การประเมินคุณภาพของการล้างหินโรยทางด้วยเครื่องจักร by Ballast Cleaning Machine

พิษณุ พลกายนุวัตร[1,*] ทัศไนย ไชยชนะ[1] และ สิทธิภัสร์ เอื้ออภิวัชร์[2]

[1] ฝ่ายการช่างโยธา การรถไฟแห่งประเทศไทย กรุงเทพมหานคร
[2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี
**Corresponding author; E-mail address: phitsanu.ph@railway.co.th*

บทคัดย่อ

2 แก่
(Superstructure)
(Substructure)
(Ballast fouling)
(Degradation)
(Ground Penetrating Radar, GPR)

คำสำคัญ:

Abstract

The ballasted track is the most widely used in the rail transportation system. The maintenance schemes of the ballast track are essential to maintain the performance of the railway. The track maintenance to provide good track can be separated into (i) track superstructure, including the rail, fastening system, and sleeper that support the load from the train by reducing the stresses for the substructure layer. (ii) track substructure consists of ballast, sub-ballast, and subgrade that support the loads and distribute them to the foundation. Ballast cleaning is the method to remove existing fouling material in order to ensure good track substructure performance. Ballast fouling significantly affects the bearing capacity of track structure, which can be evaluated by increasing fine particle and ballast degradation. This study presents the type of evaluation and quality assessment of ballast cleaning by the undercutting machine in Thailand, which comprises the ground-penetrating radar (GPR) and ballast gradation based on the case study of the northern railway line of the State Railway of Thailand (SRT) and also recommended to track maintenance plan in the future.

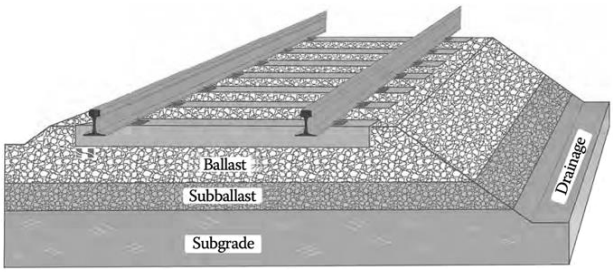
Keywords: Ballasted track, ballast, ballast cleaning, track maintenance, undercutting machine.

1. คำนำ

ระบบขนส่งทางรางเป็นระบบที่สำคัญอีกระบบหนึ่งในการขนส่งของประเทศ โดยมีจุดเด่นในด้านความสามารถในการขนส่งจำนวนมาก และมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงนัก ส่งผลถึงการพัฒนาสังคมและเศรษฐกิจตามเส้นทางรถไฟ ทำให้การรถไฟแห่งประเทศไทย (ร.ฟ.ท.) ซึ่งเป็นรัฐวิสาหกิจขนส่งระบบรางที่ใหญ่ที่สุดในประเทศ จึงมีโครงการก่อสร้างทางรถไฟเพื่อรองรับการขยายตัวในภูมิภาคต่าง ๆ เช่น การก่อสร้างรถไฟทางคู่ระยะที่หนึ่ง 7 เส้นทางที่ก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์ และอยู่ระหว่างก่อสร้าง อันได้แก่ ฉะเชิงเทรา – คลองสิบเก้า - แก่งคอย ชุมทางถนนจิระ - ขอนแก่น ลพบุรี - ปากน้ำโพ มาบกะเบา - ชุมทางถนนจิระ นครปฐม – หัวหิน หัวหิน – ประจวบคีรีขันธ์ และ ประจวบคีรีขันธ์ – ชุมพร รวมระยะทางทั้งหมด 993 กิโลเมตร และในระยะที่สองอีก 9 เส้นทางที่มีแผนการก่อสร้างในอนาคต จะทำให้เส้นทางรถไฟเพิ่มขึ้นเป็น 6,463 กิโลเมตร [1] หากพิจารณาจากการขยายตัวของเส้นทางที่เพิ่มขึ้นนั้น ทำให้ส่งผลถึงรูปแบบและวิธีการซ่อม

บำรุงทางรถไฟที่เพิ่มขึ้นในอนาคตโดยตรง โครงสร้างทางรถไฟที่ก่อสร้างนั้นโดยส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างรถไฟแบบใช้หินโรยทาง (Ballasted Track) ดังแสดงในรูปที่ 1 [2] โครงสร้างดังกล่าวได้รับความนิยมโดยทั่วไป อันมีจุดเด่นอันประกอบไปด้วย [3]

- งบประมาณการก่อสร้างต่ำ และมีการใช้วัสดุในท้องถิ่น
- การบำรุงรักษาที่ง่าย
- เป็นโครงสร้างที่ระบายน้ำได้ดี
- การออกแบบและการก่อสร้างไม่ซับซ้อน



รูปที่ 1 โครงสร้างทางรถไฟแบบใช้หินโรยทางโดยทั่วไป

งบประมาณด้านการซ่อมบำรุงทางรถไฟ (Track maintenance) ในโครงสร้างลักษณะนี้มักจะถูกใช้กับการแก้ปัญหาด้านหินโรยทางเป็นส่วนใหญ่ [3] โดยชั้นหินโรยทางจะทำหน้าที่รับน้ำหนักของรถไฟผ่านจากหมอนรองราง (Sleeper) และกระจายลงอย่างสม่ำเสมอลงสู่ดินคันทาง (Subgrade) ต่อไป ดังนั้นเพื่อความสมบูรณ์และแข็งแรงของทางรถไฟ ชั้นหินโรยทางจะต้องมีขนาดคละที่เหมาะสม และปราศจากสิ่งเจือปน ดังนั้นความบกพร่องของชั้นหินโรยทางที่เกิดขึ้นนั้นสามารถนำไปสู่สภาพของหินสกปรก (Ballast fouling) ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของทางรถไฟลดลง ส่งผลโดยตรงต่อความปลอดภัยของการสัญจร และทำให้เกิดความล่าช้า อันเนื่องมาจากการลดความเร็วลงเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในช่วงเส้นทางที่เกิดปัญหา

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอรูปแบบขั้นตอนและวิธีการประเมินการล้างหิน (Ballast cleaning) อันเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป และวิธีที่การรถไฟแห่งประเทศไทยได้ทำการใช้งานต่อเนื่องมาหลายปีในอดีต แต่มีการใช้งานที่มีประสิทธิภาพจำกัด อันเกิดจากอุปสรรคหลายด้าน ซึ่งในอนาคตการพัฒนาหลักเกณฑ์การตรวจสอบและวิธีการล้างหินนั้น จะส่งผลถึงการวางแผนเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสำหรับวิธีการซ่อมบำรุงทางรถไฟที่มีมากขึ้นอีกด้วย

2. โครงสร้างทางรถไฟแบบหินโรยทาง

ทางรถไฟแบบหินโรยทางของการรถไฟแห่งประเทศไทยนั้น ในปัจจุบันเป็นทางเดี่ยว (Single track) ที่ก่อสร้างตามแบบมาตรฐานทางรถไฟ พ.ศ. 2525 ดังแสดงในรูปที่ 2 อันประกอบไปด้วย [4]

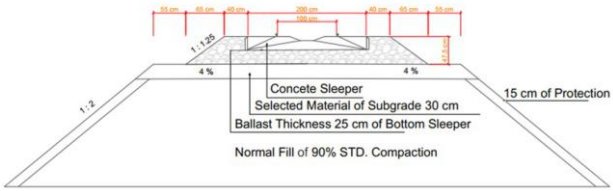
2.1 โครงสร้างทางส่วนบน (Superstructure)

เป็นโครงสร้างที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อกันอย่างเป็นระบบเพื่อใช้เป็นโครงสร้างหลักในการรับน้ำหนักจากรถไฟ โดยใช้วัสดุที่ผ่านควบคุมคุณ-สภาพการผลิตจากโรงงาน ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักได้แก่

1) รางรถไฟ (Rail) ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักจากรถไฟโดยตรงจากล้อและทำหน้าที่บังคับทิศทางการเคลื่อนที่ของรถไฟ
2) เครื่องยึดเหนี่ยวราง (Fastening system) เป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวรางรถไฟกับหมอนรองราง (Sleeper) เพื่อลดการเคลื่อนตัวของรางในทิศทางต่าง ๆ
3) หมอนรองราง (Sleeper) ทำหน้าที่รับแรงจากรางและกระจายตัวลงสู่หินโรยทาง อีกทั้งยึดเหนี่ยวโครงสร้างทางส่วนบนไว้กับหินโรยทาง

2.2 โครงสร้างทางรถไฟส่วนล่าง (Substructure)

เป็นโครงสร้างที่ทำหน้าที่เป็นฐานราก (Foundation) ให้กับโครงสร้างทางรถไฟส่วนบน และเป็นส่วนที่ทำการระบายน้ำออกจากทางรถไฟ อันประกอบไปด้วย หินโรยทาง (Ballast) และ ดินคันทาง (Subgrade) โดยทางรถไฟบางแห่งอาจจะมีการก่อสร้างชั้นรองหินโรยทาง (Subballast) เพิ่มเติมเพื่อเป็นการแยกชั้นระหว่างชั้นหินโรยทางและชั้นดินคันทางออกจากกันและทำหน้าที่ระบายน้ำ (Drainage path) ระหว่างกันอีกด้วย



รูปที่ 2 โครงสร้างทางรถไฟทางเดี่ยวของการรถไฟแห่งประเทศไทย

3. ความสกปรกของหินโรยทาง

ความสกปรกของหินโรยทางนั้นเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลทำให้ทางรถไฟเกิดความคลาดเคลื่อน (Deterioration) ทางเลขาคณิต ทำให้ประสิทธิภาพและความสมบูรณ์ของทางลดลง โดยทั่วไปความสกปรกของหินโรยทางนั้นเกิดจากปนเปื้อนจากส่วนละเอียด (Fine) ของการสึกหรอของหินโรยทาง (Degradation) สาเหตุเกิดจากหินโรยทางเกิดการแตกหักที่ผิวและเหลี่ยมมุม อันเนื่องมาจากแรงกดทับจากน้ำหนักของรถไฟ เหตุการณ์ดังกล่าวนี้เกิดขึ้นต่อเนื่องซ้ำไปซ้ำมาจากรอบน้ำหนักผ่านทาง (Cyclic rail loading) ทำให้การสึกหรอต่อเนื่องสะสมจนทำให้เกิดความสกปรกในที่สุด นอกจากนี้ยังมีส่วนละเอียดอื่นจากภายนอกเข้ามาด้วย เช่น ส่วนละเอียดจากชั้นดินทางเป็นต้น [5] ทั้งนี้หากการคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นสูงจนเกิดค่าพิกัดการใช้งานหรือค่าที่ยอมรับได้ จะส่งผลให้การซ่อมบำรุงทำได้ยากต่อไปในอนาคต

4. การประเมินความสกปรกหินสำหรับการล้างหิน

4.1 ดัชนีหินสกปรก

โดยทั่วไปการประเมินค่าความสกปรกของหินโรยทางนั้นนิยมใช้การพิจารณาร้อยละของส่วนละเอียดที่ปนเปื้อนในหินโรยทางเพื่อแบ่งประเภทความสกปรกในระดับต่าง ๆ โดยพิจารณาจากการปนเปื้อนของส่วนละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และตะแกรงเบอร์ 200 [6] นำมาคำนวณเป็นดัชนีหินสกปรก (Fouling Index, FI) ดังแสดงในสมการที่ (1) อันนำไปสู่การจำแนกความสกปรกของหินได้ตามดัชนีดังกล่าว ซึ่งสามารถสรุปได้ในตารางที่ 1

(1)

$$P_4 \qquad 4\ (4.75\quad .) \qquad P_{200}$$
$$200\ (0.075\quad .)$$

ตารางที่ 1 การจำแนกความสกปรกของหินด้วยค่าดัชนีหินสกปรก **[6]**

FI (%)	ระดับ
<1	สะอาด (Clean)
1 - < 10	ค่อนข้างสะอาด (Moderately clean)
10 - < 20	ค่อนข้างสกปรก (Moderately fouled)
20 – < 40	สกปรก (Fouled)
> 40	สกปรกมาก (Highly fouled)

4.2 การประเมินจากร้อยละผ่านตะแกรง

เนื่องด้วยการทำงานของเครื่องจักรที่ใช้ในการล้างหินนั้น จะเป็นการทำงานของมีดปาดหิน (Undercutter) เพื่อนำหินและสิ่งสกปรกในชั้นหิน-โรยทาง ส่งต่อไปยังตะแกรงที่ติดตั้งในเครื่องจักร เพื่อทำการร่อนสิ่งเจือปน (Wates) ออกไป และนำหินขนาดใหญ่กลับเข้ามาบรรจุกลับลงในชั้นทางดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การทำงานของมีดปาดหินใต้หมอนรองราง

ทั้งนี้การประมาณประสิทธิภาพ (Efficiency) ของการล้างหินนั้น จะประเมินจากการกระจายตัว (Gradation) จากหินที่กลับมาบรรจุ (Reclaim portion) หลังผ่านการร่อน (ล้าง) และสิ่งที่ถูกร่อนออกไป โดยการกำหนดขนาดของตะแกรงที่ใช้ในการพิจารณาขึ้นอยู่กับมาตรฐานของการทำงานของแต่ละประเทศ Chrismer et al. [7] ศึกษาสัดส่วนของหินโรยทางที่ผ่านการล้างหินด้วยเครื่องจักรโดยใช้การร่อนผ่านตะแกรงขนาด 3/4 นิ้ว (19 มม.) พบว่าส่วนละเอียด (Fine) ที่ลอดผ่านตะแกรงดังกล่าวมีค่าไม่เกิน 30% สำหรับข้อแนะนำของ European Rail Research Institute (ERRI) [8] กำหนดให้ใช้ตะแกรงขนาด 7/8 นิ้ว (22.4 มม.) เพื่อใช้เป็นเกณฑ์การพิจารณาสำหรับการล้างหินด้วยเครื่องจักร

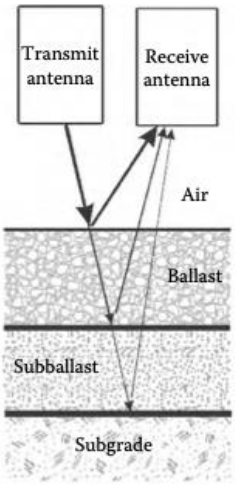
5. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

กิจกรรมการล้างหินด้วยเครื่องจักรนั้นเป็นกิจกรรมที่ดำเนินการโดยฝ่ายการช่างโยธา การรถไฟแห่งประเทศไทย โดยเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน อันได้แก่

- การสำรวจด้วยเรดาร์หยั่งลึก (Ground Penetrating Radar, GPR)
- การประเมินสภาพหินโรยทางก่อนและหลังการล้างหินด้วยเครื่องจักร

5.1 การสำรวจด้วยเรดาร์หยั่งลึก

การสำรวจด้วยวิธีนี้เป็นการสำรวจแบบไม่ทำลาย เพื่อให้ทราบถึงสภาพพื้นทางโดยคราว [9] [10] โดยเครื่องมือดังกล่าวจะทำการส่งพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) จากเสาอากาศ (Antenna) ลงสู่ชั้นพื้นทาง และรับการสะท้อนกลับของพลังงานดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 รูปแบบการส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ GPR [2]

โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อคลื่นสัญญาณนั้นได้แก่ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Dielectric permittivity) ความสามารถการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) และค่าคงตัวของสภาพยอมให้ซึมได้เชิงแม่เหล็ก (Magnetic permeability) ซึ่งค่าทั้งหมดนี้เป็นคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละวัสดุ

สำหรับเครื่องมือ GPR ที่ใช้ในการศึกษาจะใช้ความยาวคลื่นที่ 400 MHz ผ่านเสาอากาศจำนวน 3 เสา เพื่อใช้ในการรับส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยติดตั้งกับรถอเนกประสงค์ (อป.01) ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 โดยทำการสำรวจที่ความเร็วไม่เกิน 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงในเส้นทางสายเหนือระหว่างสถานีกรุงเทพ-เชียงใหม่เพื่อนำมาใช้ในการประเมินชั้นทางดังกล่าว



รูปที่ 5 รถอเนกประสงค์ (อป.01) ของการรถไฟแห่งประเทศไทย



รูปที่ 6 เสาอากาศ 400 MHz ที่ใช้ในการสำรวจของรถอเนกประสงค์

5.2 การประเมินสภาพหินโรยทางก่อนและหลังการล้างหินด้วยเครื่องจักร

ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการประเมินคุณสภาพของการล้างหินด้วยรถล้างหิน (บลน.01) ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยมีความสามารถในการทำงานดังสรุปในตารางที่ 2



รูปที่ 7 รถล้างหิน (บลน.01)

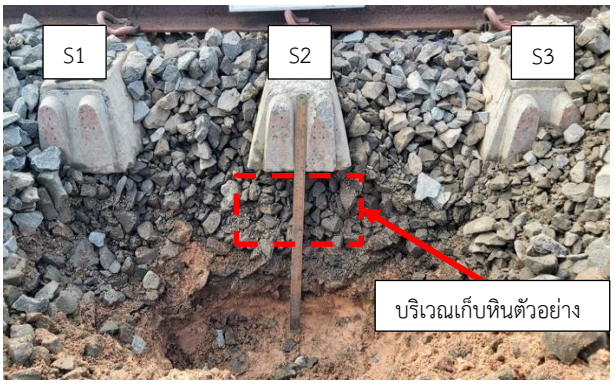
6. กรณีศึกษาการล้างหินด้วยเครื่องจักร

6.1 ตำแหน่งที่ใช้ในการศึกษาและการเก็บตัวอย่าง

กิจกรรมล้างหินของเส้นทางสายเหนือระหว่างสถานีพระแก้ว–สถานีบ้านภาชี ระหว่าง กม.ที่ 87-88 ภายในความรับผิดชอบของกองบำรุงทาง-เขตนครสวรรค์นำมาใช้เป็นกรณีศึกษา โดยเส้นทางดังกล่าวเป็นเส้นทางสายหลักที่ใช้ในการขนส่งสายเหนือที่มีปริมาณการใช้งานที่หนาแน่น โดยเส้นทางมีการซ่อมบำรุงด้วยการอัดหิน (Tamping) จำนวน 1 ครั้งต่อปี สำหรับตำแหน่งการเก็บตัวอย่างหินเพื่อนำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการนั้นจะกำหนดในระยะ 1 หมอนรองรางเว้น 1 หมอนรองราง เพื่อใช้เป็นการประเมินสภาพของหินก่อนและหลังกิจกรรมการล้างหินดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 8 และตารางที่ 3 ทั้งนี้การเก็บหินตัวอย่างจะเก็บที่ตำแหน่งใต้หมอนรองรางที่ได้การอัดหินเนื่องมาจากบริเวณดังกล่าวเป็นจุดที่หมอนรองรางจะกระจายแรงลงมามากที่สุด [11] [12]

ตารางที่ 2 ความสามารถของรถล้างหิน (บลน.01)

รายละเอียด	ข้อมูลทางเทคนิค
เครื่องยนต์	GM 2 จังหวะ, V-12 สูบ 350 แรงม้า ที่ 1,500 รอบต่อนาที
ความสามารถในการล้างหิน	90 เมตรต่อชั่วโมง (ความยาว)
ปริมาณหินที่ล้างได้	420 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง
ความเร็วรถขณะล้างหิน	1.5 เมตรต่อนาที
ความเร็วปกติ	50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
มิติตัวรถ	กว้าง 3.03 เมตร สูง 4.65 เมตร ยาว 23.24 เมตร
ประจำการเมื่อปี	2527



รูปที่ 8 การเก็บตัวอย่างหินใต้หมอนรองรางสำหรับประเมิน

ตารางที่ 3 ตำแหน่งของการเก็บตัวอย่างล้างหิน

ชื่อหมอนรองราง	กม.ของหมอนรองราง	ลักษณะตัวอย่าง
S1	87+810.0	ก่อนล้างหิน
S2	87+810.6	หลังล้างหิน
S3	87+812	ก่อนล้างหิน
S4	87+812.6	หลังล้างหิน
S5	87+813.2	ก่อนล้างหิน
S6	87+813.8	หลังล้างหิน

6.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อนำหินตัวอย่างนำมาทดสอบหาขนาดคละของหินโรยทาง (Sieve Analysis) ในห้องปฏิบัติการ (ดังแสดงในรูปที่ 9) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ขนาดคละที่ฝ่ายการช่างโยธา การรถไฟแห่งประเทศไทยกำหนดไว้ตามตารางที่ 4 ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของการล้างหินโรยทาง และการนำหินกลับลงสู่ทาง (Reclaim) ของรถล้างหินมีคุณภาพหรือลักษณะเช่นใด จากการทดสอบที่ได้พบว่าตัวอย่างหินก่อนกิจกรรมล้างหินนั้น มีการสูญเสียขนาดคละ (Degradation) ค่อนข้างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ของหินใหม่ (Fresh ballast) ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยตัวอย่างก่อนกิจกรรมล้างหินมีร้อยละผ่านตะแกรง 3/4 นิ้ว อยู่ในช่วง 48-54 % หากเทียบกับข้อแนะนำข้างต้น (30%) หินโรยทางดังกล่าวถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มีความจำเป็นต้องล้างหิน เพื่อลดสัดส่วนของกรวดละเอียด (Fine gravel) ออกไปจากทางรถไฟ และปรับขนาดคละของหินให้ใกล้เคียงกับเกณฑ์ที่กำหนด โดยเมื่อดำเนินการกิจกรรมล้างหินแล้วพบว่า สัดส่วนของหินที่เป็นกรวดหยาบ (Coarse gravel) อยู่ในช่วง 69-75% ดังนั้นการล้างหินดังกล่าวนั้นอยู่ในคุณภาพที่ยอมรับได้

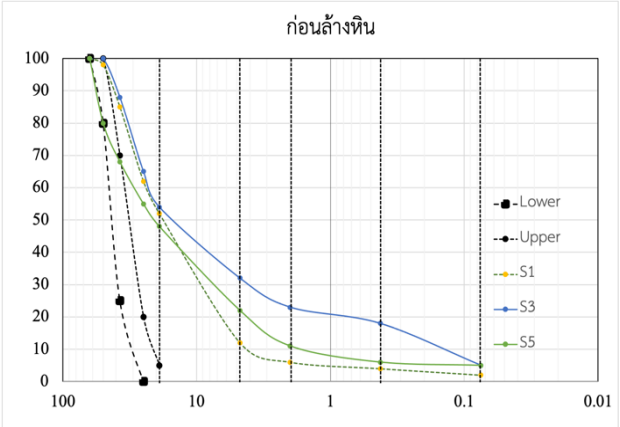




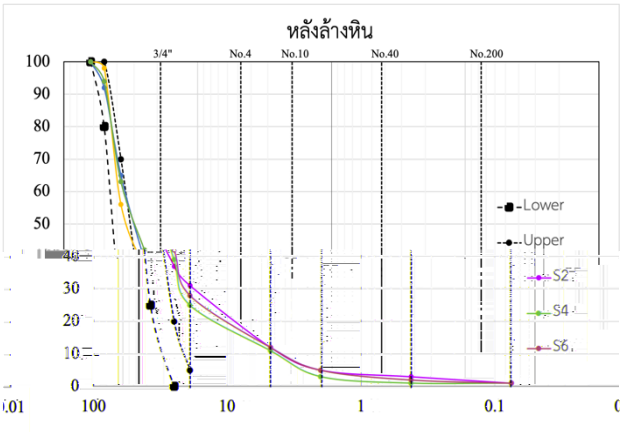
รูปที่ 9 หินตัวอย่างที่นำมาทดสอบหาขนาดคละก่อนและหลังล้างหิน

ตารางที่ 4 ขนาดคละของหินโรยทางของฝ่ายการช่างโยธา การรถไฟแห่งประเทศไทย

ขนาดตะแกรง (นิ้ว)	ร้อยละผ่านตะแกรงที่ยอมให้ (%)
2-1/2	100
2	80-100
1-1/2	25-70
1	0-20
3/4	0-5



รูปที่ 10 ขนาดคละของตัวอย่างหินโรยทางก่อนกิจกรรมล้างหิน



รูปที่ 11 ขนาดคละของตัวอย่างหินโรยทางหลังกิจกรรมล้างหิน

7. สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์การปฏิบัติงานของกิจกรรมล้างหินของทางรถไฟ ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่สำคัญต่อการซ่อมบำรุงทางรถไฟแบบใช้หินโรยทาง อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของเส้นทางรถไฟที่มีในอนาคต การวางแผนและปริมาณเครื่องจักรที่เหมาะสมกับการซ่อมบำรุงนั้นจำเป็นที่จะต้องมีความสัมพันธ์กันอย่างเหมาะสมกับเกณฑ์ที่กำหนด โดยที่เกณฑ์การพิจารณาหินสกปรกและการประเมินคุณภาพของการล้างหิน จำเป็นที่จะต้องสอดคล้องกับมาตรฐานของหินโรยทางอีกด้วย ในกรณีที่เครื่องจักรไม่สามารถทำการล้างหินได้ตามเกณฑ์ที่กำหนด อาจมีความจำเป็นที่จะต้องทำการล้างหินซ้ำ และเพิ่มอัตราความเร็วของเครื่องจักรให้สูงขึ้นเพื่อที่จะทำการล้างหินได้มีประสิทธิภาพ หรืออาจจะมีความจำเป็นที่ต้องทำการเพิ่มหินโรยทางใหม่เข้ามารวมด้วย ทั้งนี้จะต้องคำนวณประสิทธิภาพของการดำเนินกิจกรรม และความเหมาะสมในแต่ละวิธี จะส่งผลโดยตรงต่องบประมาณการซ่อมบำรุงและรอบการดำเนินงาน

ในอนาคตการศึกษาที่เกี่ยวข้องในด้านการซ่อมบำรุงวัสดุหินโรยทางอาจจะมีความเป็นที่จะต้องทำการศึกษารูปแบบการสึกหรอของหิน

(Abrasion) ในส่วนรูปร่างและเหลี่ยมมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของหิน ส่งผลถึงเสถียรภาพของคันทางมากน้อยเพียงใด เพื่อที่จะสามารถนำมากำหนดวิธีการซ่อมบำรุงได้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบคุณกองบำรุงทางเขตนครสวรรค์ ศูนย์บำรุง-ทางภาคเหนือ ฝ่ายการช่างโยธา การรถไฟแห่งประเทศไทยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าพื้นที่และประสานงานด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำไปสู่ผลการศึกษาในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] การรถไฟแห่งประเทศไทย (2561). *วารสารรถไฟสัมพันธ์*, ฉบับที่ 4

[2] Li., D., Hyslip., J., Sussmann., T. and Chrismer. S. (2016). Railway Geotechnics. CRC Press., Taylor & Francis Group.

[3] Indraratna, B., Salim, W. and Rujikiatkamjorn, C. (2011). *Advanced Rail Geotechnology-Ballasted Track*. CRC Press., Taylor & Francis Group.

[4] ธวัช จิ้วบุญชู และ พิษณุ พลกายนุวัตร (2564). กรณีศึกษาปรับปรุงโครงสร้างทางรถไฟส่วนล่างด้วยวัสดุเสริมกำลังทางปฐพี. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 26*, 23-25 มิถุนายน 2564, หน้า INF-12-1-8.

[5] Selig, E.T. and DelloRusso, V. (1991). *Sources and Causes of Ballast Fouling*. Bulletin No. 731., American Railway Engineering Association, 92, pp. 145-457.

[6] Selig E.T. and Waters J. (1994), *Track Geotechnology and Substructure Management*, Thomas Telford, USA.

[7] Chrismer, S.M., Selig, E.T. and Laine, K.J. (1992). *Investigation of Ballast Conditions Before and After Undercutting*., Report No. R-818., Association of American Railroads, Chicago, IL., USA.

[8] Esveld, C. (2014). *Modern Railway Track*., MRT-Products., Netherland.

[9] Sussmann, T.R., O'Hara, K.R., Kutrubes, D., Heyns, F.J. and Selig, E.T. (2001). Development of ground penetrating radar for railway infrastructure condition detection. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Denver, CO., USA.

[10] Eriksen, A., Venables, B., Gascoyne, J. and Bandyopadhyay, S. (2006). Benefits of High Speed GPR to manage tracked assets and renewal strategies. *Permanent Way Institute Conference Proceedings*, Brisbane, Australia.

[11] Shenton, M.J. (1975). Deformation of railway ballast under repeated loading conditions. In: Kerr (ed.): Railroad Track Mechanics and Technology. *Proceedings of a symposium held at Princeton University*, NJ., USA.

[12] Klassen, M.J., Clifton, A.W. and Watters, B.R. (1987). Track Evaluation and Ballast Performance Specifications. *Transportation Research Record,* 1131, PP. 35-44.