักแบบละเอียดในกรณีนี้ ในส่วนของการทดสอบ จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบ พบน้ำหนักสูงสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ (ที่ติดค้ำบนตะแกรง 9.5 มม.) คือ 3.36 กรัม (M1-96) และน้ำหนักต่ำสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ คือ 1.14 กรัม ดังนั้นอนุภาคที่มีการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่า 1.14 กรัม อนุภาคทั้งหมดจะถูกพิจารณาว่าเป็นการสูญเสียน้ำหนักแบบละเอียดในกรณีนี้

• สำหรับกรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน ของตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 1 ล้านรอบ พบน้ำหนักสูงสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ (ที่ติดค้ำบนตะแกรง 9.5 มม.) คือ 52.1 กรัม (M1-41) ของตัวอย่างที่ 1 และ 63.11 กรัม (M2-101) ของตัวอย่างที่ 2 ตามลำดับ ในส่วนของน้ำหนักต่ำสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ คือ 0.75 กรัม ของตัวอย่างที่ 1 และ 0.57 กรัม ของตัวอย่างที่ 2 ตามลำดับ ดังนั้นอนุภาคที่มีการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่า 0.75 กรัม และ 0.57 กรัม อนุภาคทั้งหมดจะถูกพิจารณาว่าเป็นการสูญเสียน้ำหนักแบบละเอียดในกรณีนี้ ในส่วนของการทดสอบ จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 2 ล้านรอบ พบน้ำหนักสูงสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ (ที่ติดค้ำบนตะแกรง 9.5 มม.) คือ 47.68 กรัม (L2-19) ของตัวอย่างที่ 1 และ 25.47 กรัม (R2-63) ของตัวอย่างที่ 2 ตามลำดับ ในส่วนของน้ำหนักต่ำสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ คือ 0.56 กรัม ของตัวอย่างที่ 1 และ 0.77 กรัม ของตัวอย่างที่ 2 ตามลำดับ ดังนั้นอนุภาคที่มีการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่า 0.56 กรัม และ 0.77 กรัม อนุภาคทั้งหมดจะถูกพิจารณาว่าเป็นการสูญเสียน้ำหนักแบบละเอียดในกรณีนี้ ในส่วนของการทดสอบ จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบ พบน้ำหนักสูงสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ (ที่ติดค้ำบนตะแกรง 9.5 มม.) คือ 59.18 กรัม (M1-39) ของตัวอย่างที่ 1 และ 36.48 กรัม (M1-97) ของตัวอย่างที่ 2 ตามลำดับ ในส่วนของน้ำหนักต่ำสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ คือ 0.77 กรัม และ 0.66 กรัม ดังนั้นอนุภาคที่มีการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่า 0.77 กรัม และ 0.66 กรัม อนุภาคทั้งหมดจะถูกพิจารณาว่าเป็นการสูญเสียน้ำหนักแบบละเอียดในกรณีนี้

•สำหรับกรณีใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน ของตัวอย่างที่1 และ ตัวอย่างที่2จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 1 ล้านรอบ พบน้ำหนักสูงสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ (ที่ติดค้างบนตะแกรง 9.5 มม.) คือ 37.1 กรัม (M1-1) ของตัวอย่างที่1 และ 22.03 กรัม (M2-80) ของตัวอย่างที่2 ตามลำดับ ในส่วนของน้ำหนักต่ำสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ คือ 0.56 กรัม ของตัวอย่างที่1 และ 0.57 กรัม ของตัวอย่างที่2 ตามลำดับ ดังนั้นอนุภาคที่มีการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่า 0.56 กรัม และ 0.57 กรัม อนุภาคทั้งหมดจะถูกพิจารณาว่าเป็นการสูญเสีย น้ำหนักแบบละเอียดในกรณีนี้ ในส่วนของการทดสอบ จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 2 ล้านรอบ พบน้ำหนักสูงสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ (ที่ติดค้างบนตะแกรง 9.5 มม.) คือ 32.41 กรัม M2-77) ของตัวอย่างที่1 และ 21.37 กรัม (M1-110) ของตัวอย่างที่2 ตามลำดับ ในส่วนของ น้ำหนักต่ำสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ คือ 0.56 กรัม ของตัวอย่างที่1 และ 0.62 กรัม ของตัวอย่างที่2 ตามลำดับ ดังนั้นอนุภาคที่มีการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่า 0.56 กรัม และ 0.62 กรัม อนุภาคทั้งหมดจะถูกพิจารณาว่าเป็นการสูญเสีย น้ำหนักแบบละเอียดในกรณีนี้ ในส่วนของการ ทดสอบ จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบ พบน้ำหนักสูงสุดของอนุภาคที่มีการแตกหัก แบบหยาบ (ที่ติดค้างบนตะแกรง 9.5 มม.) คือ 23.39 กรัม (M2-90) ของตัวอย่างที่1 และ 54.54 กรัม (M2-97) ของตัวอย่างที่2 ตามลำดับ ในส่วนของน้ำหนักต่ำสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบ หยาบ คือ 0.89 กรัม และ 0.65 กรัม ดังนั้นอนุภาคที่มีการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่า 0.89 กรัม และ 0.65 กรัม อนุภาคทั้งหมดจะถูกพิจารณาว่าเป็นการสูญเสีย น้ำหนักแบบละเอียดในกรณีนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

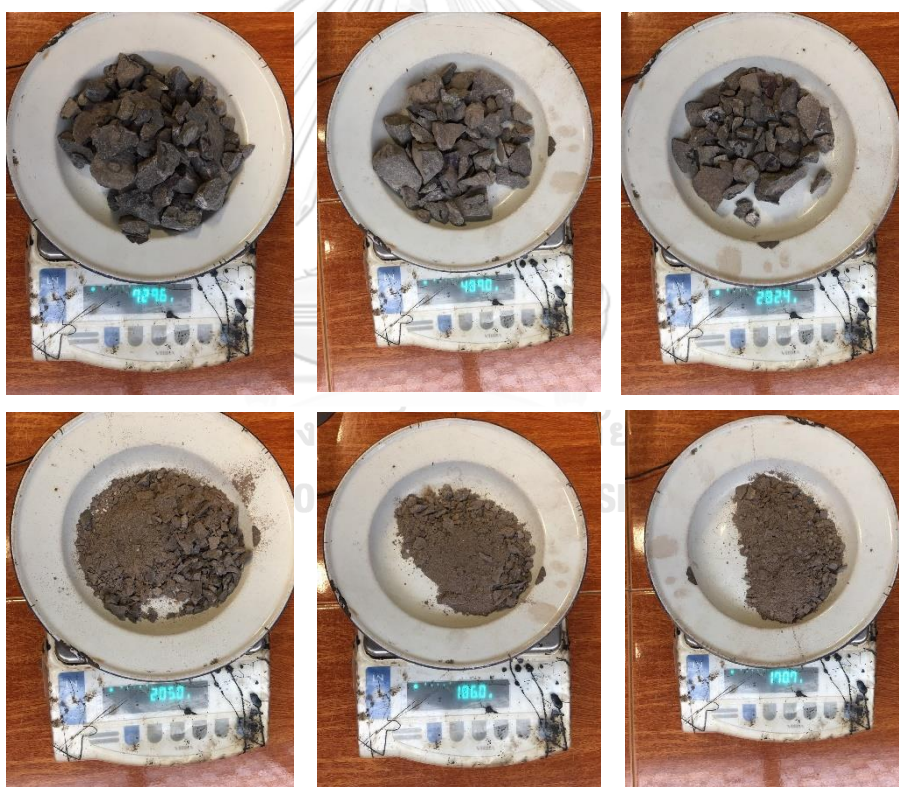
•สำหรับกรณีใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน โดยไม่มีการจัดเรียงกัน ของอนุภาคหินโรยทางตลอดช่วงของการทดสอบ (Non-Maintenance) จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ สะสมที่ 3 ล้านรอบ พบน้ำหนักสูงสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ (ที่ติดค้างบนตะแกรง 9.5 มม.) คือ 11.59 กรัม (M1-22) ในส่วนของน้ำหนักต่ำสุดของอนุภาคที่มีการแตกหักแบบหยาบ คือ 0.63 กรัม ดังนั้นอนุภาคที่มีการสูญเสีย น้ำหนักต่ำกว่า 0.63 กรัม อนุภาคทั้งหมดจะถูกพิจารณาว่า เป็นการสูญเสีย น้ำหนักแบบละเอียดในกรณีนี้

ตารางที่ 12 น้ำหนักที่สูญเสียของอนุภาคหินโรยทางภายในกล่องหลังจากการทดสอบ

ตัวอย่าง	แรงกระทำ (ตัน)	จำนวนรอบที่รับ แรงกระทำซ้ำ (รอบ)	อนุภาคหินโรยทางที่สูญเสียน้ำหนักหลังจากการทดสอบ
			ปริมาณการแตกหักของอนุภาคหินโรยทาง (กรัม)
NoUSP	20 ตัน	1,010,000	215.50 กรัม
		2,020,000	306.18 กรัม
		3,030,000	241.17 กรัม
ParaUSP	20 ตัน	1,010,000	164.68 กรัม
		2,020,000	140.12 กรัม
		3,030,000	203.58 กรัม
NoUSP	50 ตัน	1,010,000	957.15 กรัม
		2,020,000	883.84 กรัม
		3,030,000	569.27 กรัม
NoUSP	50 ตัน	1,010,000	1570.63 กรัม
		2,020,000	658.84 กรัม
		3,030,000	697.8 กรัม
ParaUSP	50 ตัน	1,010,000	1400.11 กรัม
		2,020,000	814.84 กรัม
		3,030,000	1139.93 กรัม
ParaUSP	50 ตัน	1,010,000	928.5 กรัม
		2,020,000	1000.06 กรัม
		3,030,000	977.02 กรัม
ParaUSP	50 ตัน	3,010,000	883.4 กรัม

ตารางที่ 13 อนุภาคหินโรยทางที่สึกหรอหลังจากการทดสอบของกรณีไม่ใช่แผ่นยางพารา (NoUSP) น้ำหนักกตเพลลา 50 ตัน ตัวอย่างที่ 1

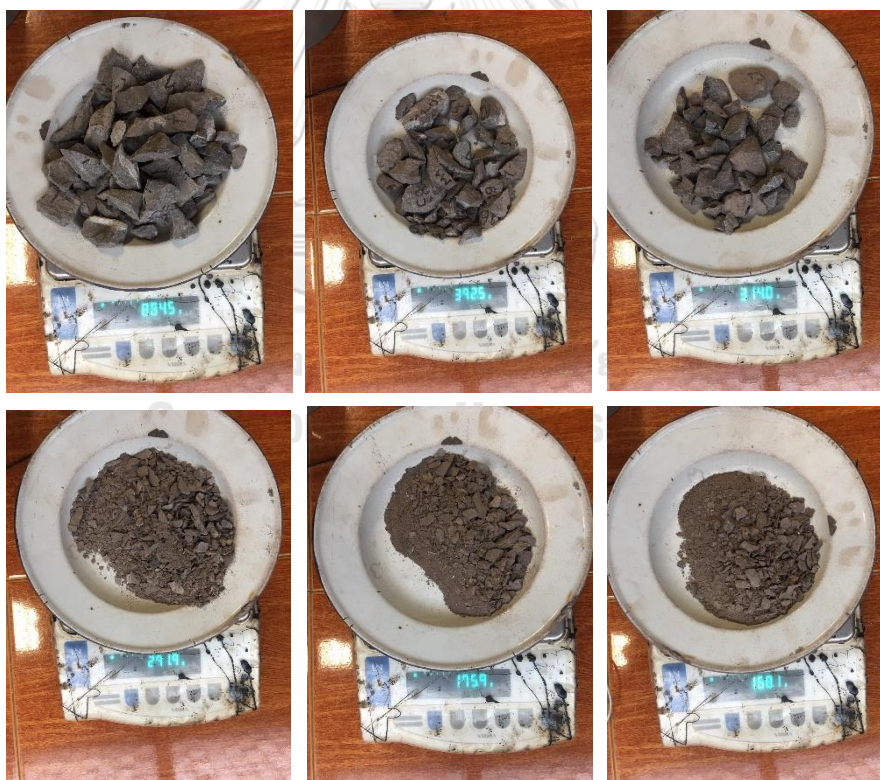
ตัวอย่าง	น้ำหนักของ อนุภาคหิน โรยที่แตก แบบหยาบ	น้ำหนักของ อนุภาคหิน โรยที่แตก แบบละเอียด
NoUSP 50 ตัน 1 ล้านรอบ	729.6 กรัม	205 กรัม
NoUSP 50 ตัน 2 ล้านรอบ	489.0 กรัม	186 กรัม
NoUSP 50 ตัน 3 ล้านรอบ	282.4 กรัม	170.7 กรัม



รูปที่ 54 อนุภาคหินโรยทางที่แตกหักในลักษณะแบบหยาบและแบบละเอียดของกรณีไม่ใช่แผ่นยางพารา (NoUSP) น้ำหนักกตเพลลา 50 ตัน ตัวอย่างที่ 1

ตารางที่ 14 อนุภาคหินโรยทางที่สึกหรอหลังจากการทดสอบของกรณีไม่ใช่แผ่นยางพารา (NoUSP) น้ำหนักกตเพลลา 50 ตัน ตัวอย่างที่ 2

ตัวอย่าง	น้ำหนักของอนุภาคหินโรยที่แตกแบบหยาบ	น้ำหนักของอนุภาคหินโรยที่แตกแบบละเอียด
NoUSP 50 ตัน 1 ล้านรอบ	884.50 กรัม	291.9 กรัม
NoUSP 50 ตัน 2 ล้านรอบ	392.50 กรัม	175.9 กรัม
NoUSP 50 ตัน 3 ล้านรอบ	314.00 กรัม	168.1 กรัม

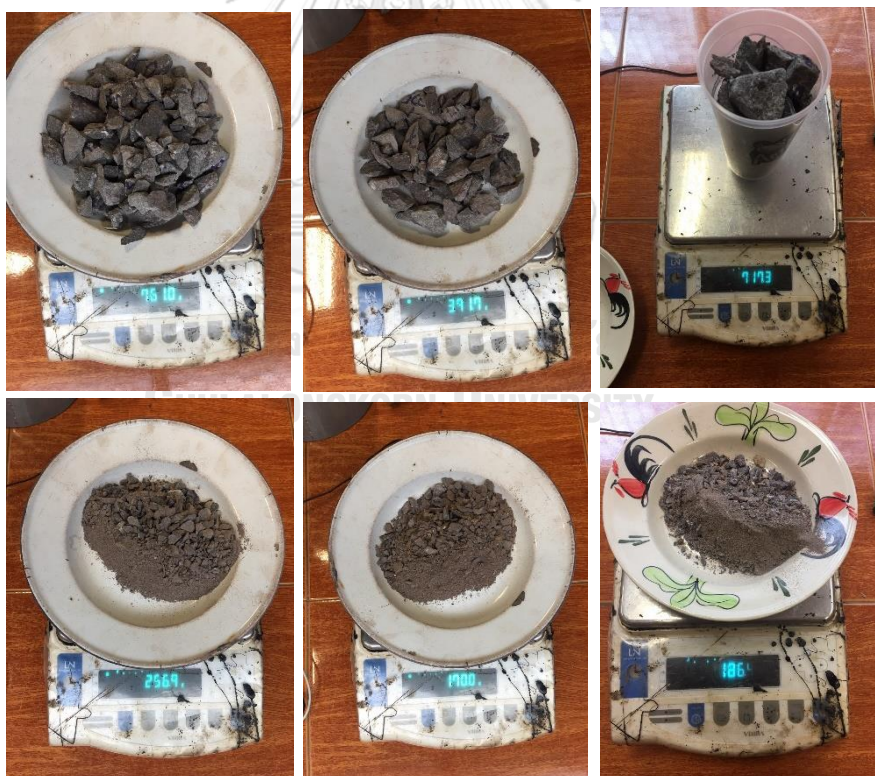


รูปที่ 55 อนุภาคหินโรยทางที่แตกหักในลักษณะแบบหยาบและแบบละเอียดของกรณีไม่ใช่แผ่นยางพารา (NoUSP) น้ำหนักกตเพลลา 50 ตัน ตัวอย่างที่ 2



ตารางที่ 15 อนุภาคหินโรยทางที่สึกหรอหลังจากการทดสอบของกรณีใช้แผ่นยางพารา (ParaUSP) น้ำหนักกตเพลลา 50 ตัน ตัวอย่างที่ 1

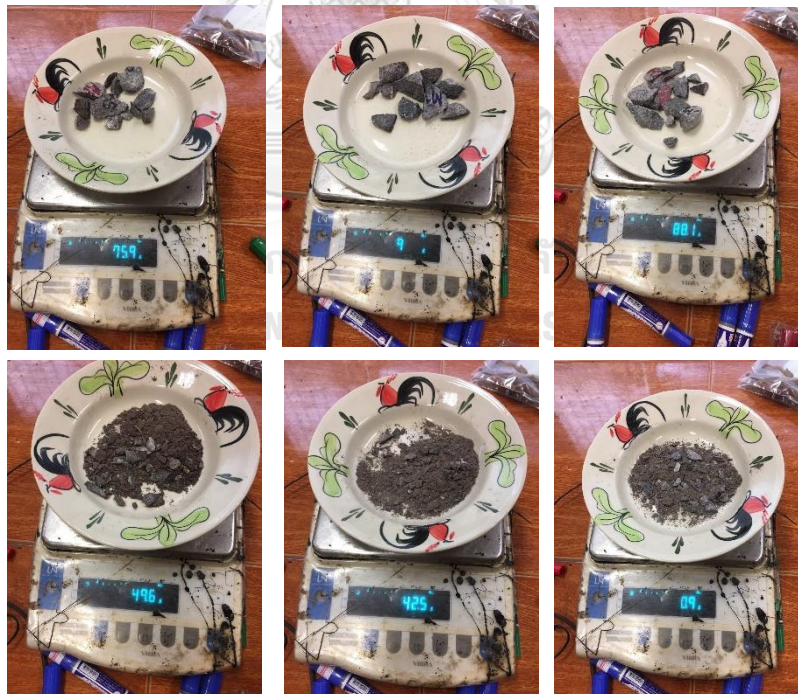
ตัวอย่าง	น้ำหนักของอนุภาคหินโรยที่แตกแบบหยาบ	น้ำหนักของอนุภาคหินโรยที่แตกแบบละเอียด
ParaUSP 50 ตัน 1 ล้อมรอบ	761.00 กรัม	256.9 กรัม
ParaUSP 50 ตัน 2 ล้อมรอบ	391.70 กรัม	170 กรัม
ParaUSP 50 ตัน 3 ล้อมรอบ	717.30 กรัม	186.4 กรัม



รูปที่ 56 อนุภาคหินโรยทางที่แตกหักในลักษณะแบบหยาบและแบบละเอียดของกรณีใช้แผ่นยางพารา (ParaUSP) น้ำหนักกตเพลลา 50 ตัน ตัวอย่างที่ 1

ตารางที่ 16 อนุภาคหินโรยทางที่สึกหรอหลังจากการทดสอบของกรณีใช้แผ่นยางพารา (ParaUSP) น้ำหนักกวดเพลลา 20 ตัน ตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่าง	น้ำหนักของอนุภาคหินโรยที่แตกแบบหยาบ	น้ำหนักของอนุภาคหินโรยที่แตกแบบละเอียด
ParaUSP 20 ตัน 1 ล้านรอบ	75.90 กรัม	49.6 กรัม
ParaUSP 20 ตัน 2 ล้านรอบ	97.40 กรัม	42.5 กรัม
ParaUSP 20 ตัน 3 ล้านรอบ	88.10 กรัม	50.9 กรัม



รูปที่ 57 อนุภาคหินโรยทางที่แตกหักในลักษณะแบบหยาบและแบบละเอียดของกรณีใช้แผ่นยางพารา (ParaUSP) น้ำหนักกวดเพลลา 20 ตัน ตัวอย่างที่ 1

ตารางที่ 17 อนุภาคหินโรยทางที่สึกหรอหลังจากการทดสอบของกรณีใช้แผ่นยางพารา (ParaUSP) น้ำหนักกตเพลลา 50 ตัน โดยไม่มีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่าง	น้ำหนักของอนุภาคหินโรยที่แตกแบบหยาบ	น้ำหนักของอนุภาคหินโรยที่แตกแบบละเอียด
ParaUSP 50 ตัน 3 ล้อรอบ โดยไม่มีการจัดเรียงหินใหม่	672.60 กรัม	228.20 กรัม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 58 อนุภาคหินโรยทางที่แตกหักในลักษณะแบบหยาบและแบบละเอียดของกรณีใช้แผ่นยางพารา (ParaUSP) น้ำหนักกตเพลลา 50 ตัน ตัวอย่างที่ 1 โดยไม่มีการจัดเรียงอนุภาคหินโรยทาง

ตารางที่ 18 อนุภาคหินโรยทางที่สึกหรอหลังจากการทดสอบของกรณีใช้แผ่นยางพารา (ParaUSP) น้ำหนักกตเพลลา 50 ตัน ตัวอย่างที่ 2

ตัวอย่าง	น้ำหนักของอนุภาคหินโรยที่แตกแบบหยาบ	น้ำหนักของอนุภาคหินโรยที่แตกแบบละเอียด
ParaUSP 50 ตัน 1 ล้านรอบ	582.00 กรัม	178.10 กรัม
ParaUSP 50 ตัน 2 ล้านรอบ	915.20 กรัม	251.50 กรัม
ParaUSP 50 ตัน 3 ล้านรอบ	781.90 กรัม	201.20 กรัม



รูปที่ 59 อนุภาคหินโรยทางที่แตกหักในลักษณะแบบหยาบและแบบละเอียดของกรณีใช้แผ่นยางพารา (ParaUSP) น้ำหนักกตเพลลา 50 ตัน ตัวอย่างที่ 2

#### 4.2.2.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ

##### ตารางที่ 19 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ

จากการวิเคราะห์ผลถดถอยเชิงพหุการใช้แผ่นยางพารารมควันรองใต้หมอนรถไฟ (ParaUSP) ที่มีต่อการสูญเสียน้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางโดยพิจารณาจากแบบจำลองได้ 2 รูปแบบ

กรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) เปรียบเทียบกับ กรณีใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSPs) โดยมีจำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบเท่ากันซึ่งช่วยลดอัตราการสึกหรบของอนุภาคหินโรยทางตามน้ำหนักผ่านทางสะสม

ตัวแปรตาม
ปริมาณการสูญเสียน้ำหนักสะสมของอนุภาคหินโรยทางในแต่ละช่วงของการทดสอบ

ตัวแปรควบคุม	ค่าการเปลี่ยนแปลง	ระดับการเปลี่ยนแปลง
แผ่นยางพารารมควัน	ความหนาที่ 15 มม.	ไม่เปลี่ยนแปลง
กล่องทดสอบที่ใช้บรรจุอนุภาคหินโรยทางและหมอนรถไฟ	ขนาด	ไม่เปลี่ยนแปลง
ขนาดคละของวัสดุ	ตามมาตรฐานของ SRT	ไม่เปลี่ยนแปลง
สัดส่วนวัสดุหินโรยทาง	ตำแหน่งโซนของหินโรยทางภายในกล่อง	ไม่เปลี่ยนแปลง
รูปแบบและความถี่หน่วยแรงกระทำ	แบบ Continuous Haversine และความถี่ 5 รอบ/วินาที	ไม่เปลี่ยนแปลง
จำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำ	1,000,000/2,000,000/3,000,000 (ครั้ง)	ไม่เปลี่ยนแปลง
ขนาดหน่วยแรงกระทำซ้ำ	20/50 (ตัน)	ไม่เปลี่ยนแปลง



จากผลการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression) สำหรับกรณีไม่ใช้แผ่นยางพารา  
รมควัน (NoUSP) เปรียบเทียบกับ กรณีใช้แผ่นยางพาราหมควัน (ParaUSPs) จำนวนรอบแรงกระทำ  
ซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง (ที่แสดงดังตาราง จากค่า p-value ของแต่ละตัวแปรนั้นมีค่า  
น้อยกว่า ทำให้มีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ได้แก่ มีและไม่มีแผ่นยางพาราหมควัน  
น้ำหนักกดเพลลาที่สะสม และจำนวนรอบของการบดอัดหิน ส่วนค่า p-value ของโมเดลมีค่า เท่ากับ  
< 2.2e-16 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ดังนั้น โมเดลนี้จึงมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับค่า Multiple R-  
squared ที่มีค่าเท่ากับ 0.1056 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้โมเดลที่มาจากผลการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ  
)Multiple Regression

### การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ

ตารางที่ 21 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
X <sub>1</sub>	1	4555	4554.9	388.79	< 2.2e-16 ***
X <sub>2</sub>	1	12570	12569.7	1072.90	< 2.2e-16 ***
X <sub>3</sub>	1	390	390.1	33.30	8.084e-09 ***
Residuals	12656	148273	11.7		
Signif. codes	0 '***'	0.001 '**'	0.01 '*'	0.05 '.'	0.1 ' '

### การแปลผล

จากตารางที่การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุเป็นส่วนที่  
แสดงค่าสถิติในการทดสอบว่าตัวแปรอิสระในแต่ละสมการสามารถร่วมกันทำนาย (พยากรณ์) ตัวแปร  
ตามได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ โดยใช้สถิติ F-test ซึ่งจะพิจารณาจากผลการทดสอบโดยดู  
จากค่า Sig. โดยมีสมมติฐานการทดสอบดังนี้

สมมติฐานว่าง H<sub>0</sub> : ตัวแปรอิสระทุกตัวในสมการไม่สามารถร่วมกันทำนาย (พยากรณ์) ตัวแปรตามได้  
สมมติฐานทางเลือก H<sub>1</sub> : ตัวแปรอิสระทุกตัวในสมการสามารถร่วมกันทำนาย (พยากรณ์) ตัวแปรตาม  
ได้

การสรุปและตัดสินใจเปรียบเทียบค่า Sig. ในผลการวิเคราะห์กับค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ  
( $\alpha = 0.05$ ) ถ้าผลการวิเคราะห์พบว่าค่า Sig. มีค่าน้อยกว่าค่า  $\alpha$  จะปฏิเสธ H<sub>0</sub> ยอมรับ H<sub>1</sub> แสดงว่า

ตัวแปรอิสระทุกตัวในสมการสามารถร่วมกันทำนาย (พยากรณ์) ตัวแปรตามได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ค่าสถิติทดสอบ F เท่ากับ 388.79, 1072.90 และ 33.30 และค่า p-value = < 2.2e-16 , < 2.2e-16 และ 8.084e-09 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงปฏิเสธสมมติฐานว่าง

จากตารางเมื่อมีการใช้แผ่นยางพารารมควันรองใต้หมอนรถไฟจะทำให้สามารถลดการแตกหักของอนุภาคหินโรยทาง 0.251 % ต่อทุกก้อนอนุภาคของหินโรยทางและในส่วนของน้ำหนักดเพลลาที่สะสม ที่เพิ่มขึ้นทีละ 1 ล้านตันจากการทดสอบ จะส่งผลทำให้ปริมาณการแตกหักของอนุภาคหินโรยทางในแต่ละก้อน เพิ่มขึ้น 0.018 % และการจัดเรียงหินใหม่สามารถลดการสึกหรอ 0.311% ต่ออนุภาคหินโรยทางทุกก้อน โดยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยสามารถเขียนสมการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ของการสึกหรอของอนุภาคหินโรยทาง ได้ดังสมการ

$$\hat{Y} = - [0.2508023 \times (X_1)] + [0.0179101 \times (X_2)] - [0.3112096 \times (X_3)]$$

กรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) เปรียบเทียบกับ กรณีใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSPs) โดยมีจำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบเท่ากันซึ่งช่วยลดปริมาณการสึกหรอแบบoffset เมื่อเทียบกับการไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP)

ตัวแปรต้น	ค่าการเปลี่ยนแปลง	ระดับการเปลี่ยนแปลง
การใช้แผ่นยางพารารมควัน ( $X_1$ ) × น้ำหนักดเพลลาที่สะสม ( $X_2$ )	[ ไม่มี (0) และ มี (1) ] × [ 20/40/60 และ 50/100/150 (ล้านตัน) ]	7
น้ำหนักดเพลลาที่สะสม ( $X_2$ )	20/40/60 และ 50/100/150 และ 150 (ล้านตัน)	6
จำนวนรอบของการบดอัดหินใหม่ (การจัดเรียงอนุภาคหินโรยทาง) ( $X_3$ )	0/1/2 (ครั้ง)	3



จะสามารถวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) ได้ดังแสดงตาราง

ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุระหว่าง กรณีใช้และไม่ใช้แผ่นยางพารา

ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients)	ค่าประมาณ การ (Estimate)	ค่าผิดพลาด (Std. Error)	t value	Pr(> t )
การใช้แผ่นยางพารา รมควัน x น้ำหนักกด เพลลาที่สะสม (X <sub>1</sub> )	-0.0020238	0.0006724	-3.010	0.00262 **
น้ำหนักกดเพลลาที่สะสม (X <sub>2</sub> )	0.0176409	0.0008359	21.104	< 2e-16 ***
จำนวนรอบของการบด อัดหินใหม่ (การ จัดเรียงอนุภาคหินโรย ทาง) (X <sub>3</sub> )	-0.3048786	0.0539304	-5.653	1.61e-08 ***
Signif. codes	0 '***', 0.001 '**', 0.01 '*', 0.05 '.', 0.1 ' ' ' '			
Residual standard error	3.424 on 12656 degrees of freedom			
Multiple R-squared	0.1048			
Adjusted R-squared	0.1046			
F-statistic	494 on 3 and 12656 DF			
p-value	< 2.2e-16			

จากผลการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression) สำหรับกรณีไม่ใช้แผ่นยางพารา รมควัน (NoUSP) เปรียบเทียบกับ กรณีใช้แผ่นยางพารา รมควัน (ParaUSPs) จำนวนรอบแรงกระทำ ซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง (ที่แสดงดังตารางจากค่า p-value ของแต่ละตัวแปรนั้นมีค่า น้อยกว่า 0.05 ทำให้มีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ได้แก่ (การใช้และไม่ใช้แผ่นยางพารา รมควัน x น้ำหนักกดเพลลาที่สะสม) และ จำนวนรอบของการบดอัดหินใหม่ ส่วนค่า p-value ของ

โมเดลมีค่าเท่ากับ  $<2.2e-16$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ดังนั้น โมเดลนี้จึงมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับค่า Multiple R-squared ที่มีค่าเท่ากับ 0.1048 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้โมเดลที่มาจากการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ ) Multiple Regression

ตารางที่ 23 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
X <sub>1</sub>	1	106	106.2	9.0591	0.002619 **
X <sub>2</sub>	1	16900	16899.8	1441.1676	$< 2.2e-16$ ***
X <sub>3</sub>	1	371	371.3	31.6636	1.872e-08 ***
Residuals	12656	148410	11.7		
Signif. codes	0 '***'	0.001 '**'	0.01 '*'	0.05 '.'	0.1 ' '

จากตารางที่ 23 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุเป็นส่วนที่แสดงค่าสถิติในการทดสอบว่าตัวแปรอิสระในแต่ละสมการสามารถร่วมกันทำนาย (พยากรณ์) ตัวแปรตามได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ โดยใช้สถิติ F-test ซึ่งจะพิจารณาจากผลการทดสอบโดยดูจากค่า Sig. โดยมีสมมติฐานการทดสอบดังนี้

สมมติฐานว่าง H<sub>0</sub> : ตัวแปรอิสระทุกตัวในสมการไม่สามารถร่วมกันทำนาย (พยากรณ์) ตัวแปรตามได้  
สมมติฐานทางเลือก H<sub>1</sub> : ตัวแปรอิสระทุกตัวในสมการสามารถร่วมกันทำนาย (พยากรณ์) ตัวแปรตามได้

การสรุปและตัดสินใจเปรียบเทียบค่า Sig. ในผลการวิเคราะห์กับค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ ( $\alpha = 0.05$ ) ถ้าผลการวิเคราะห์พบว่าค่า Sig. มีค่าน้อยกว่าค่า  $\alpha$  จะปฏิเสธ H<sub>0</sub> ยอมรับ H<sub>1</sub> แสดงว่าตัวแปรอิสระทุกตัวในสมการสามารถร่วมกันทำนาย (พยากรณ์) ตัวแปรตามได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ค่าสถิติทดสอบ F เท่ากับ 9.0591, 1441.1676 และ 31.6636 ค่า p-value = 0.002619,  $<2.2e-16$  และ 1.872e-08 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  ดังนั้นจึงปฏิเสธสมมติฐานว่าง

ดังนั้น จากตารางสรุปได้ว่าเมื่อมีการใช้แผ่นยางพารารวมควั่นรองใต้หมอนรถไฟ (ParaUSP) ช่วยลดการสึกของอนุภาคหินโรยทางแบบoffset เมื่อเทียบกับการไม่ใช้แผ่นยางพารารวมควั่น (NoUSP) 0.002% ในทุกอนุภาคหินโรยทางและในส่วนของน้ำหนักดเพลลาที่สะสม ที่เพิ่มขึ้นทีละ 1

ถ้านั้น จะทำให้การแตกหักของอนุภาคหินโรยทาง เพิ่มขึ้น 0.018 % และการบดอัดอนุภาคหินโรยทางจะช่วยลดการสึกหรอต่ออนุภาคหินโรยทาง 0.305% ต่ออนุภาค โดยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยสามารถเขียนสมการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ของการสึกหรอของอนุภาคหินโรยทาง ได้ดังสมการ

$$\hat{Y} = - [0.0020238 \times (X_1)] + [0.0176409 \times (X_2)] - [0.3048786 \times (X_3)]$$

การตรวจสอบตัวอย่างที่มี ค่าผิดปกติ หรือ ค่าสุดโต่ง (Outlier cases) มีผลต่อการประมาณค่าสถิติ และการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยจึงทำการตรวจสอบ Outlier หลายตัวแปรด้วยวิธี Mahalanobis Distances ในโปรแกรมSPSS โดยมีเงื่อนไขว่าต้องมีตัวแปรตาม 1 ตัวแปร และ ตัวแปรอิสระมากกว่า 2 ตัวแปร ซึ่งทดสอบผ่าน Regression ระหว่างการทดสอบต้องกำหนดตัวแปร Mahalanobis ขึ้นมาก่อนที่จะ Compute Variable โดยการกำหนด Target Variable เป็นค่า P ในสูตรคำนวณด้วย (Numeric Expression) คือ

1-CDF.CHISQ(MAH\_1,3) ซึ่งองศาเสรีเท่ากับ3 เพราะจำนวนตัวแปรอิสระที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยสรุปการแปลผลจากการวิเคราะห์สถิติ ค่า P ที่น้อยกว่า .001 ถือว่าเป็น multivariate outlier ซึ่งต้องตัดทิ้งก่อนวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป

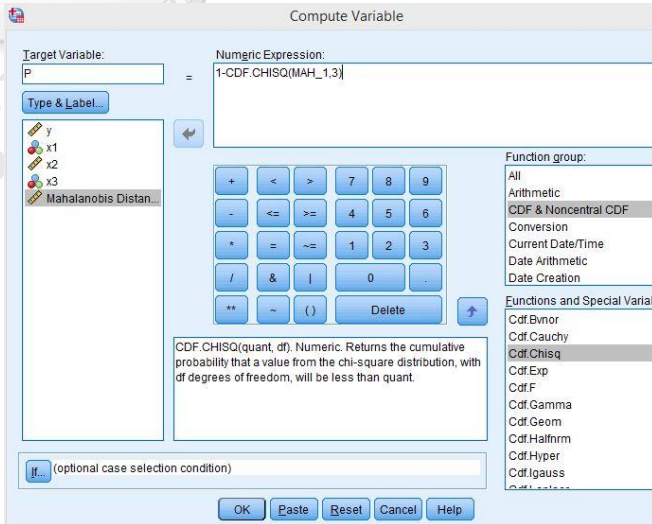
### Mahalanobis Distance

For selected cases with  $c_i > 0$ ,

$$MAHAL_i = \begin{cases} (C-1)h_i & \text{if intercept is included} \\ C h_i & \text{otherwise} \end{cases}$$

For unselected cases with  $c_i > 0$

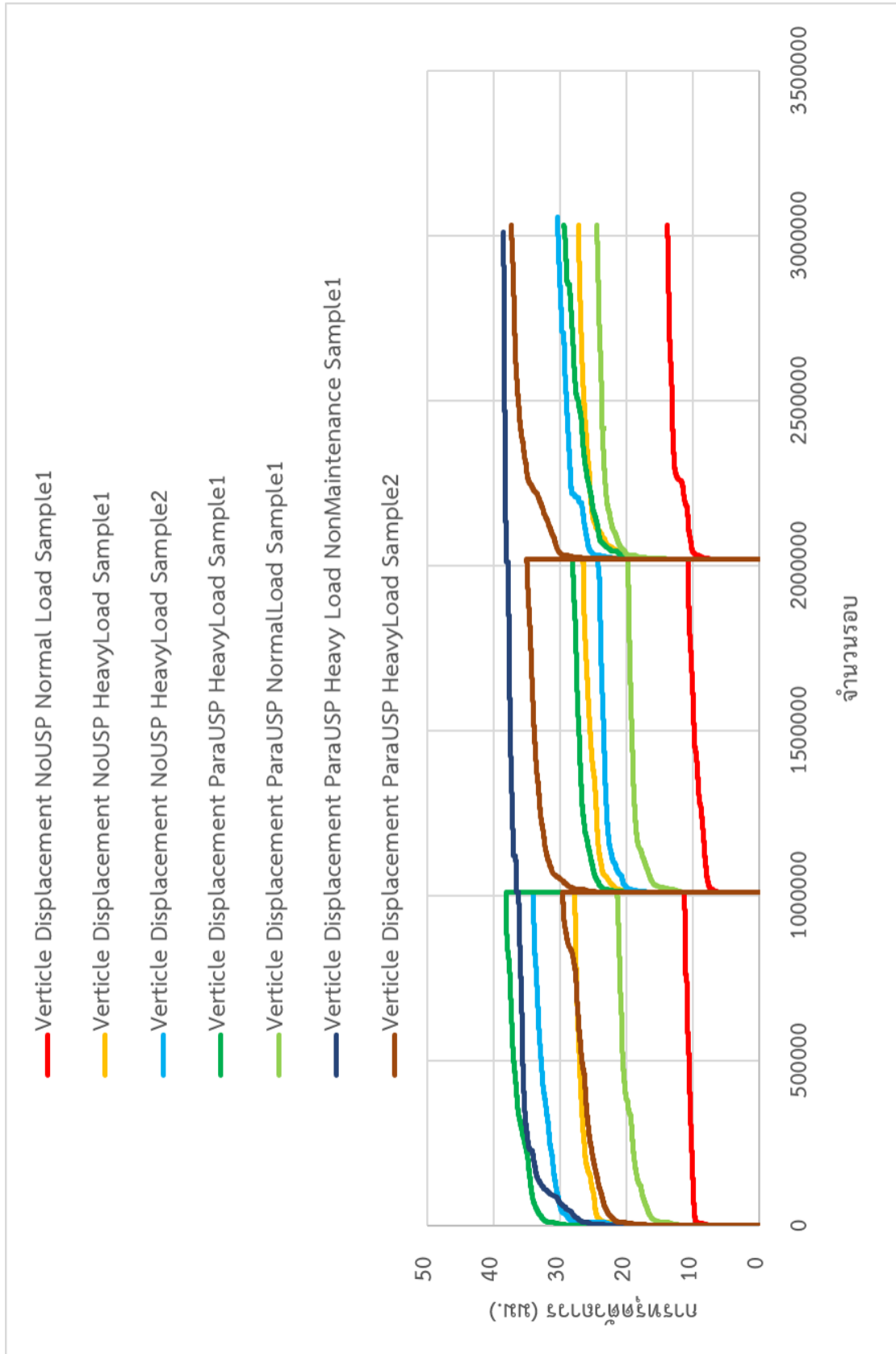
$$MAHAL_i = \begin{cases} C h'_i & \text{if intercept is included} \\ (C+1)h'_i & \text{otherwise} \end{cases}$$



y	x1	x2	x3	MAH_1	P
.07305	0	20	0	2.83401	.41793
.07234	0	20	0	2.83401	.41793
.06597	0	20	0	2.83401	.41793
.06556	0	20	0	2.83401	.41793
.06311	0	20	0	2.83401	.41793

### 4.3 การทรุดตัวถาวรของหินโรยทาง



## รูปที่ 60 การทรุดตัวของถาวรในแนวตั้งต่อจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำในแต่ละเงื่อนไขของกล่องทดสอบหินโรยทาง

การทรุดตัวของหมอนรถไฟเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดที่กำหนดประสิทธิภาพของโครงสร้างทางรถไฟ ภายในกล่องทดสอบหินโรยทาง ค่าการทรุดตัวของหมอนรถไฟเกิดขึ้นจากการที่หมอนรถไฟที่ใช้ในการทดสอบมีการเคลื่อนที่ถาวรในแนวตั้งแบบสะสม จากรูปที่ 60 แสดงถึงการบันทึกการทรุดตัวของหมอนรถไฟ ทั้ง 7 ตัวอย่าง

โดยในช่วง 10,000 รอบ จะมีการ Preload ทุกกรณี ทำให้เกิดการทรุดตัวซึ่งในช่วงของการ Preload นี้เป็นการทรุดตัวถาวรที่มีอัตราที่สูงและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องอันเนื่องมาจากการสไลด์และจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคหินโรยทางภายในกล่องทดสอบหรือการเสียรูปยืดหยุ่นที่มีอัตราที่สูงเช่นกัน ในกรณีของการทดสอบที่มีการติดตั้งของแผ่นยางพารามรมควันไว้ใต้หมอนของรถไฟ หลังจากนั้นค่าการทรุดตัวถาวรจะเพิ่มขึ้นแต่มีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ต่ำกว่าเดิม โดยจะมีการทรุดตัวเพิ่มขึ้นทีละน้อยหลังจากผ่านช่วง 10,000 รอบเป็นต้นไป ดังนั้นจากรูปที่ 60 แสดงให้เห็นว่ากรณีที่มีการใช้งานวัสดุยืดหยุ่นรองใต้หมอนของรถไฟ อาทิเช่นแผ่นยางพารามรมควันนั้นมิผลทำให้การทรุดตัวที่สูงในแต่แรกเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารองใต้หมอนรถไฟ

จากรูปที่ 60 สรุปได้ว่ากรณีของ ParaUSP ทั้งการทดสอบโดยการใช้น้ำหนักดเพลลาที่ 20Ton และ 50Ton มีค่าการทรุดตัวที่สูงสุดทั้ง 2 กรณี โดยมีค่าการทรุดตัวที่สูงที่สุดของ ParaUSP Heavy Load 50Ton Sample 1 และ 2 คือ 38.11 มม. และ 37.28 มม. ตามลำดับ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการใช้วัสดุยืดหยุ่นที่วางอยู่ใต้หมอนรถไฟทำให้เกิดการทรุดตัวที่สูงกว่าแต่ก็มีแนวโน้มที่ลดลงและคงที่เมื่อมีจำนวนรอบแรงกระทำซ้ำที่เพิ่มมากขึ้น

**การทดสอบตัวถ่วงของหินโรยทางกรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารวมควัน (NoUSP) ที่น้ำหนักกด  
เพลลา 20 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่3ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่1**

สรุปผลจากการทดลองพบว่าค่าการทดสอบตัวถ่วงของกรณีที่ไม่ใช้แผ่นยางพารารวมควัน (NoUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 20 ตัน พบว่า ทุกครั้งที่มีการจัดเรียงอนุภาคของหินโรยทางใหม่ก่อนเริ่มทำการทดสอบ ค่าการทดสอบตัวถ่วงในแนวดิ่ง ในช่วงของการ Preload มีค่าเริ่มต้นการทดสอบตัวถ่วงค่อนข้างสูง และ ในระหว่าง Runcondition1 ค่าการทดสอบตัวถ่วงในแนวดิ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ต่ำจนถึงรอบที่กำหนด ตามที่กล่าวมาข้างต้นโดย มีค่าการทดสอบตัวถ่วงในแนวดิ่งที่สิ้นสุดในแต่ละรอบการทดสอบดังนี้

PreCondition1 มีค่า 9.319 มม. ที่ 10,000 รอบ และ Runcondition1M มีค่า 11.199 มม. ที่จำนวนรอบสะสม1,010,000 รอบ อ้างอิงจากงานวิจัย (Somkith Dethvongsone , 2018)

PreCondition2 มีค่า 7.049 มม. ที่ 1,010,000 รอบ และ Runcondition1Mto2M มีค่า 10.684 มม. ที่จำนวนรอบสะสม 2,020,000 รอบ

PreCondition3 มีค่า 9.105 มม. ที่ 2,010,000 รอบ และ Runcondition2Mto3M มีค่า 13.816 มม. ที่จำนวนรอบสะสม 3,010,000 รอบ

**การทดสอบตัวถ่วงของหินโรยทางกรณีใช้แผ่นยางพารารวมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกด  
เพลลา 20 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่3ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่1**

สรุปผลจากการทดลองพบว่าค่าการทดสอบตัวถ่วงของกรณีที่ใช้แผ่นยางพารารวมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 20 ตัน มีค่าการทดสอบตัวถ่วงในแนวดิ่งที่สิ้นสุดในแต่ละรอบการทดสอบดังนี้

PreCondition1 มีค่า 13.869 มม. ที่ 10,000 รอบ และ Runcondition1M มีค่า 21.335 มม. ที่จำนวนรอบสะสม 1,010,000 รอบ โดยมีการอ้างอิงจากงานวิจัยที่สอดคล้องในกรณีนี้จาก (Somkith Dethvongsone , 2018) PreCondition1 มีค่า 11.520 มม. ที่ 10,000 รอบ และ

Runcondition1M มีค่า 17.961 มม. ที่จำนวนรอบสะสม 1,010,000 รอบ

PreCondition2 มีค่า 13.059 มม. ที่ 1,020,000 รอบ และ Runcondition1Mto2M มีค่า 19.711 มม. ที่จำนวนรอบสะสม 2,020,000 รอบ

PreCondition3 มีค่า 18.726 มม. ที่ 2,030,000 รอบ และ Runcondition2Mto3M มีค่า 24.382 มม. ที่จำนวนรอบสะสม 3,030,000 รอบ

**การทดสอบตัวถ่วงของหินโรยทางกรณีไม่ใช่แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) ที่น้ำหนักกดเพลา 50 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 1 และ ตัวอย่างที่ 2**

สรุปผลจากการทดลองพบว่าค่าการทดสอบตัวถ่วงของกรณีที่ไม่ใช่แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) ที่น้ำหนักกดเพลา 50 ตัน ของตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 ซึ่งทั้งสองตัวอย่างได้ทำการทดสอบโดยมีเงื่อนไขเดียวกัน

ซึ่งมีค่าการทดสอบตัวถ่วงในแนวตั้งที่สิ้นสุดในแต่ละรอบการทดสอบดังนี้

PreCondition1 มีค่า 22.600 มม. และ 23.374 มม. ที่ 10,000 รอบ ตามลำดับ และ Runcondition1M มีค่า 27.716 มม. และ 33.940 มม. ที่จำนวนรอบสะสม 1,010,000 รอบ ตามลำดับ

PreCondition2 มีค่า 21.225 มม. และ 19.424 มม. ที่ 1,020,000 รอบ ตามลำดับ และ Runcondition1Mto2M มีค่า 26.470 มม. และ 24.238 มม. ที่จำนวนรอบสะสม 2,020,000 รอบ ตามลำดับ

PreCondition3 มีค่า 20.164 มม. และ 23.914 มม. ที่ 2,030,000 รอบ ตามลำดับ และ Runcondition2Mto3M มีค่า 27.183 มม. ที่จำนวนรอบสะสม 3,030,000 รอบ และ 30.344 มม. ที่จำนวนรอบสะสม 3,056,715 รอบ ตามลำดับ

**การทดสอบตัวถ่วงของหินโรยทางกรณีใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกด  
เพลา 50 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่3ล้านรอบโดยมีการชอมบำรุง ตัวอย่างที่1 และ  
ตัวอย่างที่2**

สรุปผลจากการทดลองพบว่าค่าการทดสอบตัวถ่วงของกรณีที่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลา 50 ตัน ของตัวอย่างที่1 และตัวอย่างที่2 ซึ่งทั้งสองตัวอย่างได้ทำการทดสอบโดยมีเงื่อนไขเดียวกัน

ซึ่งมีค่าการทดสอบตัวถ่วงในแนวตั้งที่สิ้นสุดในแต่ละรอบการทดสอบดังนี้

PreCondition1 มีค่า 31.042 มม. และ 20.439 มม. ที่ 10,000 รอบ ตามลำดับ และ Runcondition1M มีค่า 38.107 มม. และ 29.556 มม. ที่จำนวนรอบสะสม 1,010,000 รอบ ตามลำดับ

PreCondition2 มีค่า 22.915 มม. และ 26.985 มม. ที่ 1,020,000 รอบ ตามลำดับ และ Runcondition1Mto2M มีค่า 28.064 มม. และ 34.964 มม. ที่จำนวนรอบสะสม 2,020,000 รอบ ตามลำดับ

PreCondition3 มีค่า 19.916 มม. และ 28.739 มม. ที่ 2,030,000 รอบ ตามลำดับ และ Runcondition2Mto3M มีค่า 29.348 มม. ที่จำนวนรอบสะสม 3,030,056 รอบ และ 37.280 มม. ที่จำนวนรอบสะสม 3,030,000 รอบ ตามลำดับ

**การทดสอบตัวถ่วงของหินโรยทางกรณีใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกด  
เพลา 50 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่3ล้านรอบโดยไม่มีการชอมบำรุง ตัวอย่างที่1**

สรุปผลจากการทดลองพบว่าค่าการทดสอบตัวถ่วงของกรณีที่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลา 50 ตัน ของตัวอย่างที่1 โดยไม่มีจัดเรียงอนุภาคหินโรยทางใหม่ในระหว่างการทดสอบ ซึ่งค่าการทดสอบตัวถ่วงในแนวตั้งจะมีการบันทึกสะสมอย่างต่อเนื่องตลอดจนกระทั่งครบกำหนดของจำนวนรอบแรงกระทำซ้ำ

โดยจะมีค่าการทดสอบตัวถ่วงในแนวตั้งที่สิ้นสุดสะสมทั้งหมดประมาณ 3,010,000 รอบ ดังนี้

PreCondition1 มีค่า 25.903 มม. ที่ 10,000 รอบ และ Runcondition3M มีค่า 38.446 มม. ที่จำนวนรอบสะสม 3,010,000 รอบ



อัตราการใช้พลังงานหมายถึงค่าของผลต่างระหว่างค่าการใช้พลังงานที่ถูกบันทึกกับค่าการใช้พลังงานที่ถูกบันทึกถัดไปหารด้วยจำนวนรอบระหว่างค่าการใช้พลังงานสองจุดนี้ จากรูป แสดงอัตราการใช้พลังงานของการทดสอบในแต่ละกรณี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราการใช้พลังงานมีแนวโน้มที่จะคงที่หลังจากผ่านการรับแรงกระทำซ้ำไปแล้วจำนวนประมาณ 100,000 รอบ สำหรับทุกกรณีของการทดสอบ

$$\text{อัตราการใช้พลังงาน} = \frac{D_a - D_b}{N_{a-b}} \quad (4.13)$$

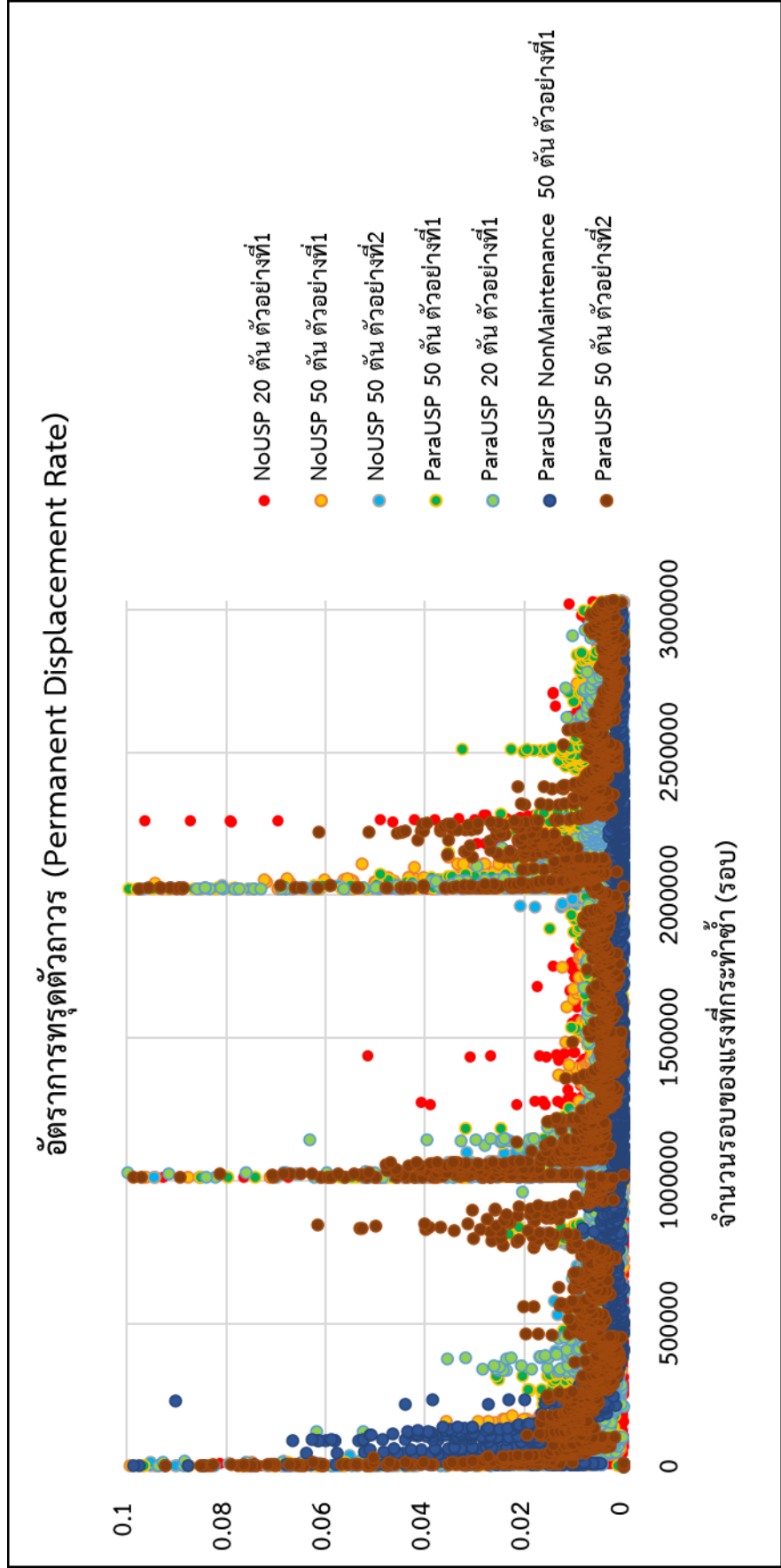
เมื่อ;

$D_a$  คือค่าการใช้พลังงานที่จุด  $a$  รอบ

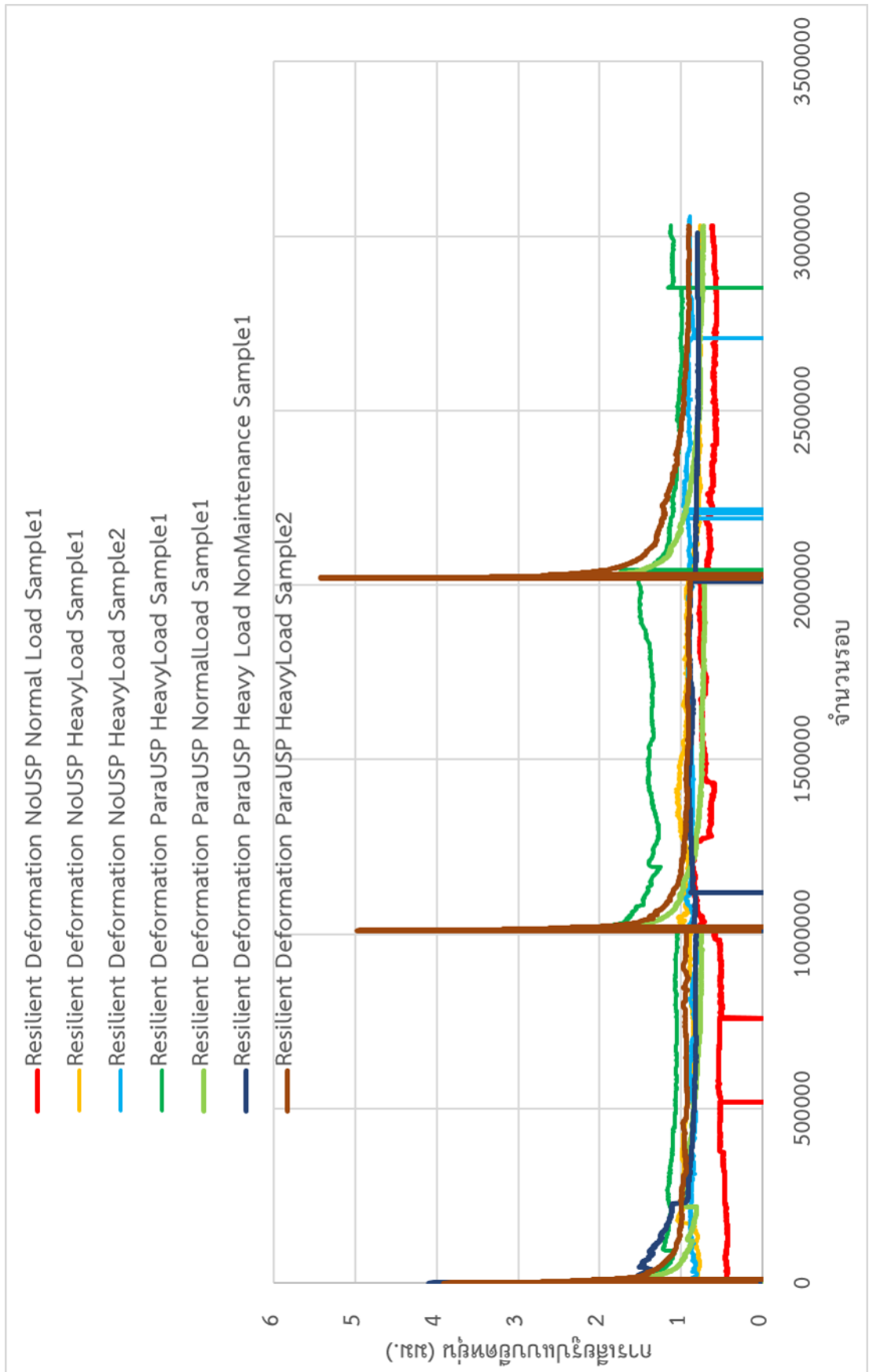
$D_b$  คือค่าการใช้พลังงานที่จุด  $b$  รอบ

$N_{a-b}$  จำนวนรอบจากจุด  $a - b$ .

รูปที่ 61 อัตราการทรุดตัวของเสาเข็มจากผลการทดสอบที่แตกต่างกัน



#### 4.4 การเสียรูปแบบยัดหยุ่นและโมดูลัสของปฏิกิริยากรองทดสอบหินโรยทาง (kB)



## รูปที่ 62 การเสียรูปแบบยืดหยุ่นของกล่องทดสอบหินโรยทางในแต่ละกรณีต่อจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำ

$$\text{การเสียรูปแบบยืดหยุ่น} = \Delta_{\text{บน-สูงสุด}} - \Delta_{\text{ล่าง-สูงสุด}} \quad (4.14)$$

โดย:

$\Delta_{\text{บน-สูงสุด}}$  คือ การเสียรูปในขณะที่โหลดขึ้นไปถึงจุดสูงสุด

$\Delta_{\text{ล่าง-สูงสุด}}$  คือ การเสียรูปในขณะที่โหลดขึ้นไปถึงจุดต่ำสุด

การเคลื่อนที่แบบยืดหยุ่นของหมอนรถไฟถูกคำนวณโดยใช้สมการ 4.14 ซึ่งเป็นการบันทึกข้อมูลการเคลื่อนที่ของหมอนรถไฟภายในรอบของแรงกระทำซ้ำ โดยการเคลื่อนที่แบบยืดหยุ่นของหมอนรถไฟในแต่ละกรณีศึกษาได้ถูกพล็อตลงในรูปที่ 62 ดังที่เห็นได้จากกราฟตัวอย่างทั้งหมด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการลดลงของการเคลื่อนที่แบบยืดหยุ่นในทันทีที่ผ่านการ PreLoad 10,000 รอบ เป็นต้นไป หลังจากนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของการเคลื่อนที่แบบยืดหยุ่นเริ่มที่จะมีค่าคงที่เมื่อมีรอบของแรงกระทำซ้ำที่เพิ่มขึ้น

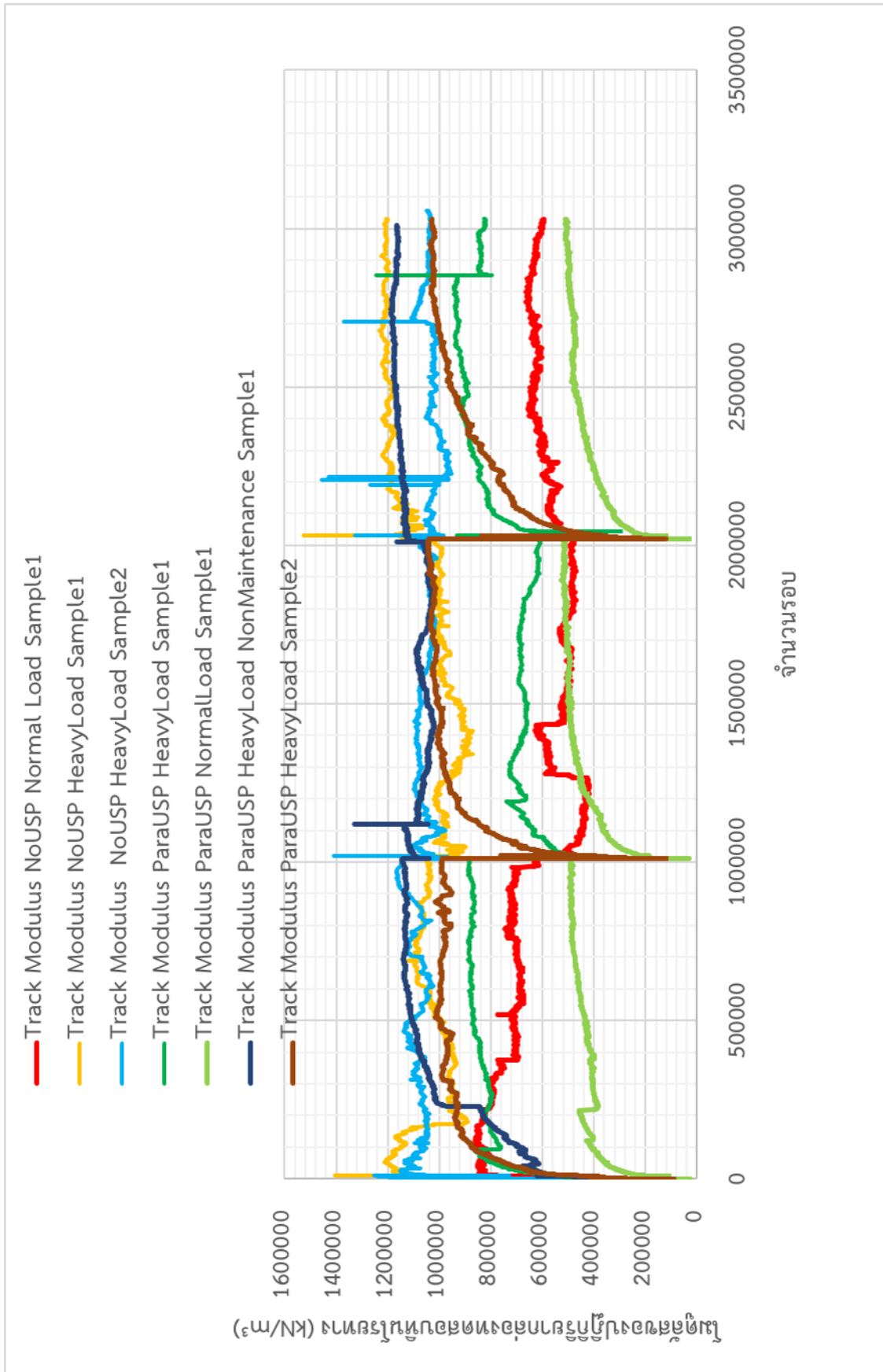
โดยสามารถสรุปช่วงของค่าการเคลื่อนที่แบบยืดหยุ่นได้ในแต่ละกรณีดังนี้

- NoUSP Normal Load Sample 1 มีค่าการเคลื่อนที่แบบยืดหยุ่น อยู่ในช่วง 0.003 มม. ถึง 1.314 มม.
- NoUSP Heavy Load Sample 1 มีค่าการเคลื่อนที่แบบยืดหยุ่น อยู่ในช่วง 0.003 มม. ถึง 1.427 มม.
- NoUSP Heavy Load Sample 2 มีค่าการเคลื่อนที่แบบยืดหยุ่น อยู่ในช่วง 0.003 มม. ถึง 1.174 มม.
- ParaUSP Heavy Load Sample 1 มีค่าการเคลื่อนที่แบบยืดหยุ่น อยู่ในช่วง 0.005 มม. ถึง 4.063 มม.
- ParaUSP Normal Load Sample 1 มีค่าการเคลื่อนที่แบบยืดหยุ่น อยู่ในช่วง 0.015 มม. ถึง 3.109 มม.
- ParaUSP Heavy Load NonMaintenance Sample 1 ค่าการเคลื่อนที่แบบยืดหยุ่น อยู่ในช่วง 0.003 มม. ถึง 4.09 มม.

- ParaUSP Heavy Load Sample 2 มีค่าการเคลื่อนที่แบบยืดหยุ่น อยู่ในช่วง 0.005 มม. ถึง 5.432 มม.

จากกราฟข้างต้นสามารถวิเคราะห์ได้ว่าในกรณีของ ParaUSP ทั้งหมดนั้นจะมีค่าการเคลื่อนที่แบบยืดหยุ่นที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงระหว่าง Preload แต่หลังจากนั้นค่าการเคลื่อนที่แบบยืดหยุ่นก็จะมีการลดลงเมื่อจำนวนรอบของการทดสอบเพิ่มขึ้น จนใกล้เคียงกับกรณีของ NoUSP ซึ่งเป็นสัญญาณที่ดีในการใช้วัสดุยืดหยุ่นเข้ามาเมื่อมีการใช้งานในระยะยาว





รูปที่ 63 โมดูลัสของปฏิกิริยากล่องทดสอบหินโรยทางต่อจำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำ

$$k_B = \frac{\frac{P}{A}}{\Delta_{up-peak} - \Delta_{low-peak}} \quad (4.15)$$

เมื่อ:

$k_B$  คือ โมดูลัสของปฏิกิริยากล่องทดสอบหินโรยทาง (kN/ม.<sup>3</sup>)

P คือ แรงที่กระทำ (kN)

A คือ พื้นที่ใต้หมอนรถไฟ (ม.<sup>2</sup>)

$\Delta_{up-peak}$  คือ การเสียรูปในขณะที่โหลดขึ้นไปถึงจุดสูงสุด (ม.)

$\Delta_{low-peak}$  คือ การเสียรูปในขณะที่โหลดขึ้นไปถึงจุดต่ำสุด (ม.)

โมดูลัสของปฏิกิริยากล่องทดสอบหินโรยทางถูกกำหนดจากความดันภายใต้หมอนรถไฟส่วนด้วยการเคลื่อนที่แบบยืดหยุ่น รูปที่ 63 แสดงผลลัพธ์ของโมดูลัสปฏิกิริยาของกล่องหินโรยทางกับจำนวนรอบโหลดกระทำซ้ำที่บันทึกในระหว่างการทดสอบกล่องหินโรยทาง จะเห็นได้ว่า กรณีกล่องทดสอบ NoUSP โดยในแรกเริ่มจะมีค่าโมดูลัสที่สูงกว่ากรณีกล่องทดสอบที่เป็น ParaUSP และในทางตรงกันข้ามโมดูลัสของ ParaUSP มีค่าปฏิกิริยาโมดูลัสที่ต่ำในแรกเริ่มและค่าโมดูลัสของ ParaUSP จะเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 200,000 รอบแรกหลังจากเริ่มเงื่อนไขของการทดสอบใหม่ รวมถึงยังคงมีความเสถียรจนถึงในแต่ละ 1 ล้านรอบ ซึ่งสรุปค่าโมดูลัสปฏิกิริยาของกล่องทดสอบหินโรยทางของกรณี ParaUSP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบการโหลดที่เพิ่มขึ้น ที่ 1 ล้านรอบ โดยค่าโมดูลัสอยู่ใกล้เคียงกับโมดูลัสของกรณี NoUSP

- ค่าโมดูลัสของปฏิกิริยากล่องทดสอบหินโรยทางกรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 20 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 1

สรุปผลตลอดช่วงของการทดสอบในกรณีที่ไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) ที่ใช้น้ำหนักกดเพลลา 20 ตัน พบว่าค่าปฏิกิริยาของกล่องทดสอบหินโรยทาง มีค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 103,568.843 kN/มม.<sup>3</sup> และ 861,598.5 kN/มม.<sup>3</sup> ของจำนวนแรงกระทำซ้ำสะสมทั้งหมด 3,030,000 รอบ

- ค่าโมดูลัสของปฏิกิริยากล่องทดสอบหินโรยทางกรณีใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 20 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 1

สรุปผลตลอดช่วงของการทดสอบในกรณีที่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSP) ที่ใช้น้ำหนักกดเพลลา 20 ตัน พบว่าค่าปฏิกิริยาของกล่องทดสอบหินโรยทาง มีค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 26,346.13 kN/มม.<sup>3</sup> และ 526,423.9 kN/มม.<sup>3</sup> ของจำนวนแรงกระทำซ้ำสะสมทั้งหมด 3,030,000 รอบ และสามารถอ้างอิงค่าปฏิกิริยาของกล่องทดสอบหินโรยทางเฉพาะการทดสอบที่มีแรงกระทำซ้ำสะสมจำนวน 1,010,000 รอบ จากของ Somkith Dethvongsone , 2018) มีค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 54,470.01 kN/มม.<sup>3</sup> และ 666,555.9 kN/มม.<sup>3</sup>

- ค่าโมดูลัสของปฏิกิริยากล่องทดสอบหินโรยทางกรณีไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 1 และ ตัวอย่างที่ 2

สรุปผลตลอดช่วงของการทดสอบในกรณีที่ไม่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) ที่ใช้น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน พบว่าค่าปฏิกิริยาของกล่องทดสอบหินโรยทาง มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 224,021.164 kN/มม.<sup>3</sup> และ 152,148.183 kN/มม.<sup>3</sup> และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 1,528,291.918 kN/มม.<sup>3</sup> และ 1,457,654.286 kN/มม.<sup>3</sup> ของจำนวนแรงกระทำซ้ำสะสมทั้งหมด 3,030,000 รอบ ตามลำดับของตัวอย่าง

- ค่าโมดูลัสของปฏิกิริยากล่องทดสอบหินโรยทางกรณีใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 1 และ ตัวอย่างที่ 2

สรุปผลตลอดช่วงของการทดสอบในกรณีที่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSP) ที่ใช้น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน พบว่าค่าปฏิกิริยาของกล่องทดสอบหินโรยทาง มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 53,724.772 kN/มม.<sup>3</sup> และ 90,019.94 kN/มม.<sup>3</sup> และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 1,246,287.625 kN/มม.<sup>3</sup> และ 1,045,208.633 kN/มม.<sup>3</sup> ของจำนวนแรงกระทำซ้ำสะสมประมาณ 3,030,000 รอบ ตามลำดับของตัวอย่าง



- ค่าโมดูลัสของปฏิกิริยากล่องทดสอบหินโรยทางกรณีใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่3ล้านรอบโดยไม่มีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่1

สรุปผลตลอดช่วงของการทดสอบในกรณีที่ใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSP) ที่ใช้น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน แบบไม่มีจัดเรียงของอนุภาคหินโรยทางใหม่ใดๆเลย พบว่าค่าปฏิกิริยาของกล่องทดสอบหินโรยทาง มีค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 117,409.794 kN/มม.<sup>3</sup> และ 1,331,316.857 kN/มม.<sup>3</sup> ของจำนวนแรงกระทำซ้ำสะสมทั้งหมด 3,010,000 รอบ

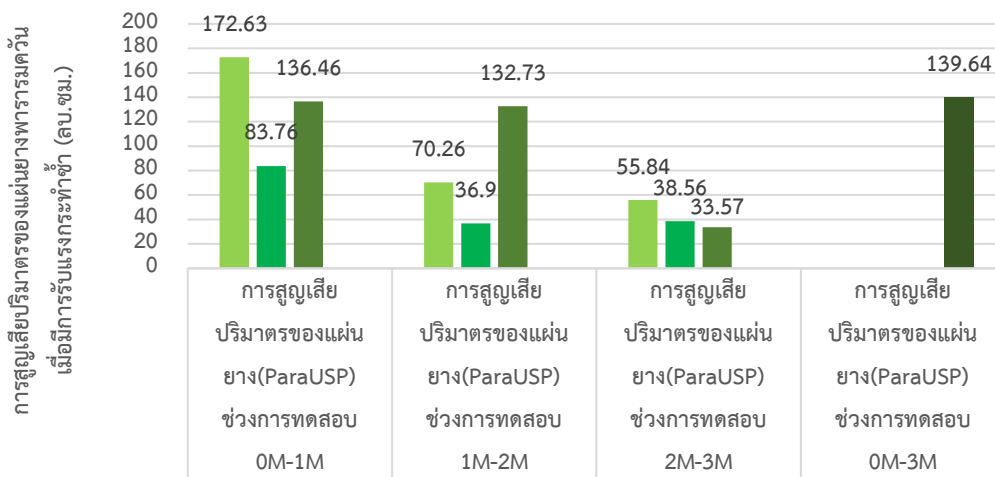


4.5 การวิเคราะห์หาค่าปริมาตรของทรายOttawaของแผ่นยางพารารมควันเมื่อมีการรับแรงกระทำซ้ำ

CALIBRATION OF SAND				
TEST NUMBER	1	2	3	
WT. GMS	JAR, CONE, SAND	10000	10000	10000
	JAR, CONE + REMAINED SAND	3680	3685	3680
	SAND IN CONE + MOLD	6320	6315	6320
	SAND IN CONE	1600	1600	1600
	SAND IN MOLD	4720	4715	4720
SAND DENSITY (gm/cc)		1.53873	1.5371	1.53873
VOLUME OF SAND		3067.46 cc.		
SAND DENSITY		1.53819 gm/cc.		
1. OTTAWA SAND (H-3820 BX)				
2. Mold Ø = 16.12 cm.		H = 15.03 cm.		
Volume = 3067.46 cc.				

กล่องทดสอบหินโรยทางกรณีใช้แผ่นยางพารารมควัน (ParaUSP) ที่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาตรทรายแทนที่ทุกช่วงของการสิ้นสุดการทดสอบ

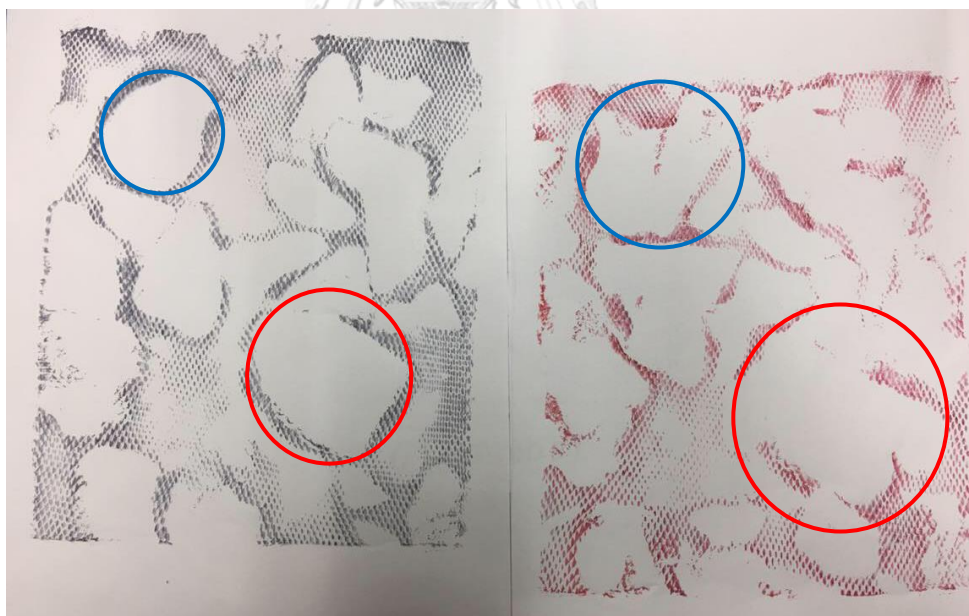
- ParaUSP 20 ตัน ตัวอย่างที่1
- ParaUSP 50 ตัน ตัวอย่างที่1
- ParaUSP 50 ตัน ตัวอย่างที่2
- ParaUSP Non-Maintenance 50 ตัน ตัวอย่างที่1



■ ParaUSP 20 ตัน ตัวอย่างที่1	172.63	70.26	55.84	
■ ParaUSP 50 ตัน ตัวอย่างที่1	83.76	36.9	38.56	
■ ParaUSP 50 ตัน ตัวอย่างที่2	136.46	132.73	33.57	
■ ParaUSP Non-Maintenance 50 ตัน ตัวอย่างที่1				139.64

ช่วงของจำนวนรอบในการทดสอบ

จากการทดสอบการวิเคราะห์หาค่าปริมาตรของทรายที่มีการแทนที่พบว่า ในกรณีที่มีการใช้แผ่นยางพารารวมควั่นติดตั้งใต้หมอนของรถไฟจำลองพบว่าในทุกช่วงของการทดสอบจำนวนอนุภาคหินโรยทางที่มีการสัมผัสกับแผ่นยางพารารวมควั่นทำให้เกิดหลุมและความเสียหายต่อแผ่นยางเมื่อมีการรับแรงกระทำซ้ำ จึงทำให้แผ่นยางเกิดรอยยุบแบบยืดหยุ่นและถาวร ขณะที่ทำการทดสอบ รวมถึงในรอบของการทดสอบ 1 ล้านรอบแรงกระทำซ้ำ จะมีการจัดเรียงอนุภาคหินโรยทางใหม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อแผ่นยางรองใต้หมอนทำให้เกิดหลุมและความเสียหายต่อแผ่นยางใหม่เกิดขึ้นโดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากการทดสอบก่อนหน้า แต่โดยทุกๆครั้งที่แผ่นยางรองใต้หมอนรับแรงกระทำซ้ำครบในรอบถัดไป ค่าการสูญเสียปริมาตรของแผ่นยางกลับมีค่าลดลงหรือเพิ่มขึ้นใกล้เคียงจากเดิม ทั้งนี้อันเนื่องมาจากอนุภาคหินโรยทางมีแนวโน้มที่จะกลับสู่ร่องรอยของความเสียหายเดิมเพียงแต่มีขนาดรอยยุบที่ขนาดใหญ่ขึ้นเท่านั้นยกตัวอย่างกรณีการทดสอบการใช้แผ่นยางพารารองใต้หมอนของรถไฟเมื่อเปรียบเทียบรอยยุบระหว่างการทดสอบช่วง 0 ถึง 1 ล้านรอบ กับ 1 ล้านรอบ ถึง 2 ล้านรอบ พบว่าอนุภาคหินโรยทางมีแนวโน้มที่จะคืนสู่ร่องรอยความเสียหายเดิมหลังจากมีการจัดเรียงอนุภาคหินโรยทางใหม่



#### 4.6 สรุปการอภิปราย

จากผลการทดสอบกล่องทดลองและการเปรียบเทียบผลลัพธ์ในทุกสภาวะการทดสอบด้วยการอ้างอิง หินโรยทางโดยรับแรงกระทำซ้ำพบว่าการใช้ยางพาราภายใต้แผ่นรองของหมอนรถไฟทำให้ลดการแตกหักของอนุภาคหินโรยทาง ซึ่งผลลัพธ์ในการศึกษาคั้งนี้สอดคล้องกับ (Hunt and Winkler, 1997; Lundqvist และ Dahlberg, 2005) ซึ่งแนะนำว่า การใช้ความยืดหยุ่นเป็นแผ่นใต้หมอนรถไฟสามารถลดการแตกหักของอนุภาคได้ โดยคล้ายกับการค้นพบของ (Navaratnarajah และ Indraratna, 2017) ซึ่งทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการใช้แผ่นวัสดุรองใต้หมอนของรถไฟที่มีความหนา 8 มม. พบว่าสามารถลดการแตกของอนุภาคหินโรยทางได้

ในส่วนที่เกี่ยวกับการแตกหักของอนุภาคหินโรยทางในแต่ละโซนการศึกษานี้ยังพบอีกว่าการแตกของอนุภาคหินโรยทางกรณีไม่มีแผ่นยางพารา มีแนวโน้มสอดคล้องจากการทดสอบที่จะพบในการศึกษาทดลองที่ดำเนินการโดย (Navaratnarajah และ Indraratna, 2017) ว่าความแตกหักสูงสุดอยู่ที่ชั้นบนสุดตามด้วยชั้นกลางและชั้นล่างเนื่องจากมีความเค้นที่สูงในชั้นบนสุด

โดยการอ้างอิงเพิ่มเติมจากผลการวิจัยพบว่ายางพาราที่ติดตั้งภายใต้หมอนรถไฟ ที่ส่งผลใกล้เคียงกับกรณีของอนุภาคหินโรยทางอ้างอิงมากที่สุด ตามที่คาดไว้และรายงานโดยนักวิจัยคนอื่น (Miguel Sol-Sánchez et al., 2015; Navaratnarajah and Indraratna, 2017) ความหนาความแข็งและความหนาแน่นของยางเป็นปัจจัยสำคัญในการลดการสั่นสะเทือนและการเสีรูปในอนุภาคหินโรยทาง การเสีรูปของอนุภาคหินโรยทางมีอัตราที่สูงในช่วงของการทดสอบที่ 10,000 รอบแรงกระทำซ้ำ (Pre-Condition) อันเนื่องมาจากสาเหตุของอนุภาคหินโรยทางในช่วงเวลาเหล่านี้จะมีการเลื่อนและถูกจัดเรียงใหม่ภายในมวลของอนุภาคหินโรยทางซึ่งได้รับการเสียดสีและเกิดจากสึกหรอทั้งจากการขีดข่วนและการขีดสีของมวลรวมในแต่ละมุมของอนุภาคหินโรยทาง เมื่อรอบของแรงกระทำซ้ำถึงรอบ 100,000 รอบ ค่าอัตราการทรุดตัวเริ่มที่จะคงที่และมีเสถียรภาพซึ่งเป็นการแสดงพฤติกรรมระยะยาวที่ดีของอนุภาคหินโรยทาง

สำหรับโมดูลัสของปฏิกิริยาอนุภาคหินโรยทางภายในกล่องการศึกษานี้พบว่าการใช้ยางพาราภายใต้แผ่นรองหมอนรถไฟมีแนวโน้มใกล้เคียงกับกรณีอนุภาคหินโรยทางอ้างอิง งานวิจัยอื่น ๆ (Kennedy, 2011; Sol-Sánchez et al., 2014) พบว่าเมื่อความแข็งแกร่งของทางรถไฟต่ำลงส่งผลให้เกิดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูง ส่งผลต่อการเสีรูปและขีดสีของอนุภาคหินโรยทางเนื่องจากการหักงอของหินโรยทาง ในทางกลับกันค่าความแข็งแกร่งของทางรถไฟที่สูงจะนำไปสู่การเพิ่มแรงแบบไดนามิกในผิวหน้า

ระหว่างของรางและล้อเช่นเดียวกับหมอนรถไฟและอนุภาคหินโรยทางซึ่งอาจทำให้เกิดการสึกหรอและความล้าของส่วนประกอบของทางได้ ซึ่งสามารถสรุปผลจากการทดลองในกรณีเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้แผ่นยางพาราเป็นวัสดุยึดหยุ่นรองใต้หมอนของรถไฟพบว่าในกรณีที่มีน้ำหนักกดเพลากระทำ 20 ตัน สามารถลดปริมาณการสึกหรอของอนุภาคหินโรยทางได้ ประมาณ 78.44% ซึ่งใกล้เคียงกับการทดสอบของ (Somkith Dethvongsone , 2018) แต่ในกรณีที่มีน้ำหนักกดเพลากระทำ 50 ตัน ความสามารถของวัสดุยึดหยุ่นยางพารามีประสิทธิภาพลดลงสามารถลดการสึกหรอของอนุภาคหินโรยทางได้เพียง 26.23% ถึง 56.32% เท่านั้นดังนั้นการแนะนำให้ใช้ยางพาราเป็นแผ่นรองใต้หมอนรถไฟเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานในรางรถไฟเนื่องจากเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่ดีกว่าในการลดการแตกของอนุภาคหินโรยทางและมีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยต่อประสิทธิภาพของรางบนรางรถไฟ



## บทที่ 5

### 5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของการใช้ยางพาราเป็นแผ่นรองใต้หมอนเพื่อลดการสึกหรอของอนุภาคหินโรยทางโดยใช้การจำลองสภาวะด้วยการทดสอบแบบกล่อง ในการดำเนินงานได้ใช้วัสดุหินโรยทางคือ หินแอนดีไซต์และไรโอไรต์ที่ได้จากพระวิหาร จังหวัดสระบุรี นำมาบรรจุในกล่องทดสอบแล้วจำลองการกระทำซ้ำของเพลาล้อรถไฟด้วยแรงกดผ่านหมอนคอนกรีตจำนวน 3 ล้านรอบ โดยได้ทดสอบการสึกหรอของหินโรยทางจำนวน 7 กล่อง ภายใต้การปรับเปลี่ยนกรณีการทดลองซึ่งประกอบด้วย

1. การกดหินโรยทางด้วยหมอนคอนกรีตเพียงอย่างเดียวสำหรับการอ้างอิง
2. การใช้แผ่นยางพาราความหนา 15 มม. รองใต้หมอนคอนกรีต(Para USP)
3. การใช้หน่วยแรงกดบนหมอน 2 ระดับคือ 280.69 KPa และ 701.725 KPa ซึ่งเทียบเท่ากับน้ำหนักกดเพลลา 20 ตัน และ 50 ตันตามลำดับ

การทดสอบแบบกล่องแต่ละครั้งนั้นดำเนินการภายใต้การแรงกระทำซ้ำแบบ haversine อย่างต่อเนื่อง 5 รอบต่อวินาทีและสิ้นสุดที่ครบจำนวนทุกๆ 1,000,000 รอบ เป็นจำนวน 3 ครั้ง ซึ่งเทียบเท่ากับน้ำหนักผ่านทางสะสม 20 40 และ 60 ล้านตัน สำหรับรูปแบบที่1 และ 50 100 และ 150 ล้านตันสำหรับรูปแบบที่2 ในการทดสอบแต่ละกล่องอนุภาคหินโรยทางทั้งหมดจะถูกชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการทดสอบเพื่อคำนวณหาปริมาณการแตกหักหลังจากการทดสอบ

ข้อสรุปจากผลการศึกษาที่สำคัญในประเด็นของการใช้ยางพาราเป็นแผ่นรองใต้หมอนมีดังนี้

- แผ่นยางพาราที่ถูกใช้เป็นแผ่นรองใต้หมอนคอนกรีต (ParaUSP) สามารถลดการแตกหักของอนุภาคหินโรยทางทั้งในการแตกลักษณะแบบหยาบและการแตกลักษณะแบบละเอียดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการใช้แผ่นยางพารารมควัน (NoUSP) ซึ่งให้ประสิทธิภาพที่ดีในกรณีของขนาดแรงกระทำซ้ำที่ต่ำ แต่เมื่อมีการใช้ขนาดแรงที่สูงขึ้นทำให้แผ่นยางพารารมควันมีประสิทธิภาพในการลดการสึกหรอของอนุภาคหินโรยทางลดลง
- เมื่อเปรียบเทียบค่าการหลุดตัวของหมอนรถไฟและโมดูลัสของปฏิกิริยากล่องทดสอบ กรณีการใช้แผ่นยางพารารองใต้หมอน (Para USP) ก็มีค่าที่วัดได้ในการ

ทดสอบ อยู่ใกล้เคียงกับค่าของกรณีอ้างอิงที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นยางพาราที่รอง  
หมอน (NoUSP)

- หลังจากผ่านการทดสอบจำนวน 3 ล้ารอบ ผลการตรวจสอบแผ่นยางพาราที่รอง  
ใต้หมอนพบว่า แผ่นยางพารา มีการเสียหาย ฉีกขาด หรือ ปริมาตรเปลี่ยนแปลง ทำ  
ให้เกิดหลุมและความเสียหายต่อแผ่นยางทำให้แผ่นยางสูญเสียปริมาตรไปจากเดิม  
โดยค่าปริมาตรจะสูญเสียเพิ่มขึ้นทุกครั้งหลังจากการทดสอบก่อนหน้า แต่โดยทุกๆ  
ครั้งที่แผ่นยางรองใต้หมอนรับแรงกระทำซ้ำๆครบในรอบถัดไป ค่าการสูญเสีย  
ปริมาตรของแผ่นยางกลับมีค่าลดลงหรือเพิ่มขึ้นใกล้เคียงจากเดิม

## 5.2 ข้อจำกัดของการวิจัย

ในการทดสอบแบบกล่องในการศึกษานี้เป็นการจำลองส่วนหนึ่งของชั้นหินโรยทางเฉพาะบน  
เส้นทางที่หินโรยทางถูกวางลงบนพื้นฐานที่แข็งแรง เช่นสะพานคอนกรีต สำหรับกรณีของการทางที่ใช้  
หินโรยทาง บนรากฐานที่ยึดหยุ่น อาทิเช่น หินโรยทางวางบนดินคันทางผลที่ได้อาจแตกต่างกันไป  
นอกจากนี้การทดสอบยังไม่ได้รวมปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ รังสีแสงอาทิตย์และความชื้น  
ซึ่งอาจส่งผลต่อพฤติกรรมของยางพาราภายใต้สภาพแวดล้อมจริงในช่วงระยะเวลาที่นานกว่าการ  
ทดสอบในงานศึกษานี้

## 5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติม

- ยังมีตัวแปรที่น่าสนใจในการศึกษาผลที่จะมีต่อการสึกหรอของหินโรยทาง อาทิเช่น ความ  
หนาและรูปแบบเค้าโครงของแผ่นยางพาราเพื่อค้นหาประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน
- การทดลองนำแผ่นยางพาราที่รองใต้หมอนไปติดตั้งใช้งานในทางรถไฟในสภาพแวดล้อมจริง  
เพื่อสังเกตประสิทธิภาพในระยะยาว

## ภาคผนวก

(ตัวอย่างการจดบันทึกการซึ้่น้ำหนักของอนุภาคหินโรยทางในแต่ละช่วงของการทดสอบ)

Zone	น้ำหนักหิน ก่อน ทดสอบ	ทดสอบ รอบที่1ล้าน	ทดสอบ รอบที่2ล้าน	ทดสอบ รอบที่3ล้าน	สูญเสีย น้ำหนัก 1M	สูญเสีย น้ำหนัก 2M	สูญเสีย น้ำหนัก 3M
R1-1	84.77	84.77	84.77	84.77	0	0	0
R1-2	53.52	53.52	53.51	53.49	0	0.01	0.02
R1-3	40.92	40.92	40.91	40.89	0	0.01	0.02
R1-4	31.53	31.53	31.52	31.52	0	0.01	0
R1-5	46.53	46.53	46.51	46.47	0	0.02	0.04
R1-6	52.88	52.88	52.88	52.87	0	0	0.01
R1-7	31.51	31.51	31.51	31.5	0	0	0.01
R1-8	35.37	35.37	35.36	35.35	0	0.01	0.01
R1-9	36.89	36.89	36.89	36.87	0	0	0.02
R1-10	34.09	34.08	33.97	33.97	0.01	0.11	0
R1-11	58.62	58.61	58.59	58.57	0.01	0.02	0.02
R1-12	61.81	61.81	61.76	61.69	0	0.05	0.07
R1-13	45	45	45	44.94	0	0	0.06
R1-14	67.6	67.58	67.56	67.51	0.02	0.02	0.05
R1-15	40.29	40.28	40.26	40.26	0.01	0.02	0

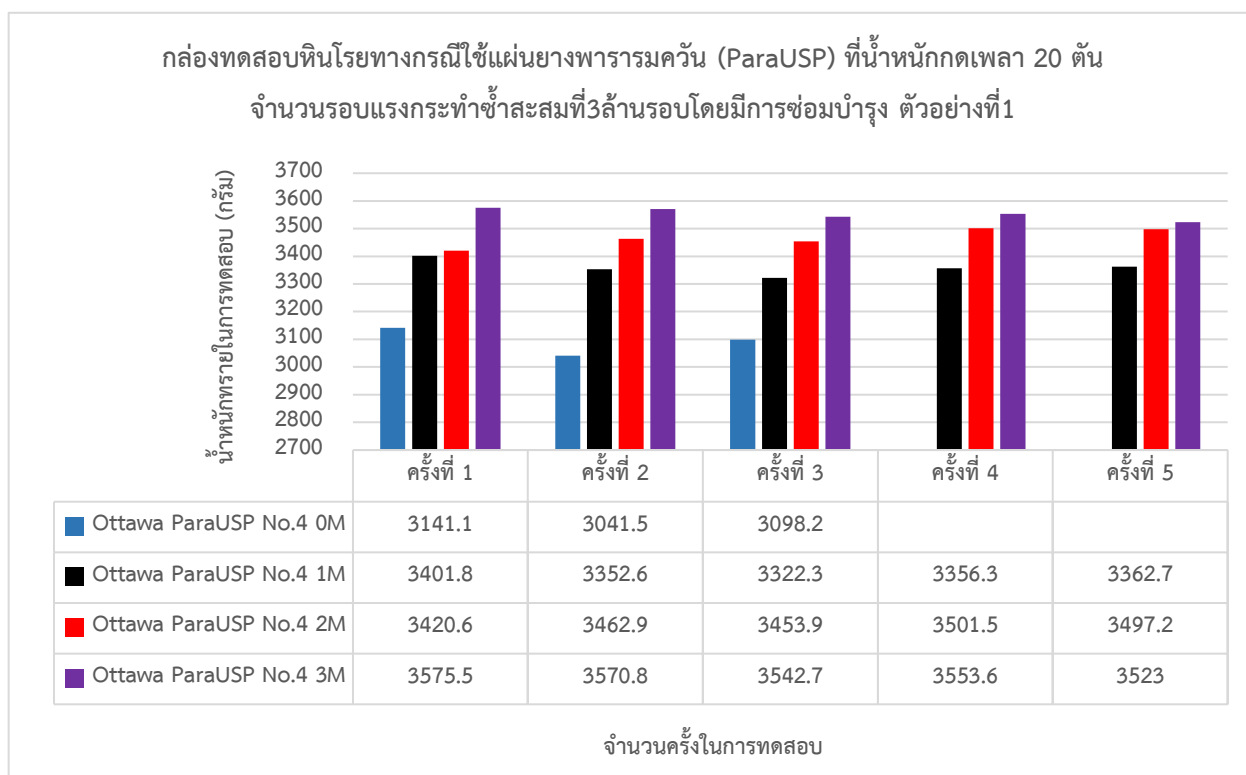


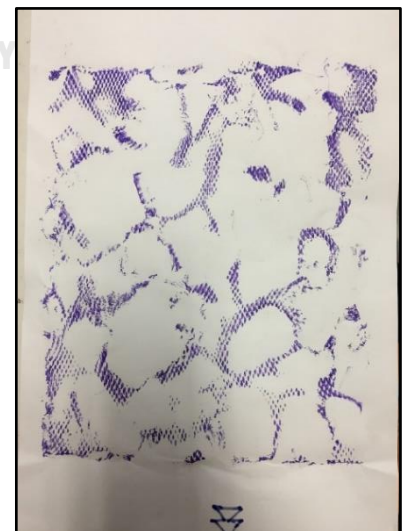
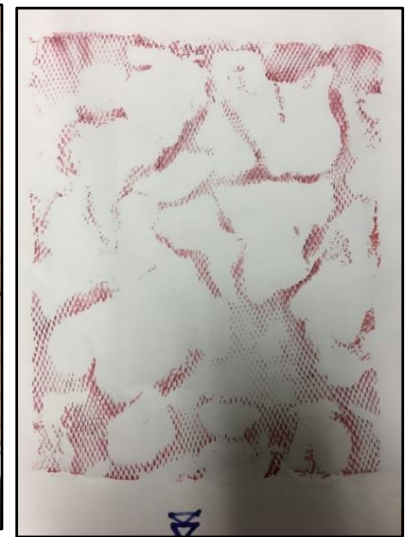
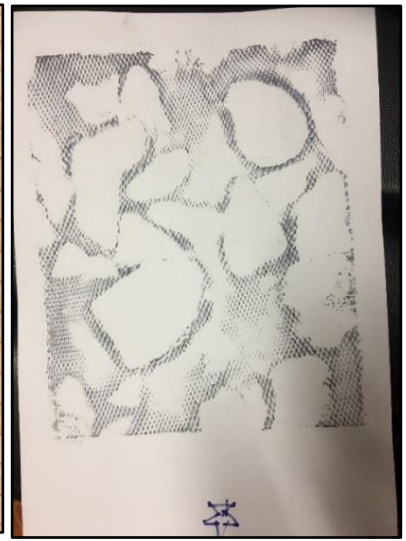
(ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลของการทดสอบ)

Cycle count	TD1 kN Upper value	TD1 kN Lower value	TD2 mm Upper value	TD2 mm Lower value
1	-34.32356644	-34.7591095	18.99843788	18.99430466
100	-0.338277012	-69.99312592	19.39711189	18.54309464
200	-0.380441993	-69.90693665	19.32613182	18.48858261
300	-0.404902011	-69.93554688	19.2853508	18.44873428
400	-0.378675997	-69.87607574	19.25690079	18.41577339
500	-0.383442014	-69.88047791	19.22848892	18.38463783
600	-0.389245987	-69.97484589	19.19978523	18.35471535
700	-0.40554899	-70.02587891	19.15903664	18.31837463
800	-0.33870101	-70.049263	19.13531876	18.29278946
900	-0.376726002	-70.10873413	19.10924911	18.27100563
1000	-0.411697	-69.9202652	19.08733177	18.25038719
1100	-0.430763006	-69.97372437	19.06283569	18.23101997
1200	-0.391377002	-70.00143433	19.04074478	18.20974731
1300	-0.390477985	-69.86016846	19.02220154	18.19352722
1400	-0.374365985	-69.99721527	19.00560951	18.1783638
1500	-0.435732007	-70.09275055	18.98732376	18.16397285
1600	-0.452490985	-69.93868256	18.97159767	18.15037918
1700	-0.384555012	-69.95768738	18.95632362	18.13484955
1800	-0.380607992	-70.07852173	18.93648338	18.11749077
1900	-0.364657998	-70.11489105	18.92411041	18.1045742
2000	-0.408336014	-70.04405975	18.90519905	18.09064484
2500	-0.425523996	-70.12211609	18.8442421	18.03450203
3000	-0.406260997	-70.02046967	18.77659798	17.95953369
3500	-0.186875001	-69.50648499	18.74325371	17.90687943
4000	-0.421407014	-70.16374969	18.6763401	17.86392403
4500	-0.375566006	-70.14265442	18.63890648	17.82232857
5000	-0.400240004	-69.95437622	18.60089684	17.7908802
5500	-0.36095199	-69.87503052	18.57387924	17.76391983
6000	-0.390895009	-69.79486847	18.5465374	17.73419189
6500	-0.369080991	-69.97788239	18.49888802	17.69119453
7000	-0.397870004	-70.16860199	18.45708084	17.64683533
7500	-0.399926007	-69.81926727	18.43161774	17.61807251
8000	-0.399511993	-70.10393524	18.39662933	17.57990265
8500	-0.403165013	-70.1568985	18.3644371	17.54746628
9000	-0.408019006	-69.87326813	18.3309536	17.51885986
9500	-0.408888996	-70.00824738	18.29595947	17.49157143
10000	-0.405856013	-69.91214752	18.26818848	17.46788597

Cycle	Time	TD1 kN	TD2 mm
1	0.0000	-34.32639313	18.99785805
1	0.0020	-34.3345871	18.99805832
1	0.0040	-34.33979416	18.99832726
1	0.0060	-34.32397461	18.99799728
1	0.0080	-34.33885956	18.99804115
1	0.0100	-34.3433609	18.99802971
1	0.0120	-34.3254509	18.99806213
1	0.0140	-34.34552002	18.99789238
1	0.0160	-34.3406601	18.99777412
1	0.0180	-34.33373642	18.99831772
1	0.0200	-34.35087967	18.9978447
1	0.0220	-34.33859634	18.99822617
1	0.0240	-34.33673859	18.99793243
1	0.0260	-34.35460663	18.9981575
1	0.0280	-34.33607483	18.99835205
1	0.0300	-34.34014511	18.99782944
1	0.0320	-34.35326004	18.99772835
1	0.0340	-34.33734894	18.99781036
1	0.0360	-34.3486557	18.99757004
1	0.0380	-34.34876633	18.99795341
1	0.0400	-34.33914566	18.99768066
1	0.0420	-34.34957504	18.99798965
1	4E-02	-34.34734726	18.99781418
1	5E-02	-34.33554459	18.99789238
1	5E-02	-34.35299683	18.9977951
1	5E-02	-34.34065247	18.99815941
1	5E-02	-34.34001923	18.9978466
1	5E-02	-34.35482407	18.99778175
1	6E-02	-34.33797073	18.99819565
1	6E-02	-34.34462738	18.99772453
1	6E-02	-34.35058975	18.99769592

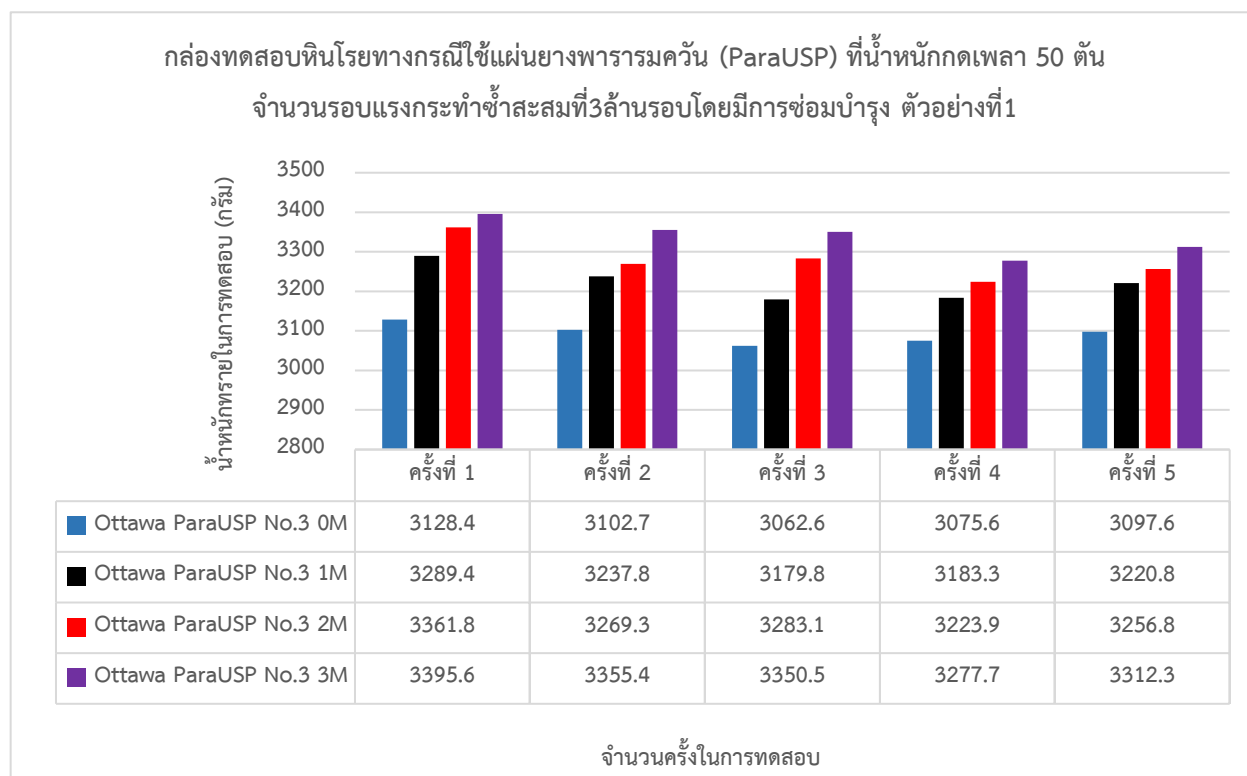
(ปริมาณของทรายที่ใช้ในการทดสอบแทนที่ในกล่องทดสอบหินโรยทางกรณีใช้แผ่นยางพารารวมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 20 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 1)

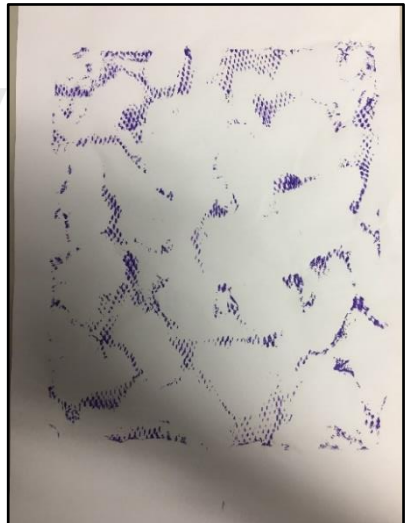
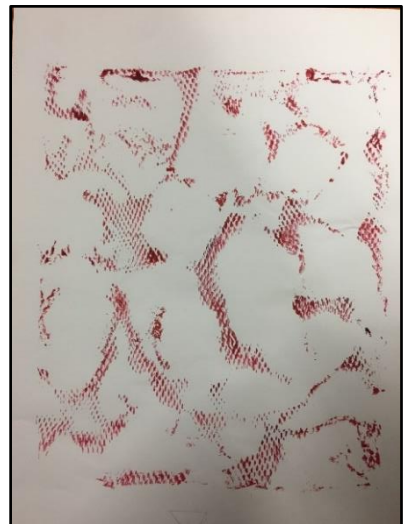
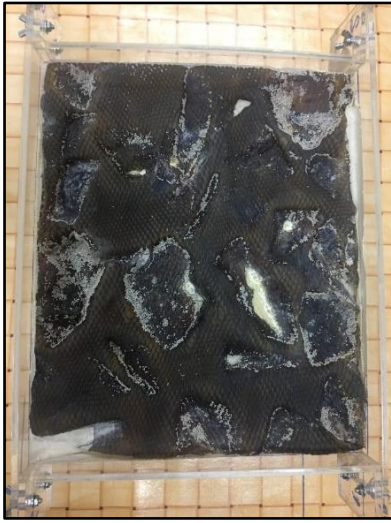




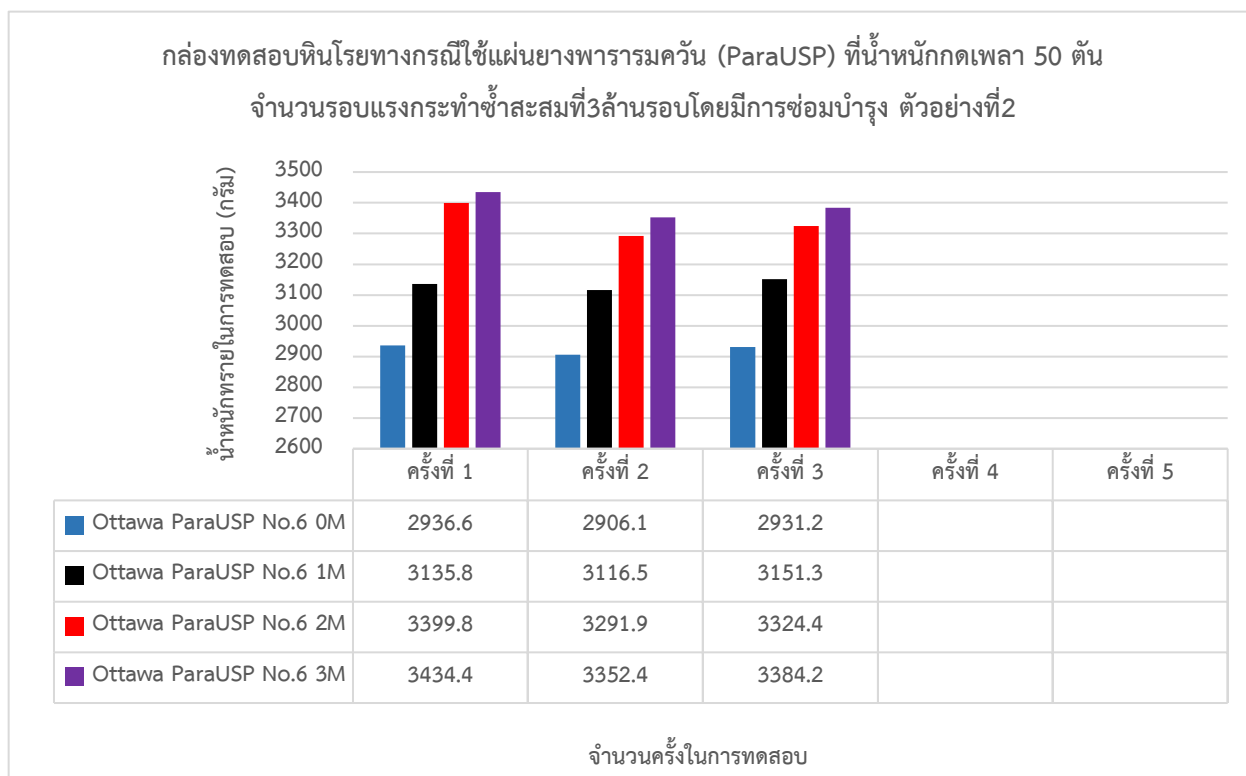
ภาพส่งไปรษณีย์โดย

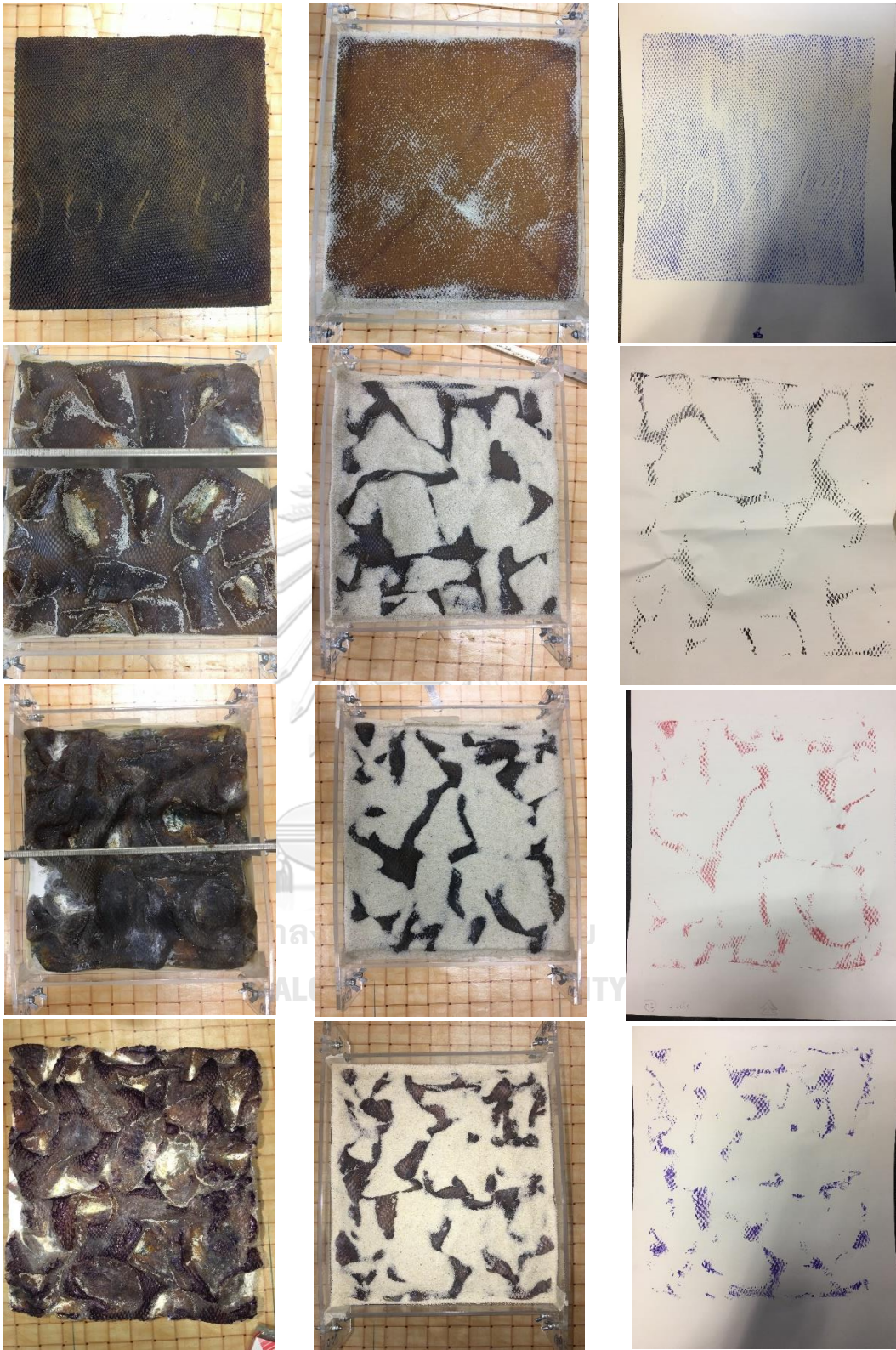
(ปริมาณของทรายที่ใช้ในการทดสอบแทนที่ในกล่องทดสอบหินโรยทางกรณีใช้แผ่นยางพารารวมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 1)





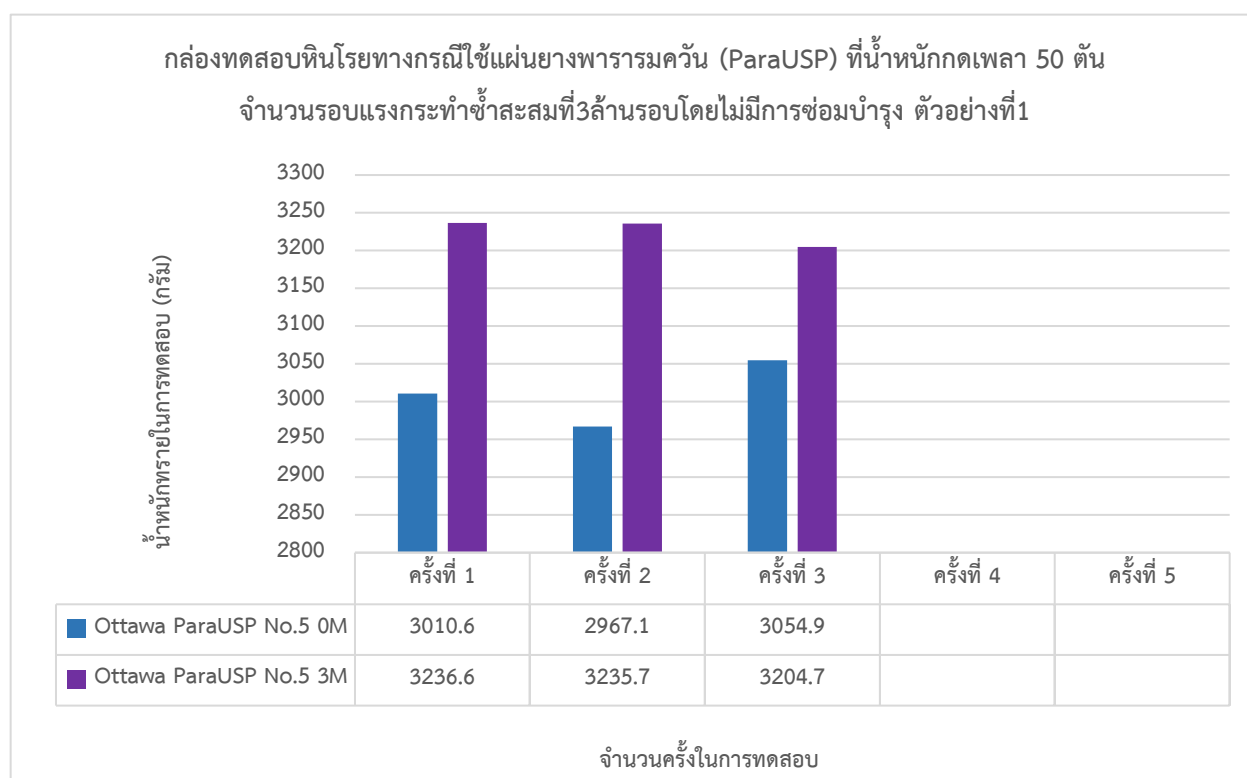
(ปริมาณของทรายที่ใช้ในการทดสอบแทนที่ในกล่องทดสอบหินโรยทางกรณีใช้แผ่นยางพารารวมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบโดยมีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 2)







(ปริมาณของทรายที่ใช้ในการทดสอบแทนที่ในกล่องทดสอบหินโรยทางกรณีใช้แผ่นยางพารารวมควัน (ParaUSP) ที่น้ำหนักกดเพลลา 50 ตัน จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำสะสมที่ 3 ล้านรอบโดยไม่มีการซ่อมบำรุง ตัวอย่างที่ 1)





## บรรณานุกรม

- Aursudkij, B., McDowell, G., & Collop, A. (2009). Cyclic loading of railway ballast under triaxial conditions and in a railway test facility. *Granular Matter*, 11(6), 391.
- Cuelho, E., Mokwa, R., Obert, K., & Miller, A. (2008). *Comparative analysis of micro-Deval, LA abrasion, and sulfate soundness tests*. Retrieved from
- D'Angelo, G., Thom, N., & Presti, D. L. (2015). Laboratory simulation of field loading conditions and maintenance operations. *Proceeding of Railway Engineering*.
- Du Plooy, R. F., & Gräbe, P. (2017). Characterisation of rigid polyurethane foam-reinforced ballast through cyclic loading box tests. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 59(2), 2-10.
- Ebrahimi, A., Tinjum, J. M., & Edil, T. B. (2010). *Large-Scale, cyclic triaxial testing of rail ballast*. Paper presented at the AREMA Annual Conference e Exposition, Orlando.
- Esmaili, M., Aela, P., & Hosseini, A. (2017). Experimental assessment of cyclic behavior of sand-fouled ballast mixed with tire derived aggregates. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 98, 1-11.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.03.033>
- Esveld, C. (2014). *Modern railway track*. Netherland: MRT-Productions.
- Fathali, M., Nejad, F. M., & Esmaili, M. (2016). Influence of tire-derived aggregates on the properties of railway ballast material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(1), 04016177.
- Getzner. (2015). *Sleeper Padding for Ballasted Track*  
Retrieved from <https://www.getzner.com/en/products/rail-products/sleeper-pads>
- Gupta, A. K. (2009). Effect of particle size and confining pressure on breakage and strength parameters of rockfill materials. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 14(Bund. H), 1-12.
- Ho, C., Humphrey, D., Hyslip, J., & Moorhead, W. (2013). Use of Recycled Tire Rubber to Modify Track-Substructure Interaction. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(2374), 119-125.

- Hunt, H., & WINKLER. (1997). *SETTLEMENT OF RAILWAY TRACK NEAR BRIDGE ABUTMENTS.(THIRD PAPER IN YOUNG RAILWAY ENGINEER OF THE YEAR (1996) AWARD)*. Paper presented at the Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport.
- Indraratna, B., Khabbaz, H., Salim, W., & Christie, D. (2006). Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics. *Institution of Civil Engineers. Proceedings. Ground...*
- Indraratna, B., Lackenby, J., & Christie, D. (2005). Effect of confining pressure on the degradation of ballast under cyclic loading.
- Indraratna, B., Salim, W., & Rujikiatkamjorn, C. (2011). *Advanced rail geotechnology–ballasted track*: CRC press.
- Kaewunruen, S., & Remennikov, A. M. (2015). Under sleeper pads: field investigation of their role in detrimental impact mitigation.
- Kashani, H. F., Hyslip, J. P., & Ho, C. L. (2017). Laboratory evaluation of railroad ballast behavior under heavy axle load and high traffic conditions. *Transportation Geotechnics, 11*, 69-81.
- Kennedy, J., Woodward, P. K., Medero, G., & Banimahd, M. (2013). Reducing railway track settlement using three-dimensional polyurethane polymer reinforcement of the ballast. *Construction and Building Materials, 44*, 615-625.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.002>
- Koike, Y., Nakamura, T., Hayano, K., & Momoya, Y. (2014). Numerical method for evaluating the lateral resistance of sleepers in ballasted tracks. *Soils and Foundations, 54(3)*, 502-514.
- Koohmishi, M., & Palassi, M. (2018). Degradation of railway ballast under compressive loads considering particles rearrangement. *International Journal of Pavement Engineering, 1-13*.
- Lade, P. V., Yamamuro, J. A., & Bopp, P. A. (1996). Significance of particle crushing in granular materials. *Journal of Geotechnical Engineering, 122(4)*, 309-316.
- Lee, K. L., & Farhoomand, I. (1967). Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression. *Canadian geotechnical journal, 4(1)*, 68-86.
- Lichtberger, B. J. E. T.-H. G., & Co. KG, H. (2005). Track compendium. 634.

- Liu, S., Huang, H., Qiu, T., & Kwon, J. (2016). Effect of geogrid on railroad ballast particle movement. *Transportation Geotechnics*, 9, 110-122.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.08.003>
- Lundqvist, A., & Dahlberg, T. (2005). *Railway track stiffness variation-consequences and countermeasures*. Paper presented at the 19th IAVSD Symposium of Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, Milano, August 29-September 2, 2005.
- Marsal, R. J. (1967). Large-scale testing of rockfill materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(2), 27-43.
- Qian, Y., Boler, H., Moaveni, M., Tutumluer, E., Hashash, Y., & Ghaboussi, J. (2014). Characterizing ballast degradation through Los Angeles abrasion test and image analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(2448), 142-151.
- Qian, Y., Mishra, D., Tutumluer, E., & Kazmee, H. A. (2015). Characterization of geogrid reinforced ballast behavior at different levels of degradation through triaxial shear strength test and discrete element modeling. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(5), 393-402.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.012>
- Raymond, G. P. (2002). Reinforced ballast behaviour subjected to repeated load. *Geotextiles and Geomembranes*, 20(1), 39-61.
- Salim, W. (2004). Deformation and degradation aspects of ballast and constitutive modelling under cyclic loading.
- Selig, E. T., & Waters, J. M. (1994). *Track geotechnology and substructure management*: Thomas Telford.
- Shenton, M. (1978). Deformation of railway ballast under repeated loading conditions. In *Railroad track mechanics and technology* (pp. 405-425): Elsevier.
- Sol-Sánchez, M., Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M. (2014). The use of deconstructed tires as elastic elements in railway tracks. *Materials*, 7(8), 5903-5919.
- Sol-Sánchez, M., Thom, N. H., Moreno-Navarro, F., Rubio-Gámez, M. C., & Airey, G. D. (2015). A study into the use of crumb rubber in railway ballast. *Construction and Building Materials*, 75, 19-24.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.045>

Suku, L., Prabhu, S. S., Ramesh, P., & Babu, G. L. S. (2016). Behavior of geocell-reinforced granular base under repeated loading. *Transportation Geotechnics*, 9, 17-30.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.06.002>

Sun, Q., Indraratna, B., & Nimbalkar, S. (2014). Effect of cyclic loading frequency on the permanent deformation and degradation of railway ballast. *Géotechnique*.

Vadood, M., Johari, M. S., & Rahaei, A. R. (2014). Introducing a simple method to determine aggregate gradation of hot mix asphalt using image processing. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(2), 142-150.

Zakeri, J. A. (2012). Lateral resistance of railway track. In *Reliability and safety in railway*: InTech.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ศุภกร รอดการทุกซ์
วัน เดือน ปี เกิด	21 มิถุนายน 2538
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลวชิระ
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมต้นและปลายจากโรงเรียนมัธยมวัดนายโรง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา
ที่อยู่ปัจจุบัน	618/419 Lumpini Park Pinklao Tower B 12A/40 ถนนบรมราชชนนี แขวงบางบำหรุ เขตบางพลัด กทม. 10700



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY