



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

กลไกการเสื่อมสภาพของโครงสร้างฐานรากของทางรถไฟ:

กรณีศึกษาของทางรถไฟสายเหนือ

Mechanism of railway sub-structure deterioration:

case study of Northern line

สยาม ยิ้มศิริ

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล

(งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2559A10802010

สัญญาเลขที่ 136/2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

กลไกการเสื่อมสภาพของโครงสร้างฐานรากของทางรถไฟ:

กรณีศึกษาของทางรถไฟสายเหนือ

Mechanism of railway sub-structure deterioration:

case study of Northern line

สยาม ยิ้มศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กันยายน 2559

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 136/2559 ขอขอบพระคุณ ดร. สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวณิช, ชนพงศ์ อนันต์วรปัญญา, และ วรฤทธิ ชะบังรัมย์ ที่ช่วยในการดำเนินงานวิจัยนี้

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาพฐานรากของทางรถไฟสายเหนือบริเวณสถานีแม่ตานน้อย อ.ห้างฉัตร จ.ลำปาง โดยเก็บตัวอย่างวัสดุฐานรากที่จุดต่างๆของหน้าตัดแล้วทำการจำแนกเป็น coarse aggregate, coarse fouling, และ fine fouling เพื่อนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการดังนี้ sieve analysis, hydrometer, specific gravity, water absorption, Los Angeles abrasion, aggregate compression value, aggregate impact value, flat and elongation, sulfate soundness, Atterberg limit, และ scanning electron microscopy นอกจากนี้ยังทำการทดสอบในสนามที่จุดต่างๆของหน้าตัดดังนี้ unit weight และ water content ผลการทดสอบแสดงถึงสภาพฐานรากของทางรถไฟและได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานทางรถไฟของประเทศสหรัฐอเมริกา ผลการทดสอบได้ใช้ในการวิเคราะห์การปนเปื้อนของหินโรยทางด้วยทฤษฎีต่างๆเพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงปริมาณของความเหมาะสมในการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ส่วนประกอบของวัสดุปนเปื้อนเพื่อศึกษากลไกการเสื่อมสภาพของฐานรากของทางรถไฟ

ABSTRACT

This research investigates conditions of railway substructures at Mae Tarn Noi Station, Hangchat District, Lampang Province. The specimens are collected from railway substructure at several points in a cross-section. The specimens are subjected to laboratory tests as follows: sieve analysis, hydrometer, specific gravity, water absorption, Los Angeles abrasion, aggregate compression value, aggregate impact value, flat and elongation, sulfate soundness, Atterberg limit, and scanning electron microscopy. In-situ tests, i.e. unit weight and water content, are also performed at these locations in a cross-section. Test results indicate substructure conditions of Northern line railway and they are compared with AREMA standard. The results are employed to analyze ballast fouling characteristics by various theories to obtain quantitative indexes of the quality of ballast. Moreover, fouling materials are investigated to reveal the mechanism of railway sub-structure deterioration.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ	ii
สารบัญ	iii
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาของปัญหา	1-1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1-2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	1-2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1-2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ส่วนประกอบโครงสร้างทางรถไฟ	2-1
2.1.1 รางรถไฟ (Rail)	2-1
2.1.2 ระบบยึดจับรางรถไฟ (Fastening System)	2-3
2.1.3 หมอนรองรางรถไฟ	2-3
2.1.4 หินโรยทาง (Ballast)	2-5
2.1.5 ชั้นรองหินโรยทาง (Sub-Ballast)	2-6
2.1.6 ดินเดิมหรือดินถม (Sub-Grade)	2-6
2.1.7 ระบบการระบายน้ำ (Drainage)	2-7
2.2 คุณสมบัติของหินโรยทาง	2-7
2.2.1 การทดสอบคุณสมบัติความคงทนของอนุภาค	2-7
2.2.2 การทดสอบรูปร่าง Shape Tests	2-8
2.2.3 การหาขนาดคละ	2-8
2.2.4 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	2-9
2.2.5 การทดสอบความต้านทานซัลเฟต (Sulfate soundness)	2-9
2.2.6 การทดสอบด้านอื่นๆ	2-9
2.2.7 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ	2-10
2.3 Ballast Fouling	2-11
2.3.1 สาเหตุ	2-11
2.3.2 ผลกระทบจากการปนเปื้อน	2-15
2.3.3 การลดค่าการปนเปื้อน	2-15

2.3.4	ค่าการปนเปื้อน	2-15
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2-17
2.4.1	การศึกษาการปนเปื้อนของหินโรยทางในอเมริกาเหนือ	2-17
2.4.2	การศึกษาการปนเปื้อนของหินโรยทางในแถบยุโรป	2-18
2.4.3	การศึกษาความเสียหายจากการซ่อมแซมชั้นหินโรยทาง	2-19

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานและแผนการทดลอง

3.1	สถานที่การเก็บตัวอย่าง	3-1
3.2	การเก็บตัวอย่างและการทดสอบในสนาม	3-2
3.3	การทดสอบในห้องปฏิบัติการ	3-3

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1	ผลการทดสอบภาคสนาม	4-1
4.1.1	ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของดินในสนาม	4-1
4.1.2	ผลการทดสอบหาความชื้นของดินในสนาม	4-1
4.1.3	ลักษณะทางกายภาพของทางรถไฟที่หน้าตัด	4-1
4.2	ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	4-2
4.2.1	การทดสอบ New Ballast	4-2
4.2.2	ผลการทดสอบ sieve analysis	4-2
4.2.3	ผลการทดสอบ Rock Type	4-3
4.2.4	ผลการทดสอบ Visual inspection	4-4
4.2.5	ผลการทดสอบค่า Specific gravity	4-5
4.2.6	ผลการทดสอบ Water Absorption	4-6
4.2.7	ผลการทดสอบ Atterberg limit	4-6
4.2.8	ผลการทดสอบ Flat & Elongation	4-7
4.2.9	ผลการทดสอบ Scanning Electron Microscopy (SEM)	4-7
4.2.10	ผลการทดสอบ Hydrometer	4-8
4.2.11	ผลการทดสอบ Los Angles abrasion	4-9
4.2.12	ผลของการทดสอบ Aggregate Compression Value (ACV)	4-10
4.2.13	ผลของการทดสอบ Aggregate Impact Value (AIV)	4-10
4.2.14	ผลการทดลอง Sulfate soundness	4-10
4.3	การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐาน	4-11
4.3.1	การเปรียบเทียบกับ Specification for track ballast ของประเทศอินเดีย	4-11

4.3.2	การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบกับมาตรฐานของ Australian rail track	4-13
4.3.3	การเปรียบเทียบผลที่ได้กับค่ามาตรฐานของ American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association (AREMA)	4-15
4.3.4	สรุปผลการเปรียบเทียบ	4-17
4.4	การวิเคราะห์การปนเปื้อน	4-17

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารอ้างอิง	R-1
ผลผลิต	
ประวัตินักวิจัย	

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาของปัญหา

เนื่องจากการขนส่งทางรางเป็นระบบการขนส่งทางบกที่มีความประหยัดและมีความปลอดภัยที่สุดเมื่อคิดการขนส่งในจำนวนเท่ากัน (ตารางที่ 1-1) เช่น การใช้การใช้รถไฟขนส่งสินค้าจะประหยัดกว่ารถบรรทุก 3.5-4.5 เท่า หรือ การใช้รถไฟขนส่งผู้โดยสารจะประหยัดพลังงานมากกว่าการใช้รถโดยสารสาธารณะและรถโดยสารส่วนบุคคล 1.7-2.0 เท่า และ 5 เท่าตามลำดับ นอกจากนี้ระบบการขนส่งทางรางที่เป็นรถไฟฟ้ายังสามารถใช้พลังงานไฟฟ้าที่มาจากต้นกำเนิดอื่น เช่น ถ่านหิน, ก๊าซธรรมชาติ, และพลังงานนิวเคลียร์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้การขนส่งทางรางจึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าระบบการขนส่งรูปแบบอื่นๆ และนอกจากนี้ระบบการขนส่งทางรางยังใช้ที่ดินเพื่อการก่อสร้างน้อยกว่าระบบขนส่งทางอื่นๆ จึงใช้ทรัพยากรที่ดินน้อยกว่า

ตารางที่ 1-1 การใช้พลังงานของระบบขนส่งทางบกต่างๆ (Japanese ministry of transport, 1996)

	รถไฟ	รถเมล์	เครื่องบิน	รถยนต์ส่วนบุคคล
ดัชนีการใช้พลังงานเปรียบเทียบ	100	176	409	578
การปลดปล่อย CO ₂ เปรียบเทียบ	100	413	643	946

จากความสำคัญของการขนส่งระบบรางและมีแผนการก่อสร้างระบบรางเป็นจำนวนมากในอนาคตจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงการก่อสร้างโครงสร้างทางรถไฟที่เหมาะสมเพื่อความปลอดภัยในการก่อสร้างทางรถไฟและการบำรุงรักษารวมทั้งความปลอดภัยในการใช้งาน ในปัจจุบันการก่อสร้างและการบำรุงรักษาทางรถไฟในประเทศไทยยังกระทำโดยอาศัยประสบการณ์เป็นหลักและยังไม่ใช้การวิเคราะห์ทางวิชาการและการตัดสินใจเชิงปริมาณประกอบกับความเข้าใจโลกในการเชื่อมสภาพของทางรถไฟยังมีอยู่อย่างจำกัดจึงทำให้ต้องมีการบำรุงรักษาคันทางอยู่บ่อยครั้งและยังทำให้รถไฟไม่สามารถวิ่งด้วยความเร็วที่ออกแบบไว้ ดังจะเห็นได้จากสถิติรถไฟตกรางเป็นจำนวนมาก เช่น ในปี พ.ศ. 2555 เกิดเหตุรถไฟตกราง 89 ครั้ง และ 8 เดือนแรกในปี พ.ศ. 2556 รถไฟตกราง 113 ครั้ง จนทำให้ต้องปิดซ่อมครั้งใหญ่ทางรถไฟสายเหนือจากสถานีสีลาอาสน์ จ. อุตรดิตถ์ จนถึงสถานีเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ ระหว่างวันที่ 15 กันยายน จนถึง วันที่ 30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2556

เพื่อความปลอดภัยและเพื่อให้รถไฟใช้ความเร็วได้ตามที่มีการออกแบบไว้ ทางรถไฟต้องถูกซ่อมบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง โดยหินโรยทาง (Ballast) เป็นส่วนประกอบที่มีสำคัญของระบบรางรถไฟทำหน้าที่รับแรงที่กระทำกับหมอนรองราง (Sleeper), ให้ช่องว่างขนาดใหญ่สำหรับการระบายน้ำ, และลดเสียงรบกวน หากช่องว่างในหินโรยทางถูกเติมเต็มด้วยอนุภาคละเอียดจะเกิดการปนเปื้อน (Foul) และจะทำให้หินโรยทาง (Ballast) สูญเสียหน้าที่ ดังนั้นการบำรุงรักษาหินโรยทางให้อยู่ในสภาพดีจึงสำคัญมากเพื่อให้แน่ใจว่าทางรถไฟจะสามารถทำงานได้ดีหินโรยทางจะต้องถูกตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอและมีการปรับปรุงตามตารางเวลาเพื่อให้แน่ใจถึงความปลอดภัยในการใช้งานของทางรถไฟ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้คือการศึกษากลไกและสาเหตุของการเสื่อมสภาพของหินโรยทางที่ใช้ในทางรถไฟสายเหนือว่าเกิดจากสาเหตุใดเป็นสาเหตุหลักในการเสื่อมสภาพของวัสดุรองทางรถไฟ ซึ่งการศึกษานี้จะเป็นส่วนช่วยในการออกแบบโครงสร้างทางรถไฟและช่วยกำหนดคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ เพื่อให้การก่อสร้างและการบำรุงรักษาทางรถไฟมีความประหยัดขึ้นและเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการเดินทาง โดยมีจุดประสงค์หลักสามารถจำแนกเป็นข้อๆดังนี้

- สำรวจและทดสอบในสนามเพื่อวิเคราะห์สภาพทางรถไฟ
- ทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมและกายภาพของหินโรยทางใหม่
- ทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมและกายภาพของหินโรยทางที่ใช้งานแล้ว
- ทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมและกายภาพของวัสดุที่ปนเปื้อนในหินโรยทางที่ใช้งานแล้ว
- วิเคราะห์กลไกการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

การศึกษาของโครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นความสนใจไปที่วัสดุหินโรยทาง (Ballast) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของโครงสร้างทางรถไฟ โดยจะดำเนินการศึกษาเส้นทางรถไฟสายเหนือบริเวณสถานีแม่ตานน้อย อำเภอห้างฉัตร จังหวัดลำปาง (รูปที่ 1-1) การศึกษานี้ประกอบด้วยการสำรวจและการตรวจสอบในสนาม และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 1-1 รูปแสดงสถานที่ทดสอบ

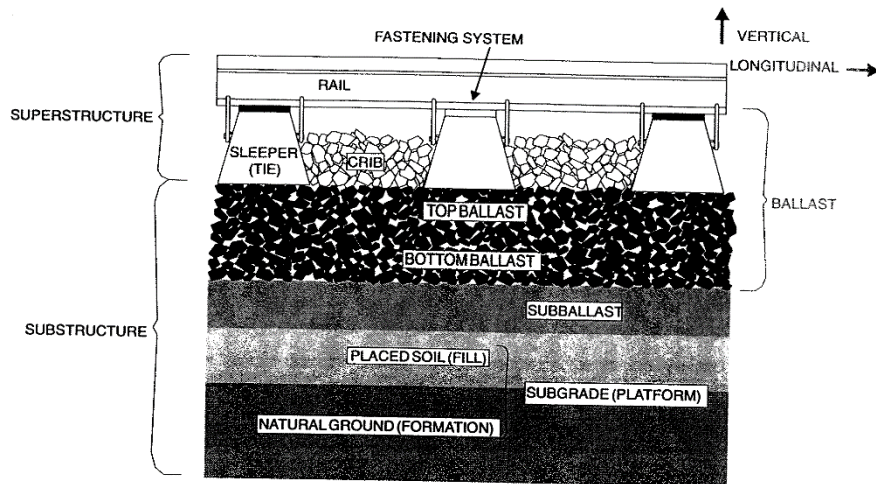
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับคือหาสาเหตุการเสื่อมสภาพของหินโรยทางในทางรถไฟสายเหนือว่าเกิดจากสาเหตุใดเป็นหลักและสาเหตุรอง รวมถึงแนวทางการแก้ไขและปรับปรุงคุณภาพของหินโรยทางให้สอดคล้องกับการใช้งาน เป็นต้น

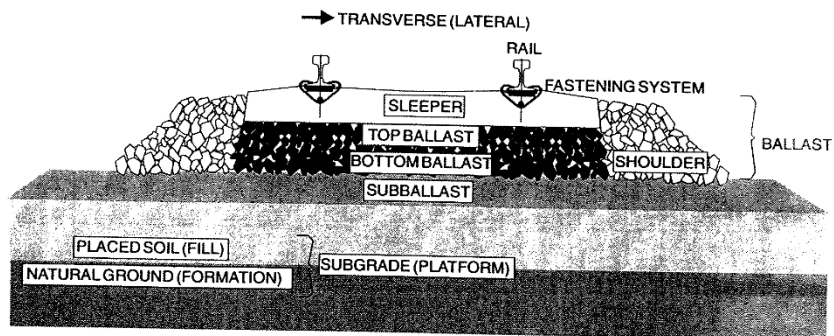
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ส่วนประกอบโครงสร้างทางรถไฟ

ส่วนประกอบของโครงสร้างทางรถไฟได้แสดงในรูปที่ 2-1 และ 2-2 โดยแต่ละส่วนจะอธิบายอย่างละเอียดดังนี้



รูปที่ 2-1 รูปตัดตามยาวทางรถไฟ (Selig & Waters, 1994)



รูปที่ 2-2 รูปตัดขวางทางรถไฟ (Selig & Waters, 1994)

2.1.1 รางรถไฟ (Rail)

รางรถไฟ คือ ชิ้นส่วนหลักตามแนวยาว เป็นตัวนำทางของล้อรถไฟเพื่อให้มีความราบเรียบและต่อเนื่อง ชิ้นส่วนเหล่านี้มีความแข็งแรงรับน้ำหนักเหมือนกับคานเพื่อทำการถ่ายน้ำหนักจากล้อลงไปสู่หมอนเพื่อไม่ให้เกิดการแอ่นตัวมากเกินไประหว่างจุดรองรับ ขนาดความกว้างรางรถไฟ (rail gauge หรือ track gauge) คือ ระยะห่างของรางรถไฟโดยวัดจากหัวรางด้านในข้างซ้ายถึงหัวรางด้านในข้างขวา สแตนดาร์ดเกจ (standard gauge) เป็นชื่อของขนาดความกว้างรางที่นิยมใช้มากที่สุดทั่วโลก (โดยประมาณ 60% ของรางรถไฟทั้งหมด) มี

ขนาด 1.435 เมตร ประเทศไทยวางรถไฟส่วนใหญ่มีขนาดความกว้างที่เรียกว่ามีเตอร์เกจที่มีขนาดความกว้าง 1.000 เมตร ซึ่งมีแผนการจะพัฒนาปรับปรุงเพื่อใช้สำหรับรถไฟความเร็วสูง ประเภทของรางรถไฟมีดังนี้

a) รางแคบ (Narrow gauge)

เป็นรางรถไฟที่มีความกว้างของรางน้อยกว่า 1.435 เมตร ได้แก่

- สก็อตต์ เกจ (Scotch gauge) ขนาดความกว้างราง 1.372 เมตร (4 ฟุต 6 นิ้ว)
- เคป เกจ (Cape gauge) ขนาดความกว้างราง 1.067 เมตร (3 ฟุต 6 นิ้ว)
- มีเตอร์ เกจ (Meter gauge) ขนาดความกว้างราง 1.000 เมตร

b) รางมาตรฐาน (Standard gauge)

เป็นรางขนาด 1.435 เมตร ซึ่งนิยมใช้มากที่สุด เรียกมาตรฐานรางกว้างขนาดนี้ว่า Standard Gauge บางครั้งเรียกว่า European Standard Gauge (ESG.) เป็นรางรถไฟที่กำหนดเป็นมาตรฐานตามกลุ่มในประเทศยุโรป การใช้รางขนาดนี้คิดเป็นหลักสลิปเปอร์เซ็นต์ของรถไฟโลก

c) รางกว้าง (Broad gauge)

เป็นรางที่มีขนาดความกว้างมากกว่า 1.435 เมตรขึ้นไป เช่น

- อินเดีย เกจ (Indian gauge) 1.676 เมตร
- ไอเบอเรียน เกจ (Iberian gauge) 1.668 เมตร
- ไอร์แลนด์ เกจ (Irish gauge) 1.600 เมตร
- รัสเซีย เกจ (Russian gauge) 1.520 เมตร

d) รางรถไฟรางร่วม

รางรถไฟรางผสม (mixed-gauge) หรือ รางรถไฟรางร่วม (dual-gauge) เป็นการทำรางรถไฟเพื่อให้รถไฟที่ต้องการความกว้างของราง 2 ระบบ สามารถใช้แนวเส้นทางเดิมได้ โดยวางรางเสริมเข้ากับรางระบบเดิม จึงได้ราง 2 ระบบในแนวรางเดิม ซึ่งปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มีระบบรางรถไฟรางร่วม

การพัฒนาทางรถไฟในประเทศไทยเริ่มตั้งแต่สมัยรัชกาลที่ 5 โดยได้มีการสร้างทางรถไฟขนาด 1.435 เมตร ในบริเวณตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยาในรางสายเหนือ โดยไม่ใช้ขนาดเดียวกับประเทศเพื่อนบ้านเพื่อหลบเลี่ยงจากการรุกรานเป็นอาณานิคม และต่อมาได้มีการสร้างรางเพิ่มฝั่งตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยาได้สร้างขนาด 1.000 เมตร ซึ่งเป็นรางรถไฟสายใต้ในปัจจุบัน

รางรถไฟ 1.000 เมตร (มีเตอร์เกจ)

- รางรถไฟของการรถไฟแห่งประเทศไทย ขนาด 1 เมตร หรือ Meter Gauge

- รถไฟหลวง สถานีรถไฟกรุงเทพ - สถานีรถไฟนครราชสีมา (ในอดีตมีขนาด 1.435 เมตร)

รางรถไฟ 1.435 เมตร (สแตนดาร์ดเกจ)

- รถไฟฟ้ามหานคร
- รถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ
- รถไฟฟ้า บีทีเอสรางรถไฟรางแคบขนาด 0.700 เมตร
- ทางรถไฟสายหาดเจ้าสำราญ (เป็นรถไฟชั้นเจ้านาย ปัจจุบันเป็นทางหลวงแผ่นดิน หมายเลข 3177 เพชรบุรี-หาดเจ้าสำราญ) แต่ในปัจจุบันไม่มีการใช้งานแล้ว

2.1.2 ระบบยึดจับรางรถไฟ (Fastening System)

เป็นสิ่งที่ใช้ยึดเชื่อมต่อระหว่างหมอนรองรางรถไฟและรางรถไฟ จุดประสงค์ของระบบยึดจับนั้น คือการยึดรางติดกับหมอนรองรางรถไฟ, ต้านการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและในแนวนอน, การเคลื่อนที่ตามยาว, และการพลิกคว่ำของรางรถไฟ ระบบแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ต่าง ๆ นั้นมาจากล้อของรถไฟและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของรางรถไฟ ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติการใช้งานหลักของระบบยึดจับรางรถไฟรวมถึงข้อแตกต่างระหว่างระบบไม้และระบบคอนกรีต

หมอนรองแบบไม้ ต้องการแผ่นเหล็กรองเพื่อที่จะกระจายแรงที่กระทำจากรางลงสู่ผิวไม้ ทำให้ไม้สามารถรับแรงแบกทานที่เหมาะสมและป้องกันไม้จากการทำลายเชิงกล ในการใส่แผ่นเหล็กนี้เพื่อช่วยการยึดจับ ในการยึดรั้งการเคลื่อนที่ด้านข้างด้วยการใช้แรงเสียดทานและการยกพื้นลาดเอียงเป็นการพัฒนาเพื่อช่วยเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างล้อกับรางรถไฟในการเข้าโค้ง การตอกตะปูในการยึดจับปกติจะใช้ในแถบอเมริกาเหนือเพื่อยึดแผ่นเหล็กไม่ให้เคลื่อนที่ในแนวราบ ตัวแผ่นเหล็กจะมีส่วนที่เกินออกมาเพื่อใช้ด้านการเคลื่อนที่ด้านข้างของรางรถไฟ แผ่นรองยึดหยุ่นจะไม่ถูกนำมาใช้ในหมอนรองชนิดไม้เนื่องจากตัวหมอนรองแบบนี้ไม่มีความยึดหยุ่นในตัว

หมอนรองชนิดคอนกรีต มีการยึดรั้ง ในแนวตั้ง, แนวยาว, และด้านข้าง ระบบยึดจับนี้ยังป้องกันการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าจากวงจรการส่งสัญญาณไปสู่หมอนรองรางรถไฟหรือรางรถไฟ แผ่นรองจะต้องอยู่ระหว่างรางรถไฟกับหมอนรองรางรถไฟชนิดคอนกรีตเพื่อให้มีหน้าที่ดังนี้

- เพื่อให้ความยึดหยุ่นระหว่างระบบรางรถไฟกับหมอนรองรางรถไฟแบบคอนกรีต
- เพื่อลดการสั่นสะเทือนของล้อรถไฟ
- เพื่อป้องกันหรือลดการกัดสีของผิวสัมผัสรางรถไฟกับหมอนรองรางชนิดคอนกรีต
- เพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าจากวงจรการส่งสัญญาณของทางรถไฟ

2.1.3 หมอนรองรางรถไฟ

หมอนรองราง (railroad sleeper หรือ railroad tie) เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้ยึดจับรางรถไฟให้อยู่กับที่ ช่วยให้ขอบรางทั้งสองเส้นมีระยะที่เท่ากันและช่วยถ่ายเทน้ำหนักลงสู่หินหรือวัสดุรองราง หมอนรองรางรถไฟ

นิยมทำจากไม้เนื้อแข็งหรือคอนกรีตอัดแรง ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหมอนรองรางที่จะนำมาใช้ ต้องได้รับการทดสอบทั้งในด้านความทนทานต่อการกดตันตลอดจนความต้านทานไฟฟ้าที่อาจจะลัดวงจรจากรางเส้นหนึ่งไปหาอีกเส้นหนึ่งได้เพื่อให้สามารถใช้ระบบวงจรไฟฟ้า (track circuit) ได้โดยไม่มีปัญหาขัดข้อง

a) หมอนรองรางชนิดไม้

หมอนไม้ ทำจากไม้เนื้อแข็ง (เช่น ไม้เต็ง ไม้มะค่า ฯลฯ) หรือไม้เนื้ออ่อนชนิดแข็งอาบน้ำยาครีโอโซต (creosote) หรือโบรอนเพื่อกันปลวกแมลงแทะ ถูกนำมาใช้รองรางรถไฟตั้งแต่ในอดีตมาจนถึงปัจจุบัน หมอนไม้มีข้อดี คือ มีความแข็งแรงพอที่จะถ่ายน้ำหนักขบวนรถลงสู่หินรองราง ตลอดจนมีความอ่อนตัวต่อแรงกระแทก นอกจากนี้ความที่ไม้เป็นฉนวนไฟฟ้าก็ทำให้สามารถวางวงจรไฟฟ้าสำหรับติดตามขบวนรถเมื่อขบวนรถผ่านจะทำให้วงจรต่อครบจะแสดงผลออกทางฝั่งบรรยายทางวงจรชนิดนี้เรียกว่าวงจรไฟตอน ลักษณะของหมอนไม้ได้แสดงในรูปที่ 2-3

อย่างไรก็ตาม ข้อเสียที่สำคัญของหมอนไม้คือผุง่าย และเมื่อใช้ไปนานๆจากรองรางจะกินลึกเข้าไปในเนื้อไม้ทำให้ระดับสันรางทรุดตัวลงต้องเปลี่ยนใหม่ นอกจากนี้ตะปูยึดรางเมื่อได้รับแรงโยกคลอนของขบวนรถที่วิ่งผ่านมากๆเข้าก็ทำให้ตะปูหลุด ต้องย้ายไปตอกตำแหน่งใหม่หรือแม้แต่เปลี่ยนหมอน ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการใช้หมอนคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นซึ่งนอกจากจะทนทานกว่าแล้วก็ยังสามารถรับความเร็วขบวนรถที่เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

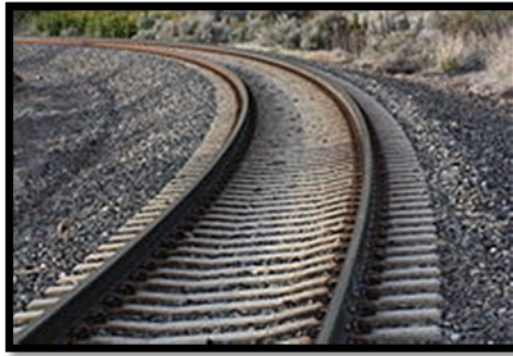


รูปที่ 2-3 ลักษณะหมอนไม้ (จาก “หมอนรองรางรถไฟ”)

b) หมอนรองรางชนิดคอนกรีตอัดแรง

ด้วยปัญหาที่มีในหมอนไม้แบบเดิมที่มีมากและการสงวนพื้นที่ป่าไม้ จึงทำให้มีการพัฒนาหมอนรองรางที่ทำด้วยคอนกรีตอัดแรงใส่โครงเหล็กไว้ภายใน ซึ่งมีราคาถูกกว่าไม้และรองรับแรงที่กระทำต่อเพลามากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นการใช้หมอนคอนกรีตอัดแรงกับรางเชื่อมยาวก็ยังสามารถทำให้ความเร็วขบวนรถมีมาก และลดเสียงรบกวนจากการดั่งของรางได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามหมอนคอนกรีตต้องติดตั้งกับหินรองทางที่โรยอย่างหนาและคันทางที่อัดแน่นอย่างดีจึงจะเกิดประสิทธิภาพในการใช้งานสูงสุด

ความคิดเรื่องหมอนคอนกรีตอัดแรงมีมาตั้งแต่ พ.ศ.2420 โดยได้มีการคิดค้นหมอนรองรางที่ทำจากคอนกรีตขึ้น กระนั้นก็ยังไม่ใช่ที่แพร่หลายนักจนสงครามโลกครั้งที่สองซึ่งไม่หาได้ยากขึ้น ทำให้เกิดการพัฒนาหมอนคอนกรีตในยุโรป เมื่อยิ่งเพิ่มน้ำหนักของรางและเชื่อมความยาวรางให้ติดกันมากขึ้นเท่าใด การผลิตหมอนก็ต้องทำให้มีคุณภาพดีมากขึ้นเท่านั้น ในปัจจุบันหมอนคอนกรีตมีการใช้แพร่หลายกันในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทย ลักษณะของหมอนคอนกรีตได้แสดงในรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 ลักษณะหมอนคอนกรีต (จาก “หมอนรองรางรถไฟ”)

2.1.4 หินโรยทาง (Ballast)

คือวัสดุที่ใช้โรยทางและทำการบดอัดในชั้นบนสุดของโครงสร้างฐานรากซึ่งอยู่ใต้หมอนรองรางรถไฟ โดยปกติแล้วหินที่มีความแข็ง, มีเหลี่ยมมุม, และมีความต้านทานต่อการขัดสีนี้เป็นองค์ประกอบที่จะช่วยให้เป็นทางรถไฟเป็นทางที่สมบูรณ์แบบ เรื่องที่กล่าวมานี้เป็นเรื่องซับซ้อนที่ยังมีการวิจัยอยู่จากความพร้อมของทางเศรษฐกิจ, การเงิน, ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกวัสดุบัลลาสต์ ดังนั้นความหลากหลายของวัสดุต่างๆที่ถูกนำมาใช้เป็นบัลลาสต์ เช่น หินแกรนิต หินบะซอล หินปูน เศษหินและกรวด จึงทำให้มีคุณภาพที่แตกต่างกัน โดยบัลลาสต์อาจแบ่งย่อยออกเป็น 4 หมวดดังนี้

- Crib คือ วัสดุที่อยู่ระหว่างหมอนรองรางรถไฟ
- Shoulder คือ วัสดุที่อยู่นอกปลายของหมอนรองรางรถไฟใต้ชั้นบัลลาสต์
- Top ballast คือ ส่วนบนที่รองรับชั้นบัลลาสต์ ซึ่งไม่ถูกรบกวนโดยการซ่อมแซมชั้นบัลลาสต์ tamping
- Bottom ballast คือ ส่วนล่างของชั้นที่รองรับชั้นบัลลาสต์ ซึ่งไม่ถูกรบกวนโดยการซ่อมแซมชั้นบัลลาสต์ และตามธรรมชาติส่วนนี้จะเป็นส่วนที่มีการปนเปื้อน (fouled)

บัลลาสต์มีหน้าที่ดังนี้

- ต้านทานแรงในแนวตั้ง, แนวนอน, และตามยาว จากหมอนรองรางรถไฟเพื่อรักษาทางรถไฟให้อยู่ในตำแหน่งเดิม
- ให้ความยืดหยุ่นและซึมซับพลังงานจากรางรถไฟ
- ให้ช่องว่างขนาดใหญ่เพื่อเก็บวัสดุที่ปนเปื้อนในบัลลาสต์ และเคลื่อนย้ายอนุภาคผ่านชั้นบัลลาสต์
- ทำให้ง่ายในการบำรุงรักษาผิวหน้า และขั้นตอนการดำเนินการซ่อมแซมชั้นบัลลาสต์ (tamping)

- ช่วยให้เกิดการระบายน้ำในทันที เมื่อมีน้ำขังอยู่บนรางรถไฟ
- ลดแรงแบกทานจากไม้หมอน เพื่อให้มีค่าความเค้นที่ยอมให้ของวัสดุชั้นถัดลงไป แม้ว่าค่าความเครียดจะลดลงโดยการเพิ่มความหนาของชั้นบัลลาสต์ ถึงกระนั้นชั้นที่รองรับบัลลาสต์จะต้องมีอนุภาคที่มีความคงทนและสัมพันธ์กับความเครียดสูงตามไปด้วย
- ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช โดยให้มีชั้นปกคลุมที่ไม่เหมาะต่อการเจริญเติบโตของพืช
- ดูดซับเสียงในอากาศ
- ให้มีความต้านทานไฟฟ้าเพียงพอระหว่างรางรถไฟ

2.1.5 ชั้นรองหินโรยทาง (Sub-Ballast)

คือ ชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นบัลลาสต์และชั้นดินเดิม มีหน้าที่ ดังนี้

- ลดค่าความเครียดบริเวณใต้ชั้นบัลลาสต์ที่เกิดจากการใช้งาน ให้อยู่ในระดับที่ชั้นดินเดิมสามารถรับได้
- ขยายการป้องกันการแข็งตัวของน้ำในชั้น Sub grade
- ป้องกันการแทรกซึมของดินเดิมและบัลลาสต์
- ป้องกันการเคลื่อนย้ายของวัสดุที่มีความละเอียดเล็ดรอดออกมาจากชั้นดินเดิม
- ป้องกันการสึกกร่อนของบัลลาสต์ จะเกิดเมื่อมีน้ำ ซึ่งจะนำไปสู่การสลาย และการป้องกันต้นเหตุของการเกิด pumping นี้คือปัญหาหลักของชั้นดินเดิมที่แก้ไขได้ยาก
- ระบายน้ำจากบัลลาสต์และชั้นดินเดิมไหลไปสู่คูน้ำด้านข้างของทางรถไฟ
- ยอมให้มีการระบายของน้ำขึ้นมาจากชั้นดินเดิม นี่คือฟังก์ชันที่สำคัญที่สุดในประสิทธิภาพของบัลลาสต์ที่นำพึงพอใจ

2.1.6 ดินเดิมหรือดินถม (Sub-Grade)

คือฐานที่ใช้รองรับการสร้างโครงสร้างทางรถไฟเพื่อให้ฐานรากมีเสถียรภาพ โดยอิทธิพลจากค่าความเครียดที่เกิดจากการใช้งานจะขยายตัวลึกลงถึง 5 เมตรใต้หมอนรองรางรถไฟเกินความลึกของบัลลาสต์ และชั้นรองบัลลาสต์ ด้วยเหตุนี้ชั้นดินเดิมจึงเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากในโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของทางรถไฟและการบำรุงรักษา สำหรับตัวอย่างดินเดิมคือส่วนประกอบหลักที่มีความยืดหยุ่นในการรองรับโครงสร้างขนาดใหญ่ และด้วยเหตุนี้มีส่วนอย่างมากในการโก่งตัวในช่วงอิลาสติกของรางรถไฟ ภายใต้น้ำหนักจากล้อ การเพิ่มความหนาของชั้นดินเดิมเชื่อว่ามีผลต่อการเสื่อมสภาพของบัลลาสต์, รางรถไฟ, และหมอนรองรางรถไฟ ชั้นดินเดิมนี้เป็นสาเหตุการทรุดตัวของรางที่แตกต่างกัน ชั้นดินเดิมนี้อาจแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ ชั้นดินเดิมที่มีตามธรรมชาติและชั้นดินเดิมที่มีการสร้างขึ้น เพื่อที่จะให้บริการที่มีเสถียรภาพที่ดีจะต้องหลีกเลี่ยง

- การทำให้เกิดการทรุดตัวเพิ่มขึ้นมากเกินไปจากน้ำหนักการจราจรที่เกิดขึ้นซ้ำไปซ้ำมา
- การทรุดตัวคายน้ำและการพังด้วยแรงเฉือนมาจากการรวมน้ำหนักของรถไฟ, ทางรถไฟ, และน้ำหนักดิน
- มีการพังจากแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนักล้อกระทำซ้ำไปซ้ำมา

- การเปลี่ยนแปลงปริมาตรมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความชื้น
- การสึกร้อนของชั้นดินเดิม

2.1.7 ระบบการระบายน้ำ (Drainage)

ลักษณะส่วนประกอบของทางรถไฟจะไม่สมบูรณ์ถ้าไม่กล่าวถึงสิ่งที่สำคัญที่สุดคือระบบการระบายน้ำ ระบบระบายน้ำมีหลายหน้าที่ เช่น

- ป้องกันน้ำใต้ผิวดินไม่ให้เข้าไปในบริเวณโครงสร้างทางรถไฟ
- ป้องกันน้ำด้านข้างทางรถไฟเข้าไปในโครงสร้างทางรถไฟ
- กำจัดน้ำที่ระบายออกมาจากชั้นบัลลาสต์และชั้นรองบัลลาสต์

2.2 คุณสมบัติของหินโรยทาง

2.2.1 การทดสอบคุณสมบัติความคงทนของอนุภาค

คุณภาพของวัสดุบัลลาสต์ถูกกำหนดโดยลักษณะเฉพาะของอนุภาค มีการทดสอบมากมายที่ใช้ในการหาลักษณะเฉพาะของอนุภาค โดยแต่ละการทดสอบนี้มีการบรรยายและบอกขั้นตอนมาตรฐาน

a) Los Angeles abrasion (ASTM C131, ASTM C535)

การทดสอบ LAA test คือการทดสอบแบบแห้งซึ่งใช้วัดค่าความทนทานหรือแนวโน้มการแตกร้าวของวัสดุแบบคร่าวๆ มาตรฐานที่เหมาะสมที่สุดในการทดสอบบัลลาสต์ คือ ASTM C535 ซึ่งประกอบด้วยวัสดุแห้งจำนวน 10 กิโลกรัม (22 lb) ลูกเหล็กกลม 12 ลูก น้ำหนักรวม 5 กิโลกรัม (11 lb) ลงในเครื่องทดสอบโดยหมุน 1000 รอบ ซึ่งการกระทบของลูกบอลเหล็กจะทำให้อนุภาคของบัลลาสต์เกิดการแตก จากนั้นนำวัสดุมาทำการล้างโดยใช้ sieve #12 (1.7 mm) ค่าที่ได้ คือเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนวัสดุที่ผ่านตะแกรงต่อน้ำหนักของวัสดุก่อนทดสอบ

b) Aggregate Compression Value (BS 812 Part 110: 1990)

คือ การทดสอบการบดอัด เป็นการวัดค่าความต้านทานการบดอัดของหินเมื่อถูกน้ำหนักกดทับตัวอย่างที่เตรียมอยู่ใน Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 154 mm ลึก 134 mm แรงที่กระทำจะกระทำจากด้านบนจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนถึง 390 กิโลนิวตัน (40 ตัน) ในระยะเวลา 10 นาที จากนั้นนำตัวอย่างมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ที่กำหนดแล้วนำส่วนที่ค้างไปอบ ค่าที่ได้คือเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนน้ำหนักหินที่ค้างบนตะแกรงส่วนด้วยน้ำหนักของหินทั้งหมด

c) Aggregate Impact Value (BS 812 Part 112: 1990)

คือการทดสอบวัดค่าความต้านทานแรงที่กระทำอย่างฉับพลันหรือแรงกระแทก ในการทดสอบนี้จะทำการเตรียมตัวอย่างใน mold เหล็กและทำการกระแทก 15 ครั้ง ด้วยลูกตุ้มน้ำหนักประมาณ 14 กิโลกรัม ตก

กระแทกอย่างอิสระที่ความสูง 380 มิลลิเมตร จากนั้นนำตัวอย่างมาผ่านตะแกรงเบอร์ที่กำหนดแล้วนำส่วนที่ค้างไปอบ ค่าที่ได้คือเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนน้ำหนักหินที่ค้างบนตะแกรงส่วนด้วยน้ำหนักของหินทั้งหมด

2.2.2 การทดสอบรูปร่าง Shape Tests

a) การทดสอบ Flat & Elongation

การทดสอบ Flat คือการหาค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความกว้างต่อความยาวของอนุภาคโดยใช้อัตราส่วน 1:2 หรือ 1:3 หากค่าอัตราส่วนที่ได้มีค่าเกินกว่าที่กำหนดอนุภาคนั้นถือว่าเป็น flat ค่าที่ได้จะแสดงในรูป % น้ำหนักอนุภาคที่ flat

การทดสอบ Elongation คือการหาค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความหนาต่อความกว้างของอนุภาคโดยใช้อัตราส่วน 1:2 หรือ 1:3 หากค่าอัตราส่วนที่ได้มีค่าเกินกว่าที่กำหนดอนุภาคนั้นถือว่าเป็น elongate ค่าที่ได้จะแสดงในรูป % อนุภาคที่ Elongation

b) การตรวจสอบด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscopy (SEM)

คือการขยายภาพดินส่วนละเอียดด้วยกำลังขยาย 500 -3500 เท่า เพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบของดินในส่วนละเอียด เพื่อช่วยในการสันนิษฐานว่าดินส่วนละเอียดมาจากส่วนใดและมีโครงสร้างใหญ่หรือเล็กเพียงใดเมื่อเทียบกับ

2.2.3 การหาขนาดคละ

a) Sieve Analysis (ASTM D422, D1140, D6913)

คือการทดสอบหาขนาดคละของบัสลาสต์โดยใช้การร่อนและล้างผ่านตะแกรง การใช้เครื่องร่อนมีขั้นตอน ตามการทดสอบต่างๆ เช่น ASTM C117, C136, และ D422 เป็นต้น ลำดับขั้นทั่วไปแสดงในรูปการกระจายความถี่สะสม โดยแกนตั้งแสดงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักวัสดุผ่านตะแกรง ส่วนแกนนอนแสดง log ของขนาดอนุภาควัสดุ

b) การทดสอบ hydrometer (ASTM D422)

เป็นการทดสอบที่ต่อเนื่องจากการร่อนผ่านตะแกรง โดยการทดสอบนี้จะหาขนาดคละของดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. (ผ่านตะแกรง #200) โดยผลการทดสอบจะพล็อตในกราฟ semi-log ระหว่างค่า %finer และขนาดของอนุภาคดิน ซึ่งการทดสอบ hydrometer เป็นการทดสอบหาการตกตะกอนของอนุภาคดินในน้ำแล้วนำมาวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคโดยอาศัยหลักการของ Stoker's law ซึ่งให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของทรงกลมในของเหลว, เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม, specific gravity ของทรงกลมและความหนืดของของเหลว

2.2.4 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

a) ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซับ (ASTM C127)

ค่าความถ่วงจำเพาะเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อหน่วยน้ำหนักของบอลลาสต์ ในการทดสอบ ASTM จะพบการหาทั้งสองค่านี้อยู่บ่อยๆ การดูดซับน้ำจะแสดงในรูปความพรุนซึ่งสัมพันธ์กับความแข็งแรงของอนุภาคมวลรวม การหาค่าความถ่วงจำเพาะโดยใช้วิธีแทนที่ด้วยน้ำ โดย A คือ น้ำหนักตัวอย่างแห้ง, B คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่สภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ, และ C คือ น้ำหนักของตัวอย่างในน้ำ

- การหาค่าความถ่วงจำเพาะทั้งหมด คือ
$$= \frac{A}{B - C}$$
- การหาค่าความถ่วงจำเพาะทั้งหมดที่สภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ
$$= \frac{B}{B - C}$$
- การหาค่าความถ่วงจำเพาะสภาพปรากฏ
$$= \frac{A}{A - C}$$
- การหาค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ
$$= \frac{B - A}{A} \times 100\%$$

b) การทดสอบ Specific gravity โดยวิธีใช้ Volumetric flask (ASTM D854)

Specific gravity คือค่าอัตราส่วนมวลของอนุภาคดินต่อมวลน้ำที่มีปริมาตรเท่ากันที่ 20 องศาเซลเซียส โดยการทดสอบจะนำเอาขวด Volumetric flask แห้งไปชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่า จากนั้นเติมน้ำให้ถึงขีดปริมาตรรองจนอุณหภูมิคงที่แล้วนำไปชั่งน้ำหนักบันทึกค่าเป็น Volumetric flask + water พร้อมบันทึกอุณหภูมิ จากนั้นเทดินอบแห้งที่เตรียมไว้ใส่ลงไปในขวด Volumetric flask แล้วเติมน้ำให้มีระดับประมาณ 1/3 ของขวดแล้วนำไปต้มเพื่อไล่อากาศออกจากดิน เมื่อเสร็จแล้วให้เติมน้ำให้ถึงขีดปริมาตรของขวดรอให้อุณหภูมิคงที่แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเป็นค่า Volumetric flask + water + soil แล้วนำค่าที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณหาค่า Specific gravity

2.2.5 การทดสอบความต้านทานซัลเฟต (Sulfate soundness) (ASTM C88)

การทดสอบความต้านทานซัลเฟต คือการหาความต้านทานของการสึกกร่อนจากการแข็งตัวและการดูดซึมน้ำของมวลรวมเข้าไปเข้ามาโดยสารละลายโซเดียม มาตรฐาน ASTM การทดสอบจะกระทำห้รอบสลับกันโดยแช่มวลรวมในสารละลายตามด้วยการอบแห้ง จากนั้นนำตัวอย่างมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ที่กำหนดตามมาตรฐานแล้วนำส่วนที่ค้างไปอบ ค่าที่ได้คือเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนน้ำหนักหินที่ค้างบนตะแกรงส่วนด้วยน้ำหนักของหินทั้งหมด ผลของค่าความต้านทานมีความสัมพันธ์กับชนิดของหิน

2.2.6 การทดสอบด้านอื่นๆ

a) Atterberg limit (ASTM D4318)

คือ จุดเปลี่ยนสถานะภาพ หรือลิมิตของมวลดิน แบ่งออกเป็น

- Liquid Limit คือ ความชื้นในมวลดินขณะที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนสภาพจากของเหลว (Viscous Fluid) ไปเป็นสารหนืดตัวในสถานภาพพลาสติก (Plastic State)
- Plastic Limit คือ ความชื้นในมวลดินขณะที่เปลี่ยนสถานภาพจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็ง (Semi - solid state)
- Shrinkage Limit คือ ความชื้นซึ่งดินเปลี่ยนจากสภาพกึ่งของแข็งเป็นของแข็งและจะไม่มี การหดตัวต่อไปอีกแล้ว แต่เมื่อความชื้นยิ่งลดลงไปฟองอากาศจะเริ่มแทรกเข้าไปในมวลดินและทำให้เกิดสภาวะไม่อิ่มตัวเกิดขึ้นจนกระทั่งไม่มีความชื้นอยู่เลย

2.2.7 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ

a) Specification for track ballast ในประเทศอินเดีย

ได้กำหนดมาตรฐานของ Ballast ไว้ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ค่ากำหนดมาตรฐานของ อินเดีย

Los Angle	ไม่ควรเกิน 30%
Aggregate Impact value	ไม่ควรเกิน 20%
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1%
Sulfate soundness	ไม่ควรเกิน 5%
Sieve	
ค้ำ 65 มม.	ไม่ควรเกิน 5%
ค้ำ 40 มม.	40-60%
ค้ำ 20 มม.	ไม่น้อยกว่า 98% (หินที่บดโดยเครื่องจักร)
	ไม่น้อยกว่า 95% (หินที่บดโดยทุบ)

b) Australian rail track

ได้กำหนดคุณสมบัติมาตรฐานของ Ballast ไว้ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ค่ากำหนดมาตรฐานของ Australian rail track

Los Angle	ไม่ควรเกิน 25%
Flat & Elongation (1:2)	ไม่ควรเกิน 30%
Aggregate compression value	ไม่ควรเกิน 25%
Sieve	
ผ่าน 63 มม.	100%
ผ่าน 53 มม.	85-100%
ผ่าน 37.5 มม.	20-60%
ผ่าน 26.5 มม.	0-20%
ผ่าน 19 มม.	0-5%
ผ่าน 13.2 มม.	0-2%
ผ่าน 4.75 มม.	0-1%
ผ่าน 0.075 มม.	0-1%

c) American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association (AREMA)

ได้กำหนดมาตรฐานของ Ballast ไว้ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ค่ากำหนดมาตรฐานของ American Railway

Los Angle	ไม่ควรเกิน 30%
Flat & Elongation (1:3)	ไม่ควรเกิน 5%
Aggregate compression value	ไม่ควรเกิน 25%
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1%
Specific gravity	ไม่น้อยกว่า 2.6
Sulfate soundness	ไม่ควรเกิน 5%
Sieve	
ผ่าน #200 (0.075 มม.)	ไม่เกิน 1%

2.3 Ballast Fouling

2.3.1 สาเหตุ

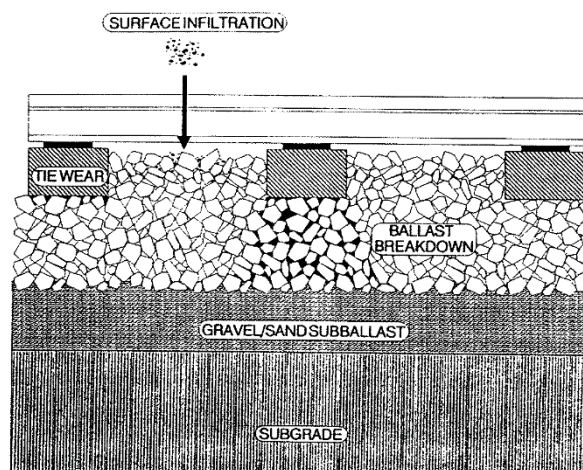
โครงสร้างฐานรากในอุดมคติของทางรถไฟคือชั้นหินโรยทางและชั้นรองชั้นหินโรยทางควรมีความคงทนสูง, ฐานรากมีเสถียรภาพ, และมีระบบการระบายน้ำที่ดี ชั้นรองหินโรยทางต้องมีความเหมาะสมเพื่อใช้ในการป้องกันการแทรกตัวของดินในชั้นฐานรากเข้าไปสู่ช่องว่างในชั้นหินโรยทางสด หากไม่มีจะทำให้เกิดสาเหตุในการปนเปื้อนของวัสดุหินโรยทาง ในบัลลาสต์ใหม่ควรพบการปนเปื้อนเพียง 1-2% ต่อน้ำหนักทั้งหมด จากการศึกษาพบว่าการปนเปื้อนของบัลลาสต์ที่เพิ่มขึ้นเกิดจากหลายสาเหตุ และมีการแบ่งสาเหตุของการปนเปื้อนออกมาเป็น 5 สาเหตุหลัก คือ

a) บัลลาสต์เกิดความเสียหาย (Ballast breakdown)

คือการทำวัสดุโรยทางเกิดความเสียหาย ความเสียหายที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งเกิดจากขั้นตอนการขนส่ง ด้วยเหตุนี้จึงควรมีการตรวจสอบหินโรยทางในขั้นตอนการส่งมอบ ซึ่งการบดเปื้อนที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดบริเวณใต้หมอนรองรางรถไฟที่เกิดจากการรับแรงแบกทานเพียงอย่างเดียว แต่ยังเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การทำลายที่เกิดจากเครื่องจักร, ผลจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, การพังจากการซ่อมแซมชั้นหินโรยทาง (tamping), การทำลายที่เกิดน้ำหนักบรรทุกจากการใช้งาน, และอนุภาคที่บดเปื้อนเมื่อมีการซ่อมแซมหินโรยทาง (tamping) จากการสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟที่ผ่านจากการเคลื่อนที่ของน้ำในช่องว่าง

b) การแทรกซึมจากพื้นผิว (Infiltration from ballast surface)

การบดเปื้อนของหินโรยทางที่เกิดจากการแทรกตัวบริเวณผิวจากสิ่งบดเปื้อนร่วงหล่นจากรถไฟ ลมพัดพาสิ่งบดเปื้อนมาและการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำที่มีสิ่งบดเปื้อนจากบริเวณพื้นผิวหินโรยทาง ดังแสดงในรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 รูปแสดงการแทรกซึมจากพื้นผิว (Selig & Waters, 1994)

c) การสึกหรอของหมอนรอง (sleeper wear)

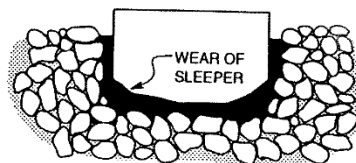
การเสื่อมสภาพของหมอนรองรางรถไฟซึ่งสามารถเกิดได้ทั้งแบบหมอนรองชนิดไม้และชนิดคอนกรีตเกิดจากถูกกัดกร่อนเป็นปัญหาที่ร้ายแรงสำหรับหินโรยทางและหมอนรองรางรถไฟ จากการศึกษาโดย British Railways อาจเรียกว่าการกัดกร่อนจากน้ำของหินโรยทางและหมอนรองรางรถไฟ (Hydraulic Erosion of Ballast and sleeper) จากการสังเกตพบว่าการทำลายส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณจุดที่ติดกันของหินโรยทางกับหมอนรองรางรถไฟซึ่งเกิดการขัดจากหินโรยทางที่ละเอียด เมื่อมวลละเอียดนี้รวมกับน้ำจะกลายเป็นสารละลายกัดกร่อนหมอนรองรางรถไฟและหินโรยทางและก่อให้เกิดช่องว่างใต้หมอนรองรางรถไฟ เมื่อมีแรงมากกระทำจะช่วยเพิ่มการกัดกร่อนทำให้เกิดความเสียหายมากขึ้น ภายใต้แรงกระทำที่เกิดจากการใช้งาน ผลักดันหมอนรองทำให้เกิดแรงดันน้ำใต้หมอนรองรางรถไฟ น้ำส่วนเกินจะเกิดการพุ่งกระจายเมื่อเกิดแรงดัน

ออกด้านข้างและด้านบนจากใต้รางรถไฟ เมื่อมีความเร็วมากๆจะทำให้เกิดแรงดันมากเช่นกัน การสึกหรอของหมอนรองได้แสดงในรูปที่ 2-6

ปัญหาการกัดกร่อนจากน้ำสามารถเริ่มต้นจากสาเหตุการปนเปื้อนอื่นๆก่อน และจะทำให้เกิดการรวมตัวของมวลละเอียดล้อมรอบส่วนล่างของหมอนรองรางรถไฟและทำให้เกิดแอ่งรองรับน้ำภายใต้หมอนรอง การเกิดการพุ่งออกของน้ำเป็นการที่มีน้ำและสิ่งปนเปื้อนเข้ามาแทนที่หินโรยทางบริเวณล้อมรอบใต้หมอนรอง ผลคือจะทำให้ค่าการต้านทานการเคลื่อนที่ด้านข้างของหมอนรองรางรถไฟลดลง และทำให้เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงต่อหมอนรองรางรถไฟชนิดคอนกรีต และจะทำให้เกิดการปนเปื้อนกระจายทั่วทั้งทางรถไฟ การเสื่อมสภาพของหินโรยและหมอนรองสามารถป้องกันได้โดยการใช้วัสดุหินโรยทางที่มีค่าความต้านทานการทำลายสูง และวัสดุหินโรยทางควรมีระบบการระบายน้ำที่ดี

ปัจจัยทั่วไปลักษณะของการเสียหายของทางรถไฟในประเทศอังกฤษมีดังนี้

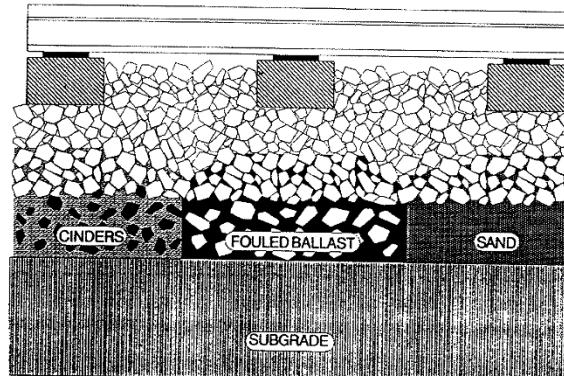
- มีระบบระบายน้ำที่ไม่ดี
- หมอนรองคอนกรีตได้รับน้ำหนักมาก
- วัสดุหินโรยทางมีความต้านทานการทำลายต่ำ
- ภายใต้หมอนรองรางรถไฟมีช่องว่างที่เกิดจากการกระแทกจากการใช้งานหรือจากระบบน้ำ



รูปที่ 2-6 รูปแสดงการสึกหรอของหมอนรอง (Selig & Waters, 1994)

d) การแทรกซึมจากชั้นด้านล่างของบัลลาสต์ (Infiltration from underlying granular layers)

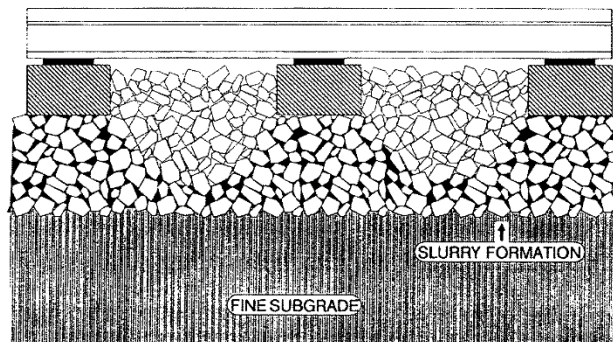
ชั้นใต้ชั้นหินโรยทางสามารถเป็นสาเหตุของการปนเปื้อน การปนเปื้อนที่แทรกซึมเข้าไปในช่องว่างของหินโรยทางเกิดจากความบกพร่องในการทำงานของชั้นรองชั้นหินโรยทาง เช่นเมื่อมีการปูวัสดุโรยทางใหม่ มีเศษของวัสดุเก่าปนเปื้อนอยู่ โดยวัสดุเหล่านั้นมักจะถูกกำจัดไม่หมด หรือวัสดุจะเกิดการแตกเล็กลงเมื่อผ่านการใช้งานหลายๆ ทำให้มีอนุภาคมีการละเอียดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจมีการใช้ทรายเป็นชั้นรองชั้นหินโรยทาง แม้ว่าทรายจะมีความคงทนแต่ก็ยังไม่เป็นที่น่าพอใจเพราะทรายอาจแทรกซึมเข้าไปในชั้นหินโรยทางได้ การเคลื่อนตัวของสิ่งปนเปื้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีน้ำในชั้นรองชั้นหินโรยทางเพราะจะเกิดแรงดันจากน้ำใต้ดิน (pumping) เมื่อมีการใช้งานในบริเวณนั้น การแทรกซึมจากชั้นด้านล่างของบัลลาสต์แสดงในรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7 การแทรกซึมจากชั้นด้านล่างของบัลลาสต์ (Selig & Waters, 1994)

e) การแทรกซึมของดินชั้นฐานราก (Subgrade Infiltration)

คือการที่ดินในชั้นฐานรากหรือ subgrade เกิดการแทรกตัวขึ้นไปปนเปื้อนด้านบนบน เมื่อเร็วๆ นี้มีการวิจัยที่มหาวิทยาลัย แมซซาชูเซต ในการสังเกตภาคสนามเพื่อหาสาเหตุการปนเปื้อนพบว่า ดินอ่อนในชั้นฐานรากไม่มีผลต่อการปนเปื้อน ในชั้นหินโรยทาง และในความจริงแล้วจากการศึกษาพบว่า สาเหตุหลักในการปนเปื้อนจะเกิดในบริเวณที่มีชั้นฐานรากเป็นดินชนิดดินดาน ดินแข็ง เมื่อทำการตัดหน้าตัดทางรถไฟเพื่อดูโครงสร้างพบว่า มีน้ำขึ้นมาสู่ชั้นหินโรยทาง ก่อให้เกิดการปนเปื้อน จะเกิดการทำลายจากในบริเวณผิวที่เต็มไปด้วยดินโคลน เมื่อมีแรงมากระทำเข้าไปมาทำให้บริเวณที่มีน้ำทำให้เกิดการสึกกร่อน น้ำเป็นสิ่งเดียวที่ช่วยทำให้ผิวของดินโคลนแข็งเกิดการอ่อนตัว แต่อนุภาคของดินชั้นฐานรากที่มาจากกรสลายตัวของดินเหนียวจะเป็นส่วนประกอบทำให้ถูกดูดขึ้นไปตามช่องว่างของอากาศในชั้นหินโรยทางและชั้นรองชั้นหินโรยทาง ผลของการปนเปื้อนจะเห็นได้ชัดเมื่ออนุภาคของดินเหนียวละเอียดมาล้อมรอบหมอนรองทางรถไฟทำให้เกิดการกัดกร่อนหมอนรองทางรถไฟ เกิดความเสียหาย ทางแก้ไขที่มีประสิทธิภาพคือ การเลือกวัสดุที่ใช้ในชั้นรองชั้นหินโรยทาง ให้เป็นวัสดุหินกรวดหรือทรายที่มีความคงทนและมีการระบายน้ำที่ดี เพื่อทำหน้าที่ในการป้องกันชั้นหินโรยทางจากการแทรกซึมของดินในชั้นฐานราก



รูปที่ 2-8 รูปแสดงการแทรกซึมของดินชั้นฐานราก (Selig & Waters, 1994)

2.3.2 ผลกระทบจากการปนเปื้อน

ผลของการปนเปื้อนของหินโรยทางคือขัดขวางไม่ให้หินโรยทางทำหน้าที่ของมันได้ ลักษณะของผลกระทบขึ้นอยู่กับปริมาณการปนเปื้อนและสาเหตุลักษณะของการปนเปื้อนของวัสดุ อนุภาคของทรายและกรวดละเอียดจะเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนและค่าความแข็งแรงของหินโรยทางและเพิ่มเสถียรภาพ ค่าความต้านทานการเปลี่ยนแปลงขนาดในช่วงพลาสติกแต่จะทำให้มีช่องว่างน้อยลงและค่าความยืดหยุ่นลดลงด้วยการแบ่งแยกขนาดอนุภาคในระหว่างการซ่อมแซม tamping เมื่อช่องว่างใกล้จะเต็ม การ tamping อาจทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายและอาจเกิดการทรุดตัวจากน้ำหนักหลังจากการใช้งาน การปนเปื้อนของทรายและกรวดไม่ใช่ปัญหาที่สำคัญในการซ่อมบำรุง

การสูญเสียประสิทธิภาพหลักจะเกิดจากการปนเปื้อนของวัสดุที่เป็นตะกอนและดินเหนียว ความรุนแรงขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาด ดินเหนียวเพียงอย่างเดียวจะไม่ทำให้เกิดการขัดถูแต่อนุภาคของตะกอนสามารถทำให้เกิดการขัดถูได้ซึ่งทั้งสองอย่างจะขัดขวางระบบการระบายน้ำและด้วยเหตุนี้จะทำให้เพิ่มการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง และน้ำเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้เกิดการทำลายที่รุนแรงต่อหินโรยทาง ดังนั้นสาเหตุที่สำคัญในการทำลายคือ การกัดกร่อนจากแรงดันน้ำ, การขัดถูของดินจากชั้นฐานราก, และการสูญเสียเสถียรภาพของหินโรยทาง และสุดท้ายเมื่อระดับการปนเปื้อนสูงพอการควบคุมคุณสมบัติและพฤติกรรมของหินโรยทางจะไม่สามารถควบคุมได้ การซ่อมแซมชั้นหินโรยทางโดยวิธี tamping จะมีประสิทธิภาพน้อยลงเมื่อวัสดุหินโรยทางแห้งมากจะทำให้เกิดความลำบากในการเจาะและการจัดเรียงอนุภาค, เมื่อวัสดุหินโรยทางมีสภาพเปียกมากและอนุภาคมีมวลละเอียดมาเคลือบทำให้ลื่น, และจะทำให้โครงสร้างชั้นหินโรยทางอ่อนตัวหลังจากการทำ tamping ทำให้ไม่ผ่านการตรวจสอบ

2.3.3 การลดค่าการปนเปื้อน

สามารถทำได้โดย

- ทำการตรวจสอบหินโรยทางใหม่ ให้แน่ใจว่าไม่มีสิ่งปนเปื้อนก่อนนำไปใช้งาน
- พยายามลดวัสดุไม่ให้ตกหล่นจากรถบรรทุก
- พยายามลดความเสียหายจากการ tamping ที่เกิดจากปลายของเครื่อง tamping
- ในการเลือกวัสดุหินโรยทางควรเลือกวัสดุที่มีความต้านทานต่อการขัดสีสูง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการขัดสีภายในอนุภาค
- หลีกเลี่ยงวัสดุหินโรยทางที่มีการระบายน้ำที่ไม่ดี เกิดการขัดสีและเกิดความเสียหายภายในอนุภาค
- เลือกวัสดุที่ปกคลุมป้องกันการทำลายจากดินชั้นฐานรากและป้องกันการเกิดการ pumping

2.3.4 ค่าการปนเปื้อน

การหาค่าการปนเปื้อนของหินโรยทาง (Ballast) จากการรวบรวมข้อมูลสามารถทำการแบ่งออกเป็น 3 สมการ ดังนี้

a) ค่าดัชนีการปนเปื้อนหรือเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อน (Fouling index, F_I)

Selig & Waters (1994) ได้เสนอพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดค่าการปนเปื้อนของตัวอย่างหินโรยทางในอเมริกาเหนือ โดยมีสมการ (2-1) และสามารถบางระดับการปนเปื้อนตามตารางที่ 2-4

$$F_I = P_4 + P_{200} \quad (2-1)$$

โดยที่ P_4 คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของวัสดุที่ผ่านตะแกรง #4 (ขนาด 4.75 มิลลิเมตร)

P_{200} คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของวัสดุที่ผ่านตะแกรง #200 (ขนาด 0.075 มิลลิเมตร)

ตารางที่ 2-4 การแบ่งค่าระดับการปนเปื้อนจากสมการ Fouling index (Selig & Waters, 1994)

ระดับการปนเปื้อนของ ballast	ค่าดัชนีการปนเปื้อน (%)
สะอาด	$F_I < 1$
สะอาดปานกลาง	$1 < F_I < 10$
ปนเปื้อนปานกลาง	$10 < F_I < 20$
ปนเปื้อน	$20 < F_I < 40$
ปนเปื้อนมาก	$40 < F_I$

b) เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC)

Feldman & Nissen (2002) ได้เสนอ พารามิเตอร์ PVC เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษาการปนเปื้อนเพิ่มในช่องว่างอากาศในหินโรยทาง ทำให้ได้สมการ (2-2) และสามารถแบ่งระดับการปนเปื้อนดังตารางที่ 2-5

$$PVC = \frac{V_2}{V_1} \times 100\% \quad (2-2)$$

โดยที่ V_1 คือ ปริมาตรช่องว่างระหว่างการบดอัด

V_2 คือ ปริมาตรทั้งหมดของวัสดุที่ปนเปื้อนที่บดอัด (อนุภาคที่ผ่านตะแกรงขนาด 9.5 มิลลิเมตร)

ตารางที่ 2-5 การแบ่งค่าระดับการปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC) (Feldman & Nissen, 2002)

ระดับการปนเปื้อนของ ballast	เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนในช่องว่าง, PVC(%)
สะอาด	0 - 20
ปนเปื้อนปานกลาง	20 - 29
ปนเปื้อน	>30

c) อัตราส่วนความสัมพันธ์การปนเปื้อนของหินโรยทาง (Relative Ballast fouling ratio: R_{b-f})

Indraratna et al. (2011) ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าดัชนีการปนเปื้อน (Fouling index, F_I) และค่าเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC) ทำให้เกิดพารามิเตอร์ใหม่ คือ Relative Ballast fouling ratio (R_{b-f}) โดยสามารถหาได้จากสมการ (2-3) และสามารถแบ่งระดับการปนเปื้อนดังตารางที่ 2-6

$$R_{b-f} = \frac{M_f \left(\frac{G_{b-f}}{G_{s-f}} \right)}{M_b} \times 100\% \quad (2-3)$$

โดยที่ M_f คือ มวลของวัสดุปนเปื้อนที่อยู่ในสภาพแห้ง, G_{b-f} คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุหินโรยทาง
 M_b คือ มวลของวัสดุหินโรยทางที่อยู่ในสภาพแห้ง, G_{s-f} คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุปนเปื้อน

ตารางที่ 2-6 อัตราส่วนความสัมพันธการปนเปื้อนของหินโรยทาง (Relative Ballast fouling ratio: R_{b-f})
 (Indraratna et al., 2011)

ระดับการปนเปื้อนของ ballast	อัตราส่วนความสัมพันธการปนเปื้อน, R_{b-f} (%)
สะอาด	$R_{b-f} < 2$
สะอาดปานกลาง	$2 < R_{b-f} < 10$
ปนเปื้อนปานกลาง	$10 < R_{b-f} < 20$
ปนเปื้อน	$20 < R_{b-f} < 50$
ปนเปื้อนมาก	$50 \leq R_{b-f}$

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 การศึกษาการปนเปื้อนของหินโรยทางในอเมริกาเหนือ (North America studies)

Canadian Pacific Railroad ดำเนินการศึกษาในภาคสนามและห้องทดลองเพื่อใช้ในการพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติของหินโรยทาง โดยได้สรุปปัญหาหลักของการปนเปื้อนของหินโรยทางมาจากปัญหาการแตกตัวของหินโรยทาง (Ballast Breakdown) ซึ่งในความจริงแล้วคุณสมบัติความเหมาะสมของชั้นรองชั้นหินโรยทางที่ใช้ในการแยกระหว่างชั้นหินโรยทางและชั้นดินของฐานรากออกจากกันก็เป็นสิ่งสำคัญมากเช่นกัน การศึกษาต่อมาโดย University of Massachusetts เพื่อรวบรวมความหลากหลายของสภาพทางรถไฟสายหลักที่ผ่านอเมริกาเหนือหลายพื้นที่พบโคลนในบริเวณผิวของหินโรยทางซึ่งเป็นสภาพที่เห็นทั่วไปของอุตสาหกรรมทางรถไฟที่เกิดจากดินชั้นฐานรากที่มีความละเอียด และพบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ด้านข้างของทางไม่ได้เต็มไปด้วยโคลน

การตรวจสอบจะทำได้โดยการไปเยี่ยมสถานที่เพื่อสังเกตสภาพ และทำการเก็บตัวอย่างของหินโรยทาง ชั้นรองชั้นหินโรยทาง และชั้นดินฐานราก การเก็บตัวอย่างจะทำได้เมื่อได้รับอนุญาตและอำนวยความสะดวกในการขุดหลุมใต้พื้นทางเพื่อเก็บตัวอย่างเพื่อให้เก็บตัวอย่างได้ง่าย แต่มีบางกรณีที่ใช้เพียงมือขุดหลุมเพื่อเก็บตัวอย่างหรือมีเครื่องจักรบนรางรถไฟจึงทำการเก็บตัวอย่างได้ยาก ส่วนลักษณะของทางรถไฟ ลักษณะภูมิประเทศ ข้อมูลสภาพการระบายน้ำ ข้อมูลการใช้งาน และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ในส่วนนี้จะได้รับความอนุเคราะห์จากกรมทางรถไฟ

ในห้องทดลอง ผ่านการตรวจสอบตามมาตรฐาน ASTM D2488 ตัวอย่างหินโรยทาง การปนเปื้อนของหินโรยทางถูกนั้นจะถูกแบ่งขนาด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ส่วนประกอบ สำหรับตัวอย่างหินโรยทางที่มีการปนเปื้อน จะมีอนุภาคเล็กกว่า 9.5 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว) ซึ่งสมมติว่าเป็นค่าที่แสดงการปนเปื้อนของหินโรยทาง

ค่าการปนเปื้อนของหินโรยทางจะประกอบด้วยส่วนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นทราย และส่วนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.075 มิลลิเมตร (ใช้ตะแกรง #200) ส่วนประกอบที่เหลือจะเป็นตะกอนและดินเหนียว การแบ่งแยกกลุ่มของหินโรยทางอาจใช้กล้องจุลทรรศน์ในการวิเคราะห์แยกหมวดหมู่ แต่สำหรับตะกอนดินและดินเหนียวที่มีขนาดเล็ก ไม่สามารถใช้กล้องจุลทรรศน์ในการระบุได้ จึงต้องมีการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแทนการวิเคราะห์แยกหมวดหมู่ แล้วนำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักของตัวอย่างทั้งหมด

ผลของการทดสอบการปนเปื้อนแบ่งการปนเปื้อนเป็น 5 สาเหตุ โดยสาเหตุที่สำคัญที่สุดของการปนเปื้อนคือ Ballast Breakdown สาเหตุรองลงมาคือ ชั้นพื้นฐานข้างใต้ชั้นหินโรยทางมีขนาดเป็นเม็ดเล็กที่มาจากโครงสร้างเดิม (Underlying granular layer) การปนเปื้อนจากพื้นผิวด้านบน (Surface infiltration) การแทรกซึมจากด้านล่างของชั้นดินฐานราก (Subgrade infiltration) และลำดับสุดท้ายคือเกิดจากการสึกกร่อนของหมอนรองทางรถไฟ (Sleeper wear) สาเหตุการปนเปื้อนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับสภาพลักษณะของแต่ละพื้นที่ ทำให้การปนเปื้อนมีสาเหตุที่แตกต่างกันออกไป

2.4.2 การศึกษาการปนเปื้อนของหินโรยทางในแถบยุโรป

ในเยอรมันพบว่าสาเหตุหลักมาจากการปนเปื้อนบริเวณผิว ดังนั้นอย่างแรกต้องมีการแบ่งแยกชั้นใต้ชั้นหินโรยทางออกจากเพื่อจำกัดป้องกันการแทรกของดินจากชั้นดินฐานราก อย่างที่สองในการเคลื่อนย้ายหินโรยทางควรระวังให้หินโรยนั้นยังมีขนาดและมีรูปร่างเป็นเหลี่ยม การปนเปื้อนจากดินฐานราก เป็นผลที่เกิดจากการรับน้ำหนักการใช้งานมากเกินไปในจุดที่อยู่ระหว่างหินโรยทางกับชั้นดินฐานราก หากมีการใช้วัสดุในการแบ่งแยกชั้นที่ไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดการ pumping ซึ่งเป็นหนึ่งในปัญหาที่แก้ไขได้ยากเกิดจากการเลือกใช้วัสดุหรือการแบ่งชั้นไม่ดีทำให้เกิดน้ำซัง เกิดการระบายน้ำได้ไม่ดีทำให้น้ำซึมผ่านไม่จึงทำให้ดินฐานรากเกิดการอ่อนตัวและเกิดการทรุดตัวตามมา ดังนั้นการป้องกันที่ดีควรมีการเพิ่มชั้นรองชั้นหินโรยทางเพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการระบายน้ำให้น่าพึงพอใจ

British Railways engineers มีการนำตัวหินโรยทางที่ปนเปื้อน ที่มีขนาดเล็กกว่า 14 มิลลิเมตร มาแยกหาสาเหตุการปนเปื้อน โดยผลแสดงในตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 การสรุปค่าการปนเปื้อนที่ได้จากการศึกษาของ British Railways engineers (Selig & Waters, 2000)

No.	สาเหตุของการปนเปื้อน	ค่าการปนเปื้อนในระยะเวลา 15 ปี	
		กิโลกรัม/1หมอนรองราง	% ของทั้งหมด
1	เกิดจากขั้นตอนการเคลื่อนย้ายขนส่ง	29	7
2	จากการใช้เครื่องจักรซ่อมแซมหินโรยทาง	88	20
3	การขุดสีจากน้ำหนักการใช้งานและการสึกหรอของหมอนรองชนิดคอนกรีต	90	21
4	สิ่งปนเปื้อนจากภายนอก	225	52
	รวม	432	100

2.4.3 การศึกษาความเสียหายจากการซ่อมแซมชั้นหินโรยทาง (Tamping damage)

British Railways ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับขนาดของหินโรยทางที่ลดลงหลังจากการซ่อมแซมชั้นหินโรยทางภายใต้หมอนรองรางรถไฟ หรือการ Tamping ผลจากการ Tamping อนุภาคขนาด 38-51 มิลลิเมตรจะลดลงเหลือเพียง 15-45 % ของทั้งปริมาณหมด ซึ่งตอนแรกมีอยู่ 46-71% ของปริมาณทั้งหมด ซึ่งจากการสำรวจพบว่าหินโรยทางที่มีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 13 มิลลิเมตร เริ่มแรกมีเพียง 1% โดยน้ำหนัก แต่หลังจากการ Tamping พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 5% โดยน้ำหนัก การศึกษาอื่นๆในห้องทดลอง ที่ British Railways พบว่ามีหินโรยทางขนาดน้อยกว่า 14 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้น 2-4 กิโลกรัมต่อการซ่อมใต้หมอนรองรางรถไฟหนึ่งหมอน ซึ่งการลดลงของขนาดเกิดจากการ tamping

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานและแผนการทดลอง

การทำโครงการวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเก็บข้อมูลการในเส้นทางรถไฟสายเหนือ บริเวณสถานีแม่ตานน้อย อำเภอห้างฉัตร จังหวัดลำปาง โดยมุ่งเน้นความสนใจไปที่วัสดุหินโรยทาง (Ballast) ประกอบด้วยการสำรวจและการตรวจสอบในสนาม และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในการเก็บตัวอย่างและการทดสอบในสนามนั้นอันดับแรกจะทำการวิเคราะห์หมอนรองรางรถไฟว่าสภาพโดยรวมเป็นอย่างไร วัดขนาดความกว้างของราง ทำการถ่ายรูปเพื่อเก็บข้อมูล เป็นต้น ในการทำวิจัยครั้งนี้ได้มีการแบ่งระบบขั้นตอนในการดำเนินงานออกเป็น 6 ขั้นตอน คือ

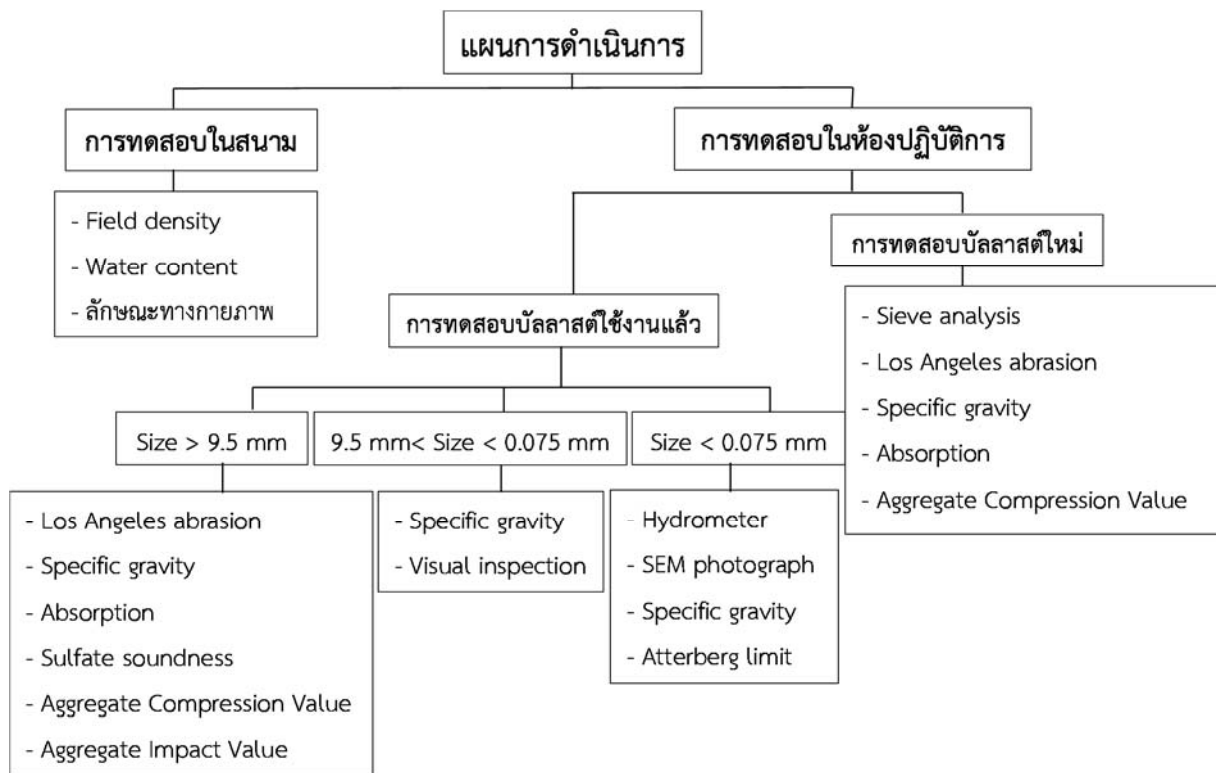
- ศึกษาเอกสารและค้นหาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- วางแผนการทำโครงการ
- ออกทำการเก็บตัวอย่างในสถานที่จริง
- ขั้นตอนการทดสอบตัวอย่าง
- การวิเคราะห์ข้อมูล
- การจัดเตรียมรายงานวิจัย

3.1 สถานที่การเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างในภาคสนามนั้นดำเนินการที่หน้าตัดแม่ตานน้อย ตำแหน่งอยู่ระหว่างเสาโทรเลขที่ 672/7 และ 672/8 ตัวอย่างของสภาพหน้างานได้แสดงในรูปที่ 3-1 (ใน 1 กิโลเมตรจะมีเสาโทรเลข 16 ต้น ดังนั้นเสาจะห่างกัน 62.5 เมตร) และมีแผนการดำเนินงานดังรูปที่ 3-2



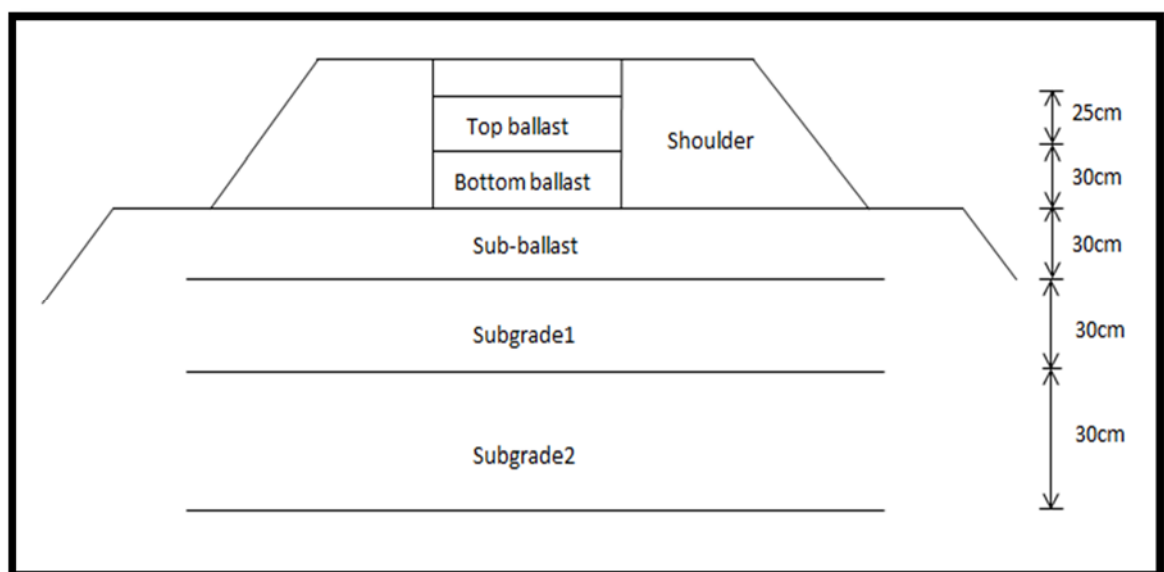
รูปที่ 3-1 สภาพหน้างาน



รูปที่ 3-2 แผนการดำเนินงาน

3.2 การเก็บตัวอย่างและการทดสอบในสนาม

ในการเก็บตัวอย่างจะดำเนินการ 6 ตัวอย่างคือ ballast, shoulder, crib, sub-ballast, subgrade1, และ subgrade2 ตามความลึกต่างๆ โดยจะเก็บตัวอย่างชั้นละ 40 kg ดังรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างในสนาม

การทดสอบในสนามแบ่งออกเป็น 3 การทดสอบดังนี้

- การทำ field density โดยใช้กรวยทรายทดสอบ
- การทดสอบ water content
- ลักษณะทางกายภาพ

3.3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ จะแยกแยะระหว่างบิลลาสต์ใหม่และบิลลาสต์เก่าและแบ่งการทดสอบ ดังนี้คือ

- บิลลาสต์ใหม่: ทำการทดสอบดังนี้คือ Los Angeles abrasion, Sieve analysis, Specific gravity, Absorption
- Ballast ที่ใช้งานแล้ว: ทำการ Sieve แยกตัวอย่างทดสอบออกเป็น 3 ส่วน คือ (i) ส่วนที่ค้ำบนตะแกรง 3/8 in (9.5 มม.) จะเรียกส่วนนี้ว่าเป็นส่วน Coarse aggregate จะทำการทดสอบ Los Angeles abrasion, Specific gravity, Absorption, Sulfate soundness, Aggregate Compression Value, และ Aggregate Impact Value, (ii) ส่วนที่ผ่านตะแกรง 3/8 in (9.5 มม.) และค้ำบนตะแกรง #200 (0.075 มม.) จะเรียกส่วนนี้ว่าเป็นส่วน Coarse fouling จะทำการทดสอบ Specific gravity, และ visual inspection, (ii) ส่วนที่ผ่านตะแกรง #200 (0.075 มม.) จะเรียกส่วนนี้ว่าเป็นส่วน Fine fouling จะทำการทดสอบ Hydrometer, SEM photograph, Specific gravity, และ Atterberg limit

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบภาคสนาม

4.1.1 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของดินในสนาม

การทดสอบการหาความหนาแน่นของดินโดยใช้วิธีกรวยทรายทดสอบได้ตามตารางที่ 4-1 จากตารางสรุปค่าการทดสอบความหนาแน่นของดินในสนามพบว่าค่าความหนาแน่นที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 766 ถึง 891 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความหนาแน่นดินในสนามน้อยที่สุดอยู่ที่บริเวณ Shoulder และค่าความหนาแน่นในสนามมากที่สุดอยู่ที่บริเวณ Sub ballast

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นในสนาม

Dry density (kg/m ³)	Ballast	Sub-ballast	Crib	Shoulder	Sub-grade 1	Sub-grade 2
แม่ตานน้อย	887.8	891.4	861.9	765.6	N.A	N.A.

4.1.2 ผลการทดสอบหาความชื้นของดินในสนาม

การทดสอบหาความชื้นของดินในสนามโดยการคว่ดินในกระหะค่าที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 4-2 จากตารางสรุปค่าความชื้นของดินในสนามพบว่าความชื้นของดินในสนามที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 1.2-1.5% ค่าความชื้นของดินในสนามน้อยที่สุดอยู่ที่บริเวณ Ballast, Crib, และ Shoulder และค่าความชื้นของดินในสนามมากที่สุดอยู่ที่บริเวณ Sub ballast

ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบหาความชื้นของดินในสนาม

Water content (%)	Ballast	Sub-ballast	Crib	Shoulder	Sub-grade 1	Sub-grade 2
แม่ตานน้อย	1.17	1.53	1.17	1.17	N.A	

4.1.3 ลักษณะทางกายภาพของทางรถไฟที่หน้าตัด

ตำแหน่งเก็บตัวอย่างของแม่ตานน้อย กิโลเมตรที่ 672/7 -672/8 ลักษณะทางกายภาพคือเป็นรางรถไฟที่ยกสูงจากคันทางประมาณ 25 เซ็นติเมตร หากมุ่งหน้าไปทางทิศเหนือระดับรางรถไฟทางด้านซ้ายสูงจากคันทางประมาณ 16.2 เซ็นติเมตร ระดับของรางรถไฟทางด้านขวาสูงจากคันดินประมาณ 25.7 เซ็นติเมตร และระดับของรางด้านขวาและด้านซ้ายต่างกันประมาณ 4.7 เซ็นติเมตร เป็นทางตรง

สภาพหมอนรองรางรถไฟเป็นแบบไม้ ผ่านการใช้งานอย่างหนัก ผุพัง มีเศษเนื้อไม้ร่วงหล่นลงไปรวมกับหินโรยทาง และจานรองรางกินลึกเข้าไปในเนื้อไม้ ระดับสันรางเกิดการทรุดตัวลงจน ตะปูยึดรางหลุด

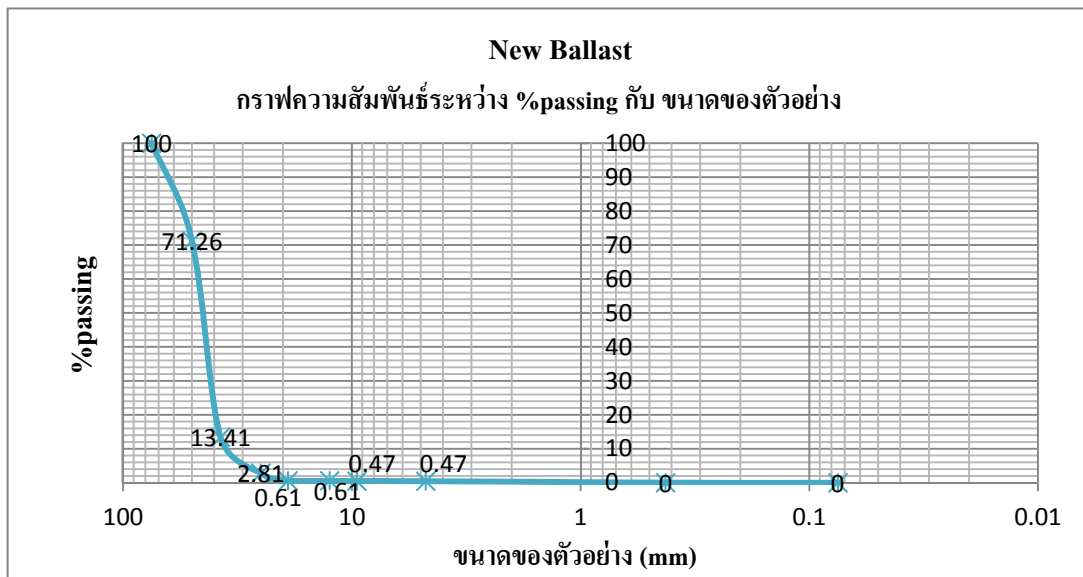
4.2 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.2.1 การทดสอบ New Ballast

ผลการทดสอบ Sieve analysis แสดงดังตารางที่ 4-3 และรูปที่ 4-1 ผลการทดสอบ Specific gravity ได้ค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏเท่ากับ 2.62 ผลการทดสอบ Water Absorption ได้ค่าร้อยละการดูดซึมเท่ากับ 1.25% ผลการทดสอบ Los angles ได้ค่าจากการทดสอบเท่ากับ 20.49% และ ผลการทดสอบ Aggregate Compression Value ได้ค่าจากการทดสอบเท่ากับ 37.21%

ตารางที่ 4-3 ผล sieve ของ new Ballast

ขนาด (mm)	75	50	37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	0.075
%Passing	100	71.26	13.41	2.81	0.61	0.61	0.47	0.47	0



รูปที่ 4-1 ผล sieve ของ new Ballast

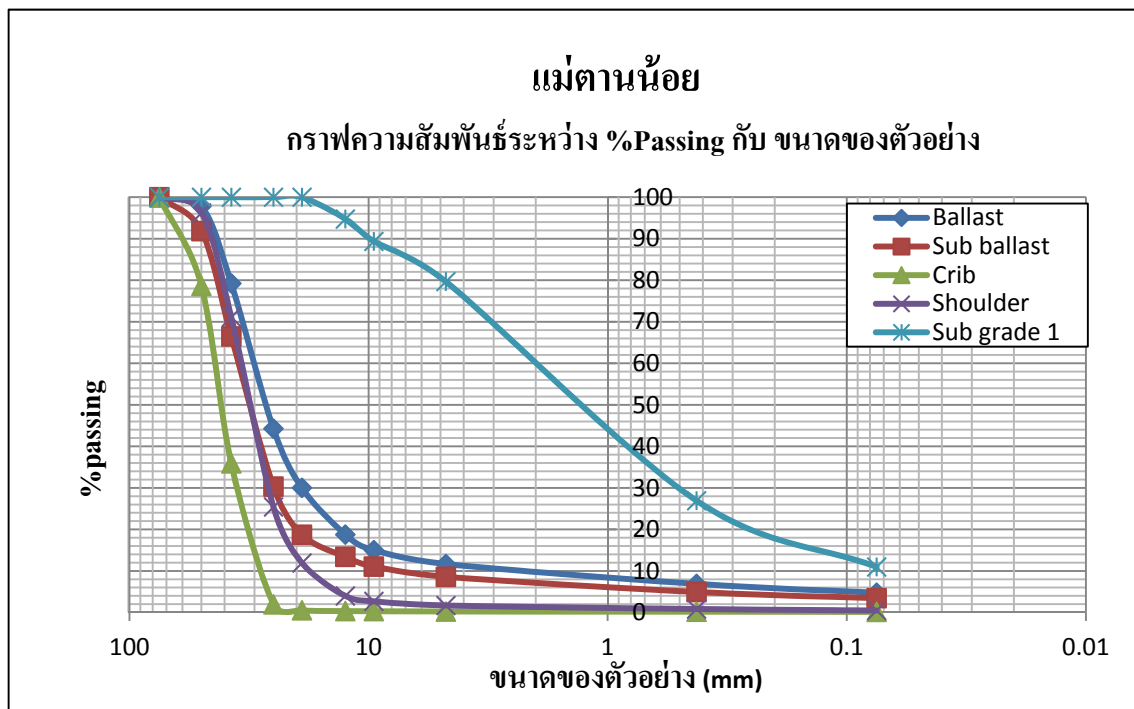
4.2.2 ผลการทดสอบ sieve analysis

ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4-4 และรูปที่ 4-2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า

- ส่วนของ Crib เป็นส่วนที่มีส่วนละเอียดน้อยที่สุด
- Ballast, Sub ballast, และ Shoulder มีขนาดคล้ายกัน
- ส่วนของ Ballast จะมีส่วนละเอียดมากกว่าส่วนอื่น
- Sub grade 1 เป็นส่วนที่มีส่วนละเอียดมากที่สุดหมดผ่านตะแกรง 3/4 in (19 มม.)

ตารางที่ 4-4 ผลการทดสอบ Sieve analysis ของหน้าตัดแม่ตานน้อย

ขนาด (mm)	%Passing				
	Ballast	Sub ballast	Crib	Shoulder	Sub grade 1
75	100	100	100	100	100
50	97.78	91.83	78.63	96.23	100
37.5	79.22	66.45	35.91	71.12	100
25	44.28	30.32	1.96	25.43	100
19	30.02	18.73	0.54	11.95	100
12.5	18.76	13.39	0.34	3.99	94.74
9.5	15.01	11.06	0.32	2.69	89.37
4.75	11.67	8.6	0.22	1.69	79.67
0.425	6.89	4.93	0.19	0.84	26.93
0.075	4.76	3.44	0.15	0.47	10.99



รูปที่ 4-2 ผล sieve ของ แม่ตานน้อย

4.2.3 ผลการทดสอบ Rock Type

ผลการทดสอบ Rock Type ของหินโรยทางพบว่าประกอบด้วยหิน 6 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4-3 โดยตัวอย่างต่างๆมีส่วนประกอบของหินชนิดต่างๆ (โดยน้ำหนัก) ดังตารางที่ 4-5



รูปที่ 4-3 ชนิดของหิน

ตารางที่ 4-5 ชนิดหินที่เป็นส่วนประกอบของแต่ละหน้าตัด

หน้าตัด	บริเวณ	%ต่อน้ำหนักของชนิดหิน					
		Rhyolite	Limestone	Shale	Sandstone	Quartzite	Granite
New ballast		80	9	3	1	5	2
แม่ตานน้อย	Ballast	70	18	0	2	10	0
	Sub ballast	70	30	0	0	0	0
	Crib	60	40	0	0	0	0
	Shoulder	50	15	0	10	10	15
	Sub grade 1	N.A					

4.2.4 ผลการทดสอบ Visual inspection

การตรวจสอบแบบ Visual inspection นี้ทำการทดสอบอย่างคร่าวๆด้วยสายตาเพื่อดูชนิดของหินและสิ่งที่ปนอยู่มากหรือน้อย โดยมีผลดังนี้

- Ballast: ส่วนของหินที่ค้ำตะแกรง #4 มีประมาณ 20% หินในส่วนนี้เป็นหิน Limestone ประมาณ 65%, Rhyolite 30% และอีก 5% เป็นหิน Quartzite
- Sub-ballast: ส่วนนี้ไม่ต่างจากชั้น Ballast มีเศษรากพืชปะปนอยู่ประมาณ 1%
- Crib: หินส่วนใหญ่เป็น Rhyolite มีผ่านตะแกรง #4 มีจำนวน 2-3%
- Shoulder: ส่วนใหญ่เป็นหิน Rhyolite และเช่นเดียวกับส่วนของ crib คือ หินผ่านตะแกรง #4 มีจำนวน 2-3%

4.2.5 ผลการทดสอบค่า Specific gravity

ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏ ด้วยวิธีชั่งในน้ำกับตัวอย่างขนาดใหญ่กว่า 9.5 มม. ได้แสดงในตารางที่ 4-6 จากตารางพบว่าค่าความถ่วงจำเพาะที่ได้มีค่า ตั้งแต่ 2.69 ถึง 2.73 ค่าความถ่วงจำเพาะน้อยที่สุดอยู่ที่บริเวณ Shoulder และค่ามากที่สุดอยู่ที่บริเวณ Sub-ballast และ Crib

ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบหาค่า Specific gravity ของตัวอย่างขนาดใหญ่กว่า 9.5 มม.

SG	Ballast	Sub-ballast	Crib	Shoulder	Sub-grade 1	Sub-grade 2
แม่ตานน้อย	2.70	2.73	2.73	2.69	N.A	N.A.

ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏ ด้วยวิธีชั่งในน้ำกับตัวอย่างขนาดระหว่าง 4.75 - 9.5 มม. ได้แสดงในตารางที่ 4-7 จากตารางพบว่าค่าความถ่วงจำเพาะที่ได้มีค่าตั้งแต่ 2.70 ถึง 2.73 ค่าความถ่วงจำเพาะน้อยที่สุดอยู่ที่บริเวณ Shoulder และค่ามากที่สุดอยู่ที่บริเวณ Ballast และ Sub ballast

ตารางที่ 4-7 ผลการทดสอบหาค่า Specific gravity ของตัวอย่างขนาดระหว่าง 4.75-9.5 มม.

SG	Ballast	Sub-ballast	Crib	Shoulder	Sub-grade 1	Sub-grade 2
แม่ตานน้อย	2.73	2.73	N.A	2.70	N.A	N.A.

ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏด้วยวิธี Pycnometer ตัวอย่างขนาดระหว่าง 0.075 – 4.75 มม. ได้แสดงในตารางที่ 4-8 จากตารางพบว่าค่าความถ่วงจำเพาะที่ได้มีค่าตั้งแต่ 2.63 ถึง 2.78 ค่าความถ่วงจำเพาะน้อยที่สุดอยู่ที่บริเวณ Sub grade1 และค่ามากที่สุดอยู่ที่บริเวณ Ballast

ตารางที่ 4-8 ผลการทดสอบหาค่า Specific gravity ของตัวอย่างขนาดระหว่าง 0.075-4.75 มม.

SG	Ballast	Sub-ballast	Crib	Shoulder	Sub-grade 1	Sub-grade 2
แม่ตานน้อย	2.78	2.77	N.A	2.70	2.63	

ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏ ด้วยวิธี Pycnometer ตัวอย่างขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. ได้แสดงในตารางที่ 4-9 จากตารางพบว่าค่าความถ่วงจำเพาะที่ได้มีค่าตั้งแต่ 2.71 ถึง 2.76 ค่าความถ่วงจำเพาะน้อยที่สุดอยู่ที่บริเวณ Sub grade 1 และค่ามากที่สุดอยู่ที่บริเวณ Ballast

ตารางที่ 4-9 ผลการทดสอบหาค่า Specific gravity ของตัวอย่างขนาดเล็กกว่า 0.075 มม.

SG	Ballast	Sub-ballast	Crib	Shoulder	Sub-grade 1	Sub-grade 2
แม่ตานน้อย	2.76	2.73	N.A	N.A	2.71	N.A.

4.2.6 ผลการทดสอบ Water Absorption

ผลการทดสอบ Water Absorption กับตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 9.5 มม. ได้แสดงในตารางที่ 4-10 จากตารางพบว่าค่าร้อยละการดูดซึมน้ำที่ได้มีค่าตั้งแต่ 0.26-0.80% ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดอยู่ที่บริเวณ Ballast และค่ามากที่สุดอยู่ที่บริเวณ Shoulder

ตารางที่ 4-10 ผลการทดสอบหาค่า Water Absorption

Water Absorption %	Ballast	Sub-ballast	Crib	Shoulder	Sub-grade 1	Sub-grade 2
แม่ตานน้อย	0.26	0.27	0.33	0.80	N.A	N.A.

4.2.7 ผลการทดสอบ Atterberg limit

ส่วนของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรง #40 จะถูกทำการทดสอบ Atterberg limit โดยมีผลการทดสอบดังนี้ (สรุปผลในตารางที่ 4-11)

- Ballast: มีค่า PL เท่ากับ 17.21%, LL เท่ากับ 32%, และ PI เท่ากับ 14.79% จึงสรุปว่าเป็นดินตะกอนทรายอนินทรีย์และดินทรายละเอียดมาก หินฝุ่น ทรายละเอียดปนตะกอนทรายหรือดินเหนียวมีความเหนียวเล็กน้อย (ML)
- Sub ballast: มีค่า PL เท่ากับ 18.25%, LL เท่ากับ 29.29%, และมีค่า PI เท่ากับ 11.04% จึงสรุปว่าเป็นดินตะกอนทรายอนินทรีย์ที่มีความเหนียวต่ำถึงปานกลาง ดินเหนียวกรวด ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนตะกอนทราย ดินเหนียวล้วน (CL)
- Crib: ไม่สามารถทำการทดสอบหาค่า PL, LL, และ PI ได้เนื่องจากปริมาณของดินที่ผ่านตะแกรง #40 มีน้อย ไม่เพียงพอต่อการทดสอบ
- Shoulder: ไม่สามารถทำการทดสอบหาค่า PL, LL, และ PI ได้เนื่องจากปริมาณของดินที่ผ่านตะแกรง #40 มีน้อย ไม่เพียงพอต่อการทดสอบ
- Sub grade 1: ไม่สามารถหาค่า PL และค่า PI ได้ เนื่องจากดินดังกล่าวไม่สามารถนำมาปั้นขึ้นรูปปฏิบัติให้เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบได้จึงสรุปว่าเป็นดิน non-plastic ส่วนค่า LL ได้ 28.60%

ตารางที่ 4-11 ผลการทดสอบหาค่า Atterberg limit

แม่ตานน้อย	ballast	Sub-ballast	Crib	Shoulder	Sub-grade 1
Liquid Limit	32.00	29.29	N.A	N.A	28.60
Plastic Limit	17.21	18.25	N.A	N.A	NP
Plasticity Index	14.79	11.04	N.A.	N.A.	-

4.2.8 ผลการทดสอบ Flat & Elongation

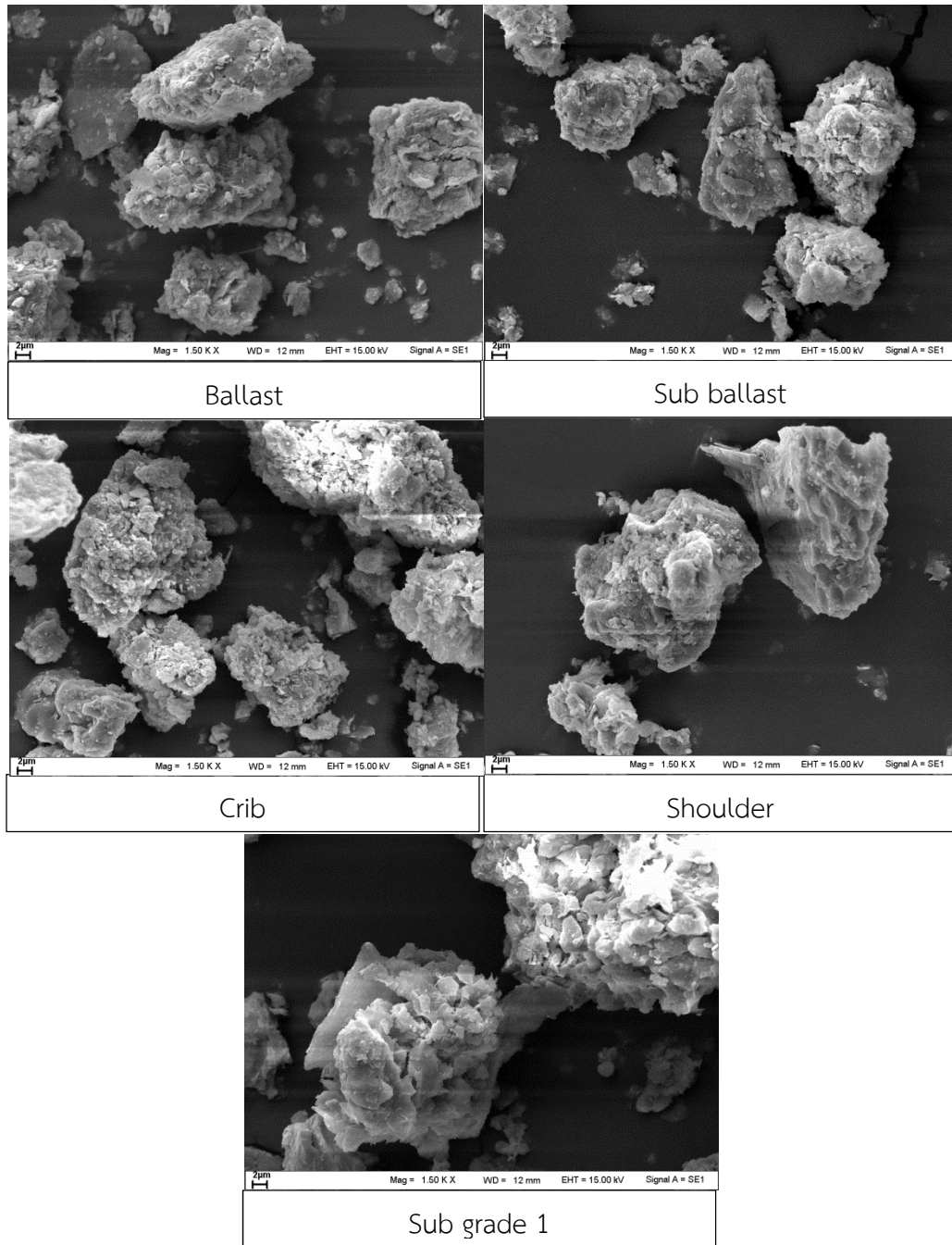
ผลการทดสอบ Flat & Elongation ที่อัตราส่วน 1:2 และ 1:3 ได้แสดงในตารางที่ 4-12 ซึ่งพบว่าตัวอย่างหินที่นำมาทดสอบ มีค่า %Flat น้อยกว่า %Elongation แสดงว่าหินส่วนมากมีค่าความแบนมากกว่าความอ้วน

ตารางที่ 4-12 ผลการทดสอบหาค่า Flat และ Elongation (เปอร์เซ็นต์อัตราส่วนน้ำหนัก)

หน้าตัด	บริเวณ	อัตราส่วน 1:2		อัตราส่วน 1:3	
		%Flat	%Elongation	%Flat	%Elongation
Clean Ballast		7.89	5.37	0	0.39
แม่ตานน้อย	Ballast	18.83	14.63	0	1.19
	Sub ballast	9.35	22.81	0	3.28
	Crib	6.83	13.26	0	2.09
	Shoulder	16.05	8.81	0.59	0.27
	Sub grade 1	N.A			

4.2.9 ผลการทดสอบ Scanning Electron Microscopy (SEM)

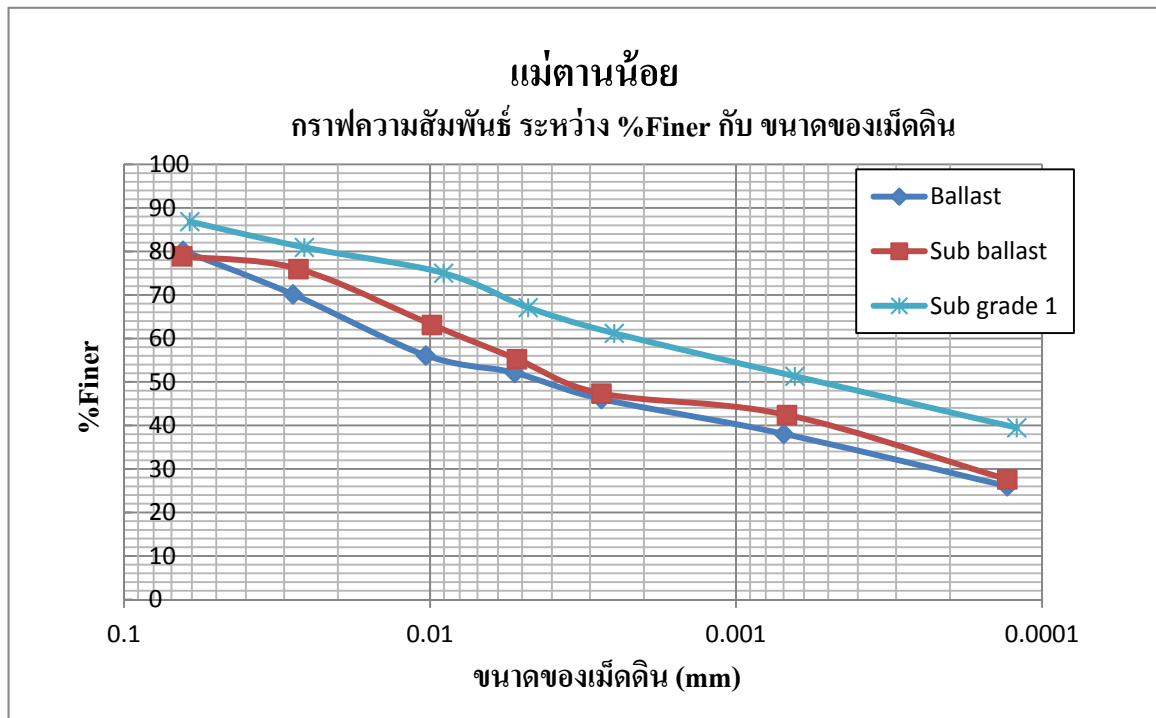
ผลการทดสอบ Scanning Electron Microscopy (SEM) (ขนาดขยาย 1500 เท่า) ของส่วนที่ผ่านตะแกรง #200 แสดงในรูปที่ 4-4 โดยพบว่าลักษณะรูปร่างของอนุภาคมีขนาดต่างกันเล็กน้อย ส่วนของ Sub grade 1 จะมีขนาดใหญ่กว่าส่วนอื่น



รูปที่ 4-4 ผลการทดสอบ SEM ขนาดขยาย 1500 เท่า ของแม่ตานน้อย

4.2.10 ผลการทดสอบ Hydrometer

ผลการทดสอบการหาขนาดของอนุภาคดินของส่วนที่ผ่านตะแกรง #200 ด้วย Hydrometer ชนิด 152H แสดงในตารางที่ 4-13 และรูปที่ 4-5 โดยพบว่าขนาดคละมีการกระจายกัน บริเวณ Sub grade 1 มีเม็ดดินขนาดเล็กมากกว่าบริเวณ Ballast และ Sub ballast



รูปที่ 4-5 กราฟเปรียบเทียบขนาดคละของอนุภาคดินทดสอบด้วย Hydrometer ของหน้าตัดแม่ตานน้อย

ตารางที่ 4-13 ตารางขนาดคละของอนุภาคดินและ %Finer ของหน้าตัดแม่ตานน้อย

Ballast		Sub ballast		Sub grade 1	
ขนาดเม็ดดิน	%Finer	ขนาดเม็ดดิน	%Finer	ขนาดเม็ดดิน	%Finer
0.0641	80.16	0.0647	78.93	0.0610	86.86
0.0280	70.14	0.0269	75.97	0.0257	80.93
0.0103	56.11	0.0099	63.14	0.0090	75.01
0.0053	52.10	0.0052	55.25	0.0048	67.12
0.0028	46.09	0.0028	47.36	0.0025	61.19
0.0007	38.07	0.0007	42.42	0.0006	51.32
0.0001	26.05	0.0001	27.62	0.0001	39.48

4.2.11 ผลการทดสอบ Los Angles abrasion

ผลการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C535 grade 2 แสดงในตารางที่ 4-14 ซึ่งพบว่ามีค่าตั้งแต่ 23.8% ถึง 30.3% และบริเวณที่มีค่า % การขัดสีมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ Sub ballast ส่วนบริเวณที่มีค่า % การขัดสีน้อยที่สุดอยู่ที่ Shoulder

ตารางที่ 4-14 ผลการทดสอบ Los Angles Abrasion

หน้าตัด	ค่าการทดสอบที่บริเวณ					
	Ballast	Sub ballast	Crib	Shoulder	Sub grade 1	Subgrade 2
แม่ตานน้อย	28.99	30.34	25.69	23.83	N.A	N.A.

4.2.12 ผลของการทดสอบ Aggregate Compression Value (ACV)

ผลการทดสอบ Aggregate Compression Value (ACV) กับตัวอย่างขนาด 9.5 – 12.5 มม.จำนวน 500 กรัม ได้แสดงในตารางที่ 4-15 ซึ่งพบว่าค่าตั้งแต่ 27.0% ถึง 30.8% บริเวณที่มีค่า %ACV สูงสุดอยู่ที่ Ballast และมีค่า %ACV น้อยที่สุดอยู่ที่บริเวณ Shoulder

ตารางที่ 4-15 ผลการทดสอบ Aggregate Compression Value

หน้าตัด	ค่าการทดสอบที่บริเวณ					
	Ballast	Sub ballast	Crib	Shoulder	Sub grade 1	Subgrade 2
แม่ตานน้อย	30.80	29.19	N.A	27.04	N.A	N.A

4.2.13 ผลของการทดสอบ Aggregate Impact Value (AIV)

ผลการทดสอบ Aggregate Impact Value (AIV) กับตัวอย่างขนาด 9.5 – 12.5 มม.จำนวน 500 กรัม ได้แสดงในตารางที่ 4-16 โดยพบว่าค่าที่ได้มีค่าตั้งแต่ 11.3% ถึง 12.3% และบริเวณที่มีค่า %AIV มากที่สุดคือ Sub ballast และบริเวณที่มีค่า %AIV น้อยที่สุดคือ Shoulder

ตารางที่ 4-16 ผลการทดสอบ Aggregate Impact Value

หน้าตัด	ค่าการทดสอบที่บริเวณ					
	Ballast	Sub ballast	Crib	Shoulder	Sub grade 1	Subgrade 2
แม่ตานน้อย	11.45	12.31	N.A	11.33	N.A	N.A

4.2.14 ผลการทดลอง Sulfate soundness

ผลการทดลอง Sulfate soundness ได้แสดงในตารางที่ 4-17 ซึ่งพบว่าค่าตั้งแต่ 2.0% ถึง 4.7% และบริเวณที่มีค่า %Soundness มากที่สุดอยู่ที่ Sub ballast ส่วนบริเวณที่มีค่า %Soundness น้อยที่สุดคือ Shoulder

ตารางที่ 4-17 ผลการทดสอบ Sulfate soundness

หน้าตัด	ค่าการทดสอบที่บริเวณ					
	Ballast	Sub ballast	Crib	Shoulder	Sub grade 1	Subgrade 2
แม่ตานน้อย	3.73	4.70	2.71	1.98	N.A	N.A

4.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐาน

4.3.1 การเปรียบเทียบกับ Specification for track ballast ของประเทศอินเดีย

จากตารางที่ 4-18 ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Ballast เปรียบเทียบกับมาตรฐาน Ballast ของอินเดีย พบว่ามีค่า

- การทดสอบ Los Angles, Aggregate Impact Value มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Sulfate Soundness มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Water absorption ของ New Ballast มีค่าไม่ได้มาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis ของ Ballast ที่ผ่านการใช้งานมีค่าไม่ตรงตามมาตรฐานของอินเดีย

ตารางที่ 4-18 ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบ Ballast กับมาตรฐานของประเทศอินเดีย

		แม่ตานน้อย	new ballast
Los Angles	ไม่ควรเกิน 30%	28.99	20.49
AIV	ไม่ควรเกิน 20%	11.45	N.A
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1%	0.26	1.25
Sulfate soundness	ไม่ควรเกิน 5%	3.73	N.A
Sieve			
ค้ำ 65 มม.	ไม่ควรเกิน 5%	2.22	0
ค้ำ 40 มม.	40-60%	20.78	86.59
ค้ำ 20 มม.	ไม่น้อยกว่า 98% (บดโดยเครื่องจักร)	69.98	99.41
	ไม่น้อยกว่า 95% (บดโดยทุบ)	69.98	99.41

จากตารางที่ 4-19 ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Crib เปรียบเทียบกับมาตรฐาน Ballast ของอินเดีย พบว่ามีค่า

- การทดสอบ Los Angles มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Aggregate Impact Value มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Water absorption มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Sulfate Soundness มีค่าตรงตามมาตรฐาน

- การทดสอบ Sieve analysis มีค่าไม่ตรงตามมาตรฐาน

ตารางที่ 4-19 ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบ Crib กับมาตรฐานของประเทศอินเดีย

		แม่ตานน้อย
Los Angles	ไม่ควรเกิน 30%	25.69
AIV	ไม่ควรเกิน 20%	N.A
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1%	0.33
Sulfate soundness	ไม่ควรเกิน 5%	2.71
Sieve		
ค้ำ 65 มม.	ไม่ควรเกิน 5%	0
ค้ำ 40 มม.	40-60%	64.09
ค้ำ 20 มม.	ไม่น้อยกว่า 98% (บดโดยเครื่องจักร)	99.46
	ไม่น้อยกว่า 95% (บดโดยทุบ)	99.46

จากตารางที่ 4-20 ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Shoulder เปรียบเทียบกับมาตรฐาน Ballast ของอินเดีย พบว่ามี

- การทดสอบ Los Angles อยู่ในมาตรฐาน
- การทดสอบ Aggregate Impact Value อยู่ในมาตรฐาน
- การทดสอบ Water absorption อยู่ในมาตรฐาน
- การทดสอบ Sulfate Soundness อยู่ในมาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis มีค่าไม่ตรงตามมาตรฐาน

ตารางที่ 4-20 ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบ Shoulder กับมาตรฐานของประเทศอินเดีย

		แม่ตานน้อย
Los Angles	ไม่ควรเกิน 30%	23.83
AIV	ไม่ควรเกิน 20%	11.33
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1%	0.80
Sulfate soundness	ไม่ควรเกิน 5%	1.98
Sieve		
ค้ำ 65 มม.	ไม่ควรเกิน 5%	0
ค้ำ 40 มม.	40-60%	28.88
ค้ำ 20 มม.	ไม่น้อยกว่า 98% (บดโดยเครื่องจักร)	88.05
	ไม่น้อยกว่า 95% (บดโดยทุบ)	88.05

4.3.2 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบกับมาตรฐานของ Australian rail track

จากตารางที่ 4-21 ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Ballast เปรียบเทียบกับมาตรฐาน Ballast ของ Australian rail track พบว่า

- การทดสอบ Flat & Elongation มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Los Angles มีค่าไม่ได้มาตรฐาน
- การทดสอบ Aggregate compression value ของแม่ตานน้อยรวมถึง New Ballast มีค่าไม่ได้มาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis ของแม่ตานน้อยรวมถึง New Ballast มีค่าไม่ได้มาตรฐาน

ตารางที่ 4-21 ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบ Ballast กับมาตรฐาน Australian rail track

		แม่ตานน้อย	new ballast
Los Angles	ไม่ควรเกิน 25%	28.99	20.49
Flat & Elongation (1:2)	ไม่ควรเกิน 30%	Flat	7.89
		Elongation	5.36
Aggregate compression value	ไม่ควรเกิน 25%	30.80	37.21
Sieve			
ผ่าน 63 มม.	100%	100	100
ผ่าน 53 มม.	85-100%	97.78	71.26
ผ่าน 37.5 มม.	20-60%	79.22	13.41
ผ่าน 26.5 มม.	0-20%	44.28	2.81
ผ่าน 19 มม.	0-5%	30.02	0.61
ผ่าน 13.2 มม.	0-2%	18.76	0.61
ผ่าน 4.75 มม.	0-1%	15.01	0.47
ผ่าน 0.075 มม.	0-1%	4.76	0

จากตารางที่ 4-22 ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Crib เปรียบเทียบกับมาตรฐาน Ballast ของ Australian rail track พบว่า

- การทดสอบ Flat & Elongation มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Los Angles มีค่าไม่ได้มาตรฐาน
- การทดสอบ Aggregate compression value มีค่าไม่ได้มาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis มีค่าไม่ตรงตามมาตรฐาน

ตารางที่ 4-22 ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบ Crib กับมาตรฐาน Australian rail track

		แม่ตานน้อย	
Los Angles	ไม่ควรเกิน 25%	25.69	
Flat & Elongation (1:2)	ไม่ควรเกิน 30%	Flat	6.83
		Elongation	13.26
Aggregate compression value	ไม่ควรเกิน 25%	N.A	
Sieve			
ผ่าน 63 มม.	100%	100	
ผ่าน 53 มม.	85-100%	78.63	
ผ่าน 37.5 มม.	20-60%	35.91	
ผ่าน 26.5 มม.	0-20%	1.96	
ผ่าน 19 มม.	0-5%	0.54	
ผ่าน 13.2 มม.	0-2%	0.34	
ผ่าน 4.75 มม.	0-1%	0.22	
ผ่าน 0.075 มม.	0-1%	0.15	

จากตารางที่ 4-23 ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Shoulder เปรียบเทียบกับมาตรฐาน Ballast ของ Australian rail track พบว่า

- การทดสอบ Flat & Elongation มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Los Angles มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Aggregate compression value มีค่าไม่ได้มาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis มีค่าไม่ตรงตามมาตรฐานของ Australian rail track

ตารางที่ 4-23 ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบ Shoulder กับมาตรฐาน Australian rail track

		แม่ตานน้อย	
Los Angles	ไม่ควรเกิน 25%	23.83	
Flat & Elongation (1:2)	ไม่ควรเกิน 30%	Flat	16.05
		Elongation	8.81
Aggregate compression value	ไม่ควรเกิน 25%	27.04	
Sieve			
ผ่าน 63 มม.	100%	100	
ผ่าน 53 มม.	85-100%	96.23	
ผ่าน 37.5 มม.	20-60%	71.12	
ผ่าน 26.5 มม.	0-20%	25.43	
ผ่าน 19 มม.	0-5%	11.95	
ผ่าน 13.2 มม.	0-2%	3.99	
ผ่าน 4.75 มม.	0-1%	0.84	
ผ่าน 0.075 มม.	0-1%	0.47	

4.3.3 การเปรียบเทียบผลที่ได้กับค่ามาตรฐานของ American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association (AREMA)

จากตารางที่ 4-24 ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Ballast เปรียบเทียบกับมาตรฐาน Ballast ของ American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association (AREMA) พบว่า

- การทดสอบ Los Angles มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Flat & Elongation มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Water absorption ค่าตรงตามมาตรฐาน ยกเว้นส่วนของ New Ballast มีค่าเกินมาตรฐาน
- การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ มีค่าได้ตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis ของ New Ballast มีค่าตรงตามมาตรฐาน ส่วนของแม่ตานน้อย มีค่าไม่ตรงตามมาตรฐาน

ตารางที่ 4-24 ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบของ Ballast กับมาตรฐาน American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association (AREMA)

		แม่ตานน้อย	new ballast
Los Angles	ไม่ควรเกิน 30%	28.99	20.49
Flat & Elongation (1:3)	ไม่ควรเกิน 5%	Flat	0
		Elongation	1.19
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1%	0.26	1.25
Specific gravity	ไม่น้อยกว่า 2.6	2.70	2.62
Sulfate soundness	ไม่ควรเกิน 5%	3.73	N.A
Sieve			
ผ่าน #200(0.075 มม.)	ไม่ควรเกิน 1%	4.76	0

จากตารางที่ 4-25 ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Crib เปรียบเทียบกับมาตรฐาน Ballast ของ American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association (AREMA) พบว่า

- การทดสอบ Los Angles มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Flat & Elongation มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Water absorption ค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ มีค่าได้ตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis มีค่าตรงตามมาตรฐาน

ตารางที่ 4-25 ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบของ Crib กับมาตรฐาน American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association (AREMA)

		แม่ตานน้อย	
Los Angles	ไม่ควรเกิน 30%	25.69	
Flat & Elongation (1:3)	ไม่ควรเกิน 5%	Flat	0
		Elongation	2.09
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1%	0.33	
Specific gravity	ไม่น้อยกว่า 2.6	2.73	
Sulfate soundness	ไม่ควรเกิน 5%	2.71	
Sieve			
ผ่าน #200(0.075 มม.)	ไม่ควรเกิน 1%	0.15	

จากตารางที่ 4-26 ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Shoulder เปรียบเทียบกับมาตรฐาน Ballast ของ American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association (AREMA) พบว่า

- การทดสอบ Los Angles มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Flat & Elongation มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Water absorption ค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ มีค่าได้ตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis มีค่าตรงตามมาตรฐาน

ตารางที่ 4-26 ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบของ Shoulder กับมาตรฐาน American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association (AREMA)

		แม่ตานน้อย	
Los Angles	ไม่ควรเกิน 30%	23.83	
Flat & Elongation (1:3)	ไม่ควรเกิน 5%	Flat	0.59
		Elongation	0.27
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1%	0.80	
Specific gravity	ไม่น้อยกว่า 2.6	2.69	
Sulfate soundness	ไม่ควรเกิน 5%	1.98	
Sieve			
ผ่าน #200 (0.075 มม.)	ไม่ควรเกิน 1%	0.47	

4.3.4 สรุปผลการเปรียบเทียบ

จากการนำผลการทดสอบ Ballast, Crib, และShoulder ไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานพบว่า เมื่อผ่านการใช้งานมาส่วนที่มีการสึกหรอทำให้มีคุณสมบัติไม่ตรงตามมาตรฐานมากที่สุดคือส่วน Ballast รองลงมาคือ Shoulder ส่วนของ Crib นั้นเป็นส่วนที่มีความสึกหรอน้อยที่สุด

4.4 การวิเคราะห์การปนเปื้อน

ตารางที่ 4-27 แสดงผลจากการคำนวณค่าการปนเปื้อนจากทั้ง 3 สมการ และเมื่อนำค่านี้มาประเมินระดับการปนเปื้อนจะได้ดังรูปที่ 4-6 ถึง 4-7 และสรุปได้ดังตารางที่ 4-28 ซึ่งพบว่า

- จากสมการ Fouling Index ค่าที่ได้สรุปผลว่าตัวอย่างมีการปนเปื้อนอยู่ 3 ระดับคือ สะอาด สะอาดปานกลาง ปนเปื้อนเล็กน้อย
- จากสมการ เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนในช่องว่าง ค่าที่ได้สรุปว่าตัวอย่างไม่มีการปนเปื้อนอยู่เลย
- จากสมการ Relative Ballast fouling ratio ค่าที่ได้สรุปผลว่าตัวอย่างมีการปนเปื้อนอยู่ 3 ระดับคือ สะอาด สะอาดปานกลาง ปนเปื้อนเล็กน้อย

ตารางที่ 4-27 ตารางแสดงค่าการปนเปื้อนที่ได้จากวิธี Fouling Index, Relative Ballast fouling ratio, และ %PVC

หน้าตัด	บริเวณ	ผลการทดสอบ		
		%Fouling Index	%การปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC)	%Relative Ballast fouling ratio
Clean Ballast		0.47	N.A	0.14
แม่ตาน น้อย	Ballast	16.43	6.90	17.31
	Sub ballast	12.04	5.20	12.34
	Crib	0.37	0.15	0.33
	Shoulder	2.16	1.08	2.75

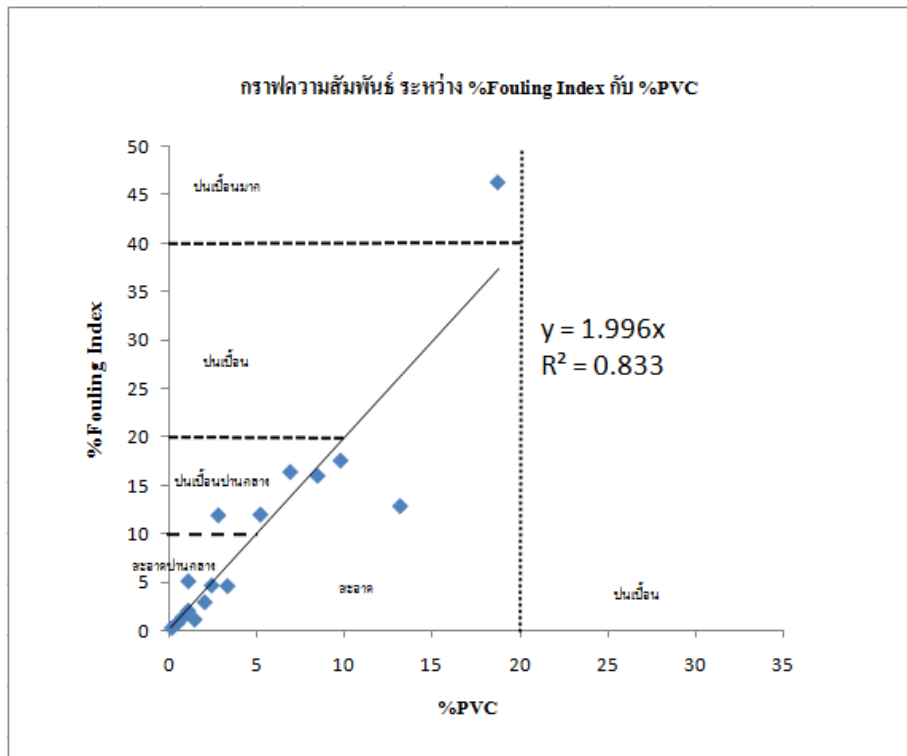
ตารางที่ 4-28 ตารางสรุปการปนเปื้อนที่ได้จากวิธี Fouling Index, PVC, และ Relative Ballast fouling ratio

หน้าตัด	บริเวณ	ผลการทดสอบ		
		%Fouling Index	%การปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC)	%Relative Ballast fouling ratio
Clean Ballast		สะอาด	N.A	สะอาด
แม่ตาน น้อย	Ballast	ปนเปื้อนเล็กน้อย	สะอาด	ปนเปื้อนเล็กน้อย
	Sub ballast	ปนเปื้อนเล็กน้อย	สะอาด	ปนเปื้อนเล็กน้อย
	Crib	สะอาด	สะอาด	สะอาด
	Shoulder	สะอาดปานกลาง	สะอาด	สะอาดปานกลาง

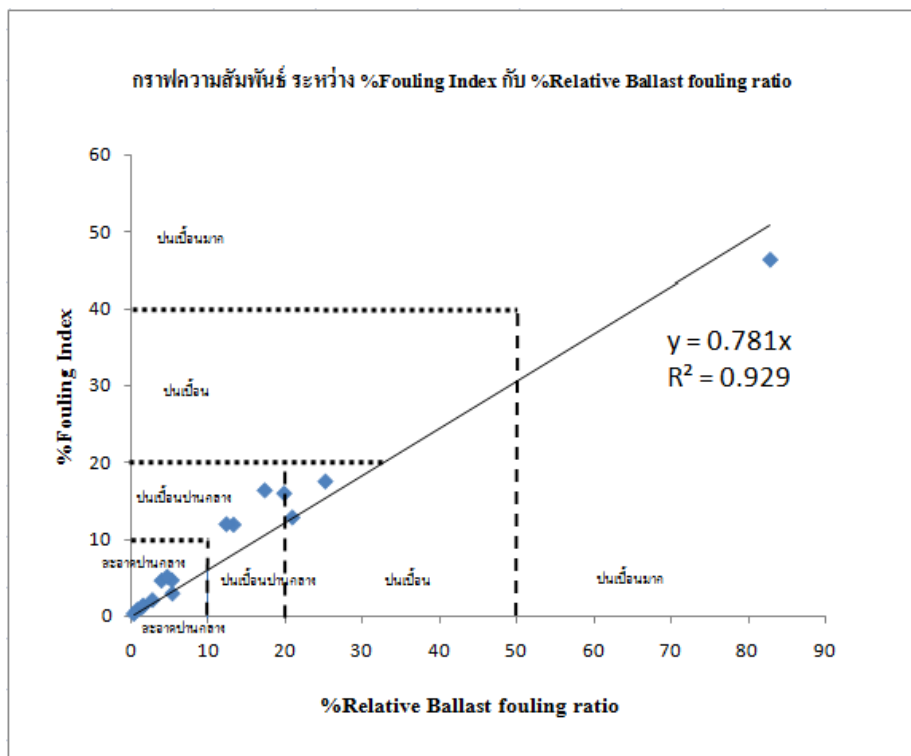
จากรูปที่ 4-6 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากสมการ Fouling Index และค่าที่ได้จากสมการ เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนในช่องว่างมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังสมการ $y = 1.9969x$ โดยสมการนี้ค่า x สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า y ได้ 83.39%

จากรูปที่ 4-7 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากสมการ Fouling Index และค่าที่ได้จากสมการ Relative Ballast fouling ratio มีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรงดังสมการ $y = 0.781x$ โดยสมการนี้ค่า x สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า y ได้ 92.90%

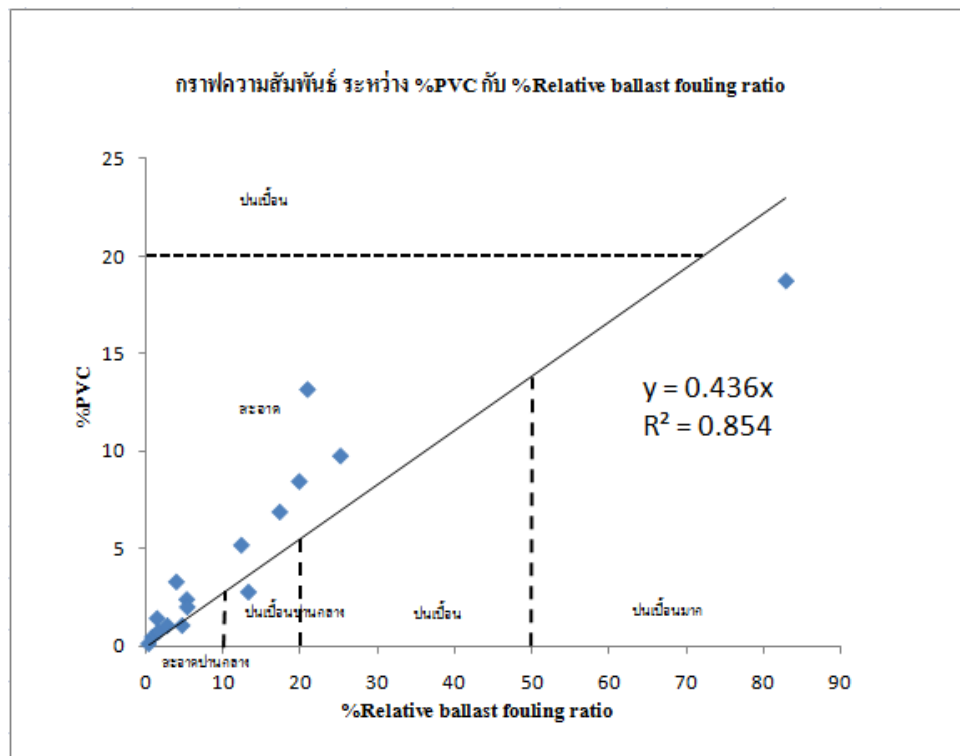
จากรูปที่ 4-8 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากสมการการเปอร์เซ็นต์ปนเปื้อนในช่องว่าง และค่าที่ได้จากสมการการ Relative Ballast fouling ratio มีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรงดังสมการ $y = 0.436x$ โดยสมการนี้ค่า x สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า y ได้ 85.40%



รูปที่ 4-6 ค่า Fouling index กับ %PVC



รูปที่ 4-7 ค่า Fouling Index กับ Relative Ballast fouling ratio



รูปที่ 4-8 ค่า Relative ballast fouling ratio กับ %PVC

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยเรื่องการศึกษากลไกสาเหตุการเสื่อมสภาพของทางรถไฟ มีวัตถุประสงค์ในการศึกษากลไกและหาสาเหตุของการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง ที่ใช้สำหรับทางรถไฟสายเหนือว่าสาเหตุหลักในการเสื่อมสภาพของวัสดุรองทางรถไฟเกิดจากสาเหตุใด การวิจัยนี้จะเป็นส่วนช่วยในการออกแบบโครงสร้างทางรถไฟและช่วยกำหนดคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ เพื่อให้การก่อสร้างและการบำรุงรักษาทางรถไฟมีความประหยัดขึ้นและเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการเดินทาง

ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษากลไกและหาสาเหตุของการเสื่อมสภาพของหินโรยทางโดยการเก็บตัวอย่างจำนวนจากบริเวณสถานีแม่ตานน้อย ซึ่งทำการเก็บตัวอย่าง 6 ส่วน ได้แก่ ส่วน Ballast, Sub ballast, Crib, Shoulder, Sub grade 1, และ Sub grade 2 ทำการเก็บตัวอย่างละ 40 กิโลกรัม ซึ่งก่อนทำการเก็บตัวอย่างผู้วิจัยได้ทำการทดสอบในภาคสนามจำนวน 3 การทดสอบ ได้แก่ การทดสอบหาความหนาแน่นของดินในสนาม การทดสอบหาค่าความชื้น และการสำรวจสภาพทางรถไฟ ตัวอย่างที่เก็บมาจะมาทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการจำนวน 13 การทดสอบ ได้แก่ Sieve Analysis, Rock type, Visual inspection, Specific gravity, Water Absorption, Atterberg limit, Flat and Elongation, SEM photograph, Hydrometer, Los Angeles abrasion, Aggregate Compression Value, Aggregate Impact Value, และ Sulfate soundness นอกจากนี้ยังเก็บตัวอย่างของ New ballast นำไปทดสอบ Sieve Analysis, Specific gravity, Water Absorption, Flat and Elongation, Los Angeles abrasion, และ Aggregate Compression Value ค่าที่ได้จากการทดสอบจะนำไปหาค่าการปนเปื้อน และวิเคราะห์หาสาเหตุหลักของการปนเปื้อน

การหาค่าการปนเปื้อนในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการหาค่าการปนเปื้อนเปรียบเทียบกัน 3 สมการ ได้แก่ สมการ Fouling Index (Selig & Waters, 1994), สมการเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนในช่องว่าง (Feldman & Nissen, 2002), และสมการ Relative Ballast fouling ratio (Indraratna et al., 2011) เมื่อทำการทดสอบหาค่าการปนเปื้อนพบว่า ค่าการปนเปื้อนที่ได้ของทั้งสามสมการมีค่าที่แตกต่างกัน โดยพบว่าสมการเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนในช่องว่างเป็นสมการที่ให้ความละเอียดน้อยที่สุดการหาค่าทำได้ค่อนข้างยุ่งยากและให้ผลสรุปค่าที่มีช่วงกว้างมากจึงถือว่าสมการนี้เมื่อเทียบกับสองสมการที่เหลือถือว่าไม่เหมาะสม ต่อมาคือสมการ Fouling Index เป็นสมการที่คำนวณได้ง่ายและรวดเร็วและพบว่าการใช้สมการนี้เหมาะสำหรับการปนเปื้อนที่มี %Passing ตะแกรง #4 รวมกับ %Passing ตะแกรง #200 มีค่าน้อยกว่า 20% หากค่าที่ได้เกินควรใช้สมการ Relative Ballast fouling ratio ในการคำนวณหาค่าความปนเปื้อนเนื่องจาก ผลการทดสอบพบว่า การใช้สมการ Relative Ballast fouling ratio ให้ผลค่าการปนเปื้อนที่ได้มีความละเอียดมากกว่าสมการ Fouling Index

การวิเคราะห์หาสาเหตุหลักของการปนเปื้อนของหน้าตัดแม่ตานน้อยโดยการวิเคราะห์จากผลการทดลองทั้งในภาคสนามและผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เป็นดังนี้

- จากการทดสอบ Sieve analysis พบว่า Ballast มีส่วนละเอียดปนเปื้อนมากกว่า Sub ballast

- จากการทดสอบ Atterberg limit ผลของส่วนละเอียด Ballast เป็นดินตะกอนทรายอนินทรีย์และดินทรายละเอียดมาก หินฝุ่น ทรายละเอียดปนตะกอนทราย หรือดินเหนียวมีความเหนียวเล็กน้อย (ML) ต่างกับชั้น Sub ballast ซึ่งเป็นดินตะกอนทรายอนินทรีย์ที่มีความเหนียวต่ำถึงปานกลาง ดินเหนียวกรวด ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนตะกอนทราย ดินเหนียวล้วน (CL) แสดงว่าส่วนละเอียดส่วนใหญ่ใน Ballast ไม่ได้มาจากการแทรกซึมจากชั้นดินด้านล่าง
- จากผลการทดสอบด้านความคงทนของหินขนาดใหญ่กว่า 9.5 มม. พบว่าค่าความคงทนจากการทดสอบมีค่าเฉลี่ยเกินกว่ามาตรฐาน
- จากผลการทดสอบ specific gravity ค่าที่ได้ของ Ballast ทุกส่วน มีค่าใกล้เคียงกันมาก
- ดังนั้น สาเหตุหลักของการปนเปื้อนใน ของหน้าตัดแม่ตานน้อย มีแนวโน้มเกิดจากการการกัดสีการทำลายของ Ballast (Ballast breakdown)

ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

- การเลือกใช้วัสดุ Ballast วัสดุใหม่ควรมีคุณสมบัติดังนี้ ผลการทดสอบ Los Angles Abrasion ไม่เกิน 25% การทดสอบ Aggregate compression value ไม่เกิน 25% การทดสอบ Water Absorption ไม่เกิน 1% การปนเปื้อนของส่วนละเอียดไม่ควรเกิน 1%
- ในการสร้างทางรถไฟควรมีการคำนึงถึงปัญหาการแทรกซึมปนเปื้อนของดินจากชั้นดินเดิม เพราะเป็นปัญหาที่พบเจอในทุกหน้าตัดจากการวิจัย ควรมีการเลือกใช้วัสดุป้องกันการแทรกซึมที่ดีในชั้น Sub ballast เพื่อป้องกันการแทรกซึม หากป้องกันการแทรกซึมได้จะทำให้อายุการใช้งานที่ยาวนานมากขึ้น
- หากต้องการความแน่ชัดในสาเหตุการปนเปื้อนของ Ballast ควรทำการทดสอบวิเคราะห์ธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDX) ในดินที่ปนเปื้อนเพื่อเปรียบเทียบหาแหล่งที่มา

เอกสารอ้างอิง

“ขนาดความกว้างรางรถไฟ”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://th.wikipedia.org/wiki/ขนาดความกว้างรางรถไฟ> 2013.

“หมอนรองรางรถไฟ”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://th.wikipedia.org/wiki/หมอนรองรางรถไฟ> 2013.

Buddhima Indraratna, Li-jun Su, Cholachat Rujikiatkamjorn. A new parameter for classification and evaluation of railway ballast fouling. 2011.

Ernest T. Selig, John M. Waters. Track geotechnology and substructure management.

London : Thomas Telford Service Ltd, 1994.

Feldman, Frank and Nissen, Darryl. Alternative Testing Method for the Measurement of Ballast Fouling : Percentage Void Contamination. In proceeding of the Conference on Railway Engineering, Wollongong, Australia, 10-13 November 2002. Railway technical Society of Australia, Canberra, Australia. pp. 101-109. อ้างถึงใน Buddhima Indraratna, Li-jun Su, Cholachat Rujikiatkamjorn. A new parameter for classification and evaluation of railway ballast fouling. 2011.

ผลผลิต

สยาม ยัมศิริ และ สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวังษ์ (2559), “สภาพฐานรากของทางรถไฟสายเหนือบริเวณ จ.ลำพูน”,
การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21, จัดโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย



สภาพฐานรากของทางรถไฟสายเหนือบริเวณ จ.ลำพูน Conditions of railway substructure in Lamphun

สยาม ยิ้มศิริ^{1*} และ สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวัชร¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาพฐานรากของทางรถไฟสายเหนือบริเวณสถานีขุนตาน อ.แม่ทา จ.ลำพูน โดยเก็บตัวอย่างวัสดุฐานรากที่จุดต่างๆของหน้าตัดแล้วทำการจำแนกเป็น coarse aggregate, coarse fouling, และ fine fouling เพื่อนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการดังนี้ sieve analysis, hydrometer, specific gravity, water absorption, Los Angeles abrasion, aggregate compression value, aggregate impact value, flat and elongation, sulfate soundness, Atterberg limit, และ scanning electron microscopy นอกจากนี้ยังทำการทดสอบในสนามที่จุดต่างๆของหน้าตัดดังนี้ unit weight และ water content ผลการทดสอบแสดงถึงสภาพฐานรากของทางรถไฟและได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานทางรถไฟของประเทศสหรัฐอเมริกา ผลการทดสอบได้ใช้ในการวิเคราะห์การปนเปื้อนของหินโรยทางด้วยทฤษฎีต่างๆเพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงปริมาณของความเหมาะสมในการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ส่วนประกอบของวัสดุปนเปื้อนเพื่อศึกษาโอกาสการเสื่อมสภาพของฐานรากของทางรถไฟ

คำสำคัญ: วิศวกรรมปฐพีเกี่ยวกับทางรถไฟ, หินโรยทาง, การปนเปื้อนของหินโรยทาง, การบำรุงรักษาทาง, ฐานรากของทางรถไฟ

Abstract

This research investigates conditions of railway substructures at Khuntan Station, Maetar District, Lamphun Province. The specimens are collected from railway substructure at several points in a cross-section. The specimens are subjected to laboratory tests as follows: sieve analysis, hydrometer, specific gravity, water absorption, Los Angeles abrasion, aggregate compression value, aggregate impact value, flat and elongation,

sulfate soundness, Atterberg limit, and scanning electron microscopy. In-situ tests, i.e. unit weight and water content, are also performed at these locations in a cross-section. Test results indicate substructure conditions of Northern line railway and they are compared with AREMA standard. The results are employed to analyze ballast fouling characteristics by various theories to obtain quantitative indexes of the quality of ballast. Moreover, fouling materials are investigated to reveal the mechanism of railway sub-structure deterioration.

Keywords: railway geotechnology, ballast, ballast fouling, track maintenance, railway substructure

1. บทนำ

การขนส่งทางรางเป็นรูปแบบการขนส่งที่ปลอดภัยที่สุดเมื่อขนส่งในปริมาณที่เท่ากัน รวมทั้งประหยัดพลังงานและก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ตารางที่ 1 แสดงว่าการใช้รถไฟขนส่งสินค้าจะประหยัดพลังงานกว่าการใช้รถบรรทุก 3.5-4.5 เท่า หรือการใช้รถไฟขนส่งผู้โดยสารจะประหยัดพลังงานกว่าการใช้รถโดยสารสาธารณะและรถโดยสารส่วนบุคคล 1.7-2.0 และ 5.0 เท่าตามลำดับ นอกจากนี้ระบบรถไฟใช้ที่ดินเพื่อก่อสร้างน้อยกว่าระบบขนส่งอื่น เช่น รถไฟรางคู่จะมีขีดความสามารถในการขนส่งมากกว่าถนน 6 ช่องจราจร จึงใช้ทรัพยากรที่ดินของประเทศในการก่อสร้างโครงสร้างการขนส่งน้อยกว่า

ตารางที่ 1 การใช้พลังงานของระบบขนส่งทางบกต่างๆ [1]

	รถไฟ	รถเมล์	เครื่องบิน	รถยนต์
ดัชนีการใช้พลังงานเปรียบเทียบ	100	176	409	587
การปล่อย CO ₂ เปรียบเทียบ	100	413	643	949

ปัจจุบันโครงข่ายรถไฟในประเทศไทยมีระยะทางรวม 4,043 กิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่บริการ 47 จังหวัด และส่วนใหญ่เป็นทางเดี่ยวคือ 3,763 กิโลเมตร อีกทั้งโครงข่ายทางรถไฟมีสภาพทรุดโทรมขาดการซ่อมบำรุงและลงทุนพัฒนาเพิ่มเติม โดยมากกว่า 60% ของทางมีอายุเฉลี่ยเกิน 30 ปีขึ้นไป

* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

E-mail address: ysiam@buu.ac.th

ไป ตารางที่ 2 แสดงรายงานคุณภาพของโครงสร้างพื้นฐานจาก World Economic Forum ประจำปี 2556-2557 ซึ่งแสดงว่าคุณภาพของโครงสร้างพื้นฐานในภาพรวมของประเทศไทยถูกจัดอยู่ในลำดับที่ 61 ต่ำกว่าประเทศสิงคโปร์และมาเลเซียซึ่งอยู่ในอันดับที่ 5 และ 25 ตามลำดับ และคุณภาพของโครงสร้างพื้นฐานทางรถไฟของประเทศไทยถูกจัดในลำดับที่ 72 ต่ำกว่าประเทศสิงคโปร์และมาเลเซียซึ่งอยู่ในอันดับที่ 10 และ 18 ตามลำดับ และจะสังเกตว่าคุณภาพของโครงสร้างพื้นฐานทางรถไฟของประเทศไทยมีอันดับต่ำที่สุดในระบบโครงสร้างพื้นฐานทางการคมนาคมขนส่งทั้งหมด

ตารางที่ 2 ผลการประเมินคุณภาพโครงสร้างพื้นฐาน

ประเทศ	อันดับการประเมินคุณภาพโครงสร้างพื้นฐาน				
	ภาพรวม	ถนน	รถไฟ	สนามบิน	ท่าเรือ
สิงคโปร์	5	7	10	1	2
มาเลเซีย	25	23	18	21	24
ไทย	61	52	72	34	56

ที่มา: World Economic Forum (2013-2014)

ระบบทางรถไฟเป็นโครงสร้างพื้นฐานทางด้านการขนส่งที่สำคัญต่อระบบเศรษฐกิจ ทางรถไฟต้องสามารถให้การขนส่งที่ปลอดภัยและประหยัด ดังนั้นโครงสร้างทางรถไฟต้องมีความแข็งแรงและมีเสถียรภาพที่เหมาะสม การทำงานของโครงสร้างทางรถไฟเป็นปฏิสัมพันธ์อย่างซับซ้อนของส่วนประกอบต่างๆต่อแรงกระทำจากรถไฟ ในอดีตส่วน superstructure (ประกอบด้วย rail, fastener, และ sleeper) ได้รับความสนใจศึกษาอย่างมาก แต่ส่วนฐานรากหรือ substructure (ประกอบด้วย ballast, subballast, และ subgrade) ได้รับความสนใจน้อยกว่ามากถึงแม้ว่ามันจะมีผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอย่างมาก ในการออกแบบทางรถไฟและการวางแผนการบำรุงรักษาโดยเฉพาะที่เกี่ยวกับ substructure มักอาศัยประสบการณ์ (empirical) เนื่องจากคุณสมบัติของส่วน substructure มีความแปรปรวนมากกว่า

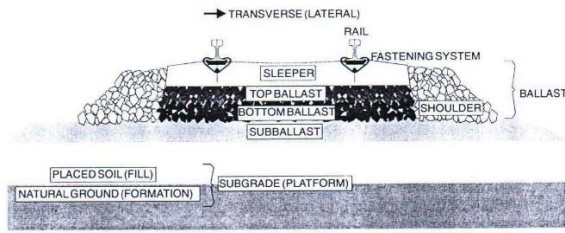
งานวิจัยนี้ศึกษาสภาพฐานรากของทางรถไฟสายเหนือ โดยการเก็บตัวอย่างวัสดุฐานรากที่จุดต่างๆของหน้าตัดและทำการทดสอบในสนามและในห้องปฏิบัติการ จากนั้นทำการวิเคราะห์การปนเปื้อนของหินโรยทางโดยทฤษฎีต่างๆเพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงปริมาณถึงความเหมาะสมในการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ส่วนประกอบของวัสดุปนเปื้อนเพื่อศึกษาผลกระทบสัมภาพของฐานรากของทางรถไฟ

2. ส่วนประกอบของทางรถไฟ

รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบสำคัญของโครงสร้างทางรถไฟซึ่งสามารถจัดเป็น 2 กลุ่มคือ superstructure (ประกอบด้วย rail, fastener, และ sleeper) และฐานรากหรือ substructure (ประกอบด้วย ballast, subballast, และ subgrade) โดยรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆของโครงสร้างทางรถไฟเป็นดังนี้

- ราง (rail): เป็นคานถ่ายแรงเป็นจุดจากล้อไปสู่หมอนรองรางโดยไม่ให้เกิดการแอ่นตัวมากเกินไประหว่างจุดรองรับ รางอาจต้องทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับระบบสัญญาณและสายดินสำหรับระบบรถไฟฟ้า

- ระบบจับยึดราง (fastener): จับยึด rail กับ sleeper และต้านทานแรงในแนวตั้ง, ยาว, นอน, และโมเมนต์ที่กระทำต่อรางจากแรงจากล้อรถไฟและอุณหภูมิ
- หมอนรองราง (sleeper): มีหน้าที่ (i) รับแรงจาก rail และกระจายสู่ ballast, (ii) จับ fastening system เพื่อรักษาระยะห่างระหว่าง rail, และ (iii) ต้านทานการเคลื่อนตัวในแนวนอน, ยาว, และตั้ง โดยการยึด superstructure ไว้กับ ballast
- หินโรยทาง (ballast): เป็นชั้นบนสุดของ substructure เพื่อรองรับ sleeper โดยสามารถแยกย่อยเป็น 4 ส่วน คือ (i) crib (อยู่ระหว่าง sleeper), (ii) shoulder (เกินจากปลาย sleeper), (iii) top ballast (ส่วนบนของ ballast ที่ถูกรบกวบโดย tamping), และ (iv) bottom ballast (ส่วนล่างของ ballast ที่ไม่ถูกรบกวบโดย tamping) หน้าที่สำคัญของ ballast คือ
 - ต้านทานแรงในแนวตั้ง, นอน, ยาว ที่กระทำต่อ sleeper เพื่อรักษาตำแหน่งของทางรถไฟ
 - ให้ความยืดหยุ่นและการดูดซับพลังงาน
 - ให้ช่องว่างเพื่อเก็บวัสดุ fouling ใน ballast และการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่าน ballast
 - เพิ่มความสะดวกในการบำรุงรักษาแนวราง โดยมีความสามารถในการจัดเรียงอนุภาคโดยการ tamping
 - ให้การระบายน้ำของทางรถไฟ
 - ลดความเค้นจาก sleeper ลงสู่วัสดุด้านล่าง
- Sub-ballast: เป็นชั้นระหว่าง ballast และ subgrade มักใช้ส่วนผสมของ sand-gravel หรือหินย่อยและ slag อนุภาค ต้อง มีความคงทน และผ่านเกณฑ์ filter/separation สำหรับ ballast และ subgrade โดยมีหน้าที่สำคัญคือ
 - ลดความเค้นจากฐานของชั้น ballast ให้เป็นระดับที่ยอมรับได้สำหรับ subgrade
 - ป้องกันการผสมกันของ subgrade และ ballast
 - ระบายน้ำจาก ballast ให้ไหลออกไปจาก subgrade ไปด้านข้างของทางรถไฟ
- Subgrade: เป็นฐานที่โครงสร้างทางรถไฟต้องวางอยู่บน โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน (i) พื้นดินตามธรรมชาติ และ (ii) ดินถม



รูปที่ 1 โครงสร้างทางรถไฟ [2]

3. การเสื่อมสภาพของฐานรากทางรถไฟ

เมื่อทางรถไฟถูกใช้งานหินโรยทางจะค่อยๆถูกปนเปื้อนโดยวัสดุละเอียดหลายชนิด (ballast fouling) ซึ่งจะสะสมในช่องว่างของ ballast อนุภาค fouling ขนาด coarse sand และ fine gravel จะเพิ่ม shear strength และ stiffness ของ ballast ซึ่งเพิ่มเสถียรภาพและความต้านทานต่อการเสียดรูปตามทิศทางที่ส่วน coarse aggregate ยังคงสัมผัสกันอยู่ แต่จะลดขนาด void และความยืดหยุ่นทำให้การจัดแนวรางยากขึ้นและการระบายน้ำค่อยๆลดลง เมื่อช่องว่างถูกเติมเกือบทั้งหมดจะเกิดการแยกตัวของอนุภาคระหว่าง tamping และทำให้เกิดการหลวมคลอนซึ่งทำให้อัตราการทรุดตัวเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปการ fouling จาก coarse sand และ fine gravel จะไม่ทำให้ค่าบำรุงรักษาเพิ่มขึ้นมากนักและสามารถล้างหินได้ แต่การสูญเสียคุณสมบัติจะเกิดขึ้นจากวัสดุ fouling ที่เป็น silt และ clay (อนุภาคละเอียด) ปริมาณของอนุภาคที่จะทำให้เกิดปัญหานั้นขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของส่วน coarse fouling เพราะอนุภาคหยาบลดช่องว่างและรวมกับอนุภาค silt เป็น abrasive slurry วัสดุ fouling จะขัดขวางการระบายน้ำและเพิ่มการขัดสีของ ballast เนื่องจาก (i) hydraulic erosion, (ii) subgrade attrition, และ (iii) สูญเสียเสถียรภาพเนื่องจาก particle lubrication ในที่สุดเมื่อการ fouling โดยอนุภาคละเอียดเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของ tamping ลดลง เพราะ (i) เมื่อวัสดุ fouling แห้ง ballast จะจัดเรียงตัวได้ยาก และการจัดเรียงตัวจะทำให้เกิดสภาพหลวมขึ้น และ (ii) เมื่อ ballast เปียกผิวสัมผัสของอนุภาคจะเคลือบด้วยอนุภาคละเอียดและ ballast จะมีโครงสร้างที่อ่อนแอลงหลังจาก tamping โครงสร้างทางจะต้องการการบำรุงรักษาเพิ่มขึ้นจนทำให้จำเป็นต้องแทนที่ด้วย ballast ใหม่ โดยต้นเหตุของ ballast fouling มีดังนี้ [2]

- การสึกกร่อนของหินโรยทาง
- การปนเปื้อนจากอนุภาคละเอียดที่มาจากผิวทาง
- การสึกกร่อนของหมอนรองราง
- การปนเปื้อนจาก sub-ballast
- การปนเปื้อนจาก subgrade

4. การวิเคราะห์ ballast fouling

Selig & Walters [2] ได้เสนอดัชนี 2 ตัวในการอธิบาย ballast fouling คือ (i) % fouling ซึ่งนิยามคือน้ำหนักแห้งของ ballast ส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 9.5 มม. (3/8 นิ้ว) ต่อน้ำหนักแห้งทั้งหมด และ (ii) fouling index (FI) นิยามดังสมการที่ (1)

$$FI = P_4 + P_{200} \quad (1)$$

โดยที่ P_4 และ P_{200} คือ % ของ ballast ที่ผ่านตะแกรง #4 (4.75 มม) และ #200 (0.075 มม) ตามลำดับ

Feldman & Nissen [3] ได้เสนอดัชนี Percentage Void Contamination (PVC) เพื่อแสดงผลกระทบของการลดลงของช่องว่างใน ballast โดยมีนิยามดังสมการที่ (2)

$$PVC = \frac{V_2}{V_1} \times 100\% \quad (2)$$

โดยที่ V_1 = ปริมาตรของช่องว่างระหว่างอนุภาคของหินโรยทางที่ถูกบดอัด และ V_2 = ปริมาตรทั้งหมดของวัสดุ fouling (อนุภาคที่ผ่านตะแกรง 9.5 มม. (3/8 นิ้ว))

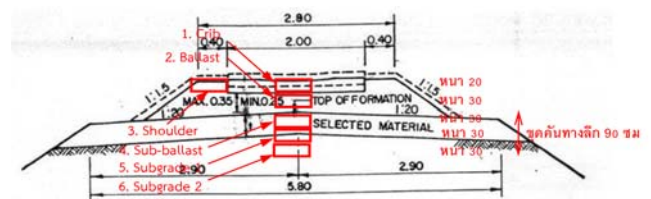
Indraratna et al. [4] เสนอค่า relative ballast fouling ratio (R_{b-f}) โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของอนุภาค fouling (ผ่านตะแกรง 9.5 มม. (3/8 นิ้ว)) และอนุภาค coarse aggregate (ค้างบนตะแกรง 9.5 มม. (3/8 นิ้ว)) โดยมีนิยามดังสมการที่ (3)

$$R_{b-f} = \frac{M_f \left(\frac{G_{b-f}}{G_{s-f}} \right)}{M_b} \times 100\% \quad (3)$$

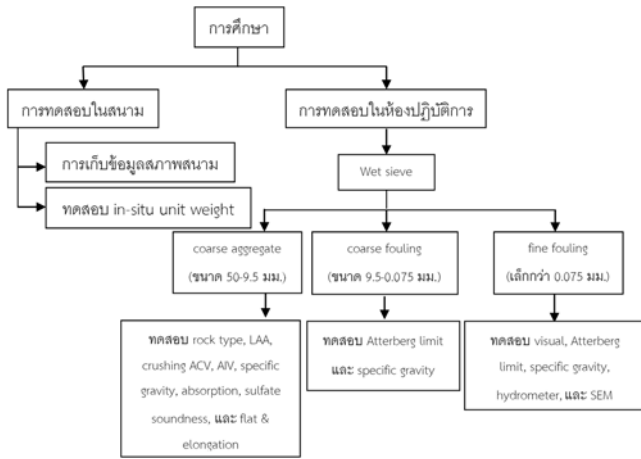
โดยที่ M = มวลแห้ง, G_s = specific gravity และ subscript f และ b คือ fouling material และ ballast

5. วิธีการทดสอบ

การศึกษานี้ดำเนินการกับทางรถไฟสายเหนือบริเวณสถานีขุนตาน อ.แม่ทา จ.ลำพูน ระหว่างเสาโทรเลขที่ 684/7 และ 684/8 โดยได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างและทดสอบในสนามในช่วงเดือนตุลาคม 2556 ซึ่งเป็นเวลาที่กำลังมีการปิดทางและ re-route เส้นทางในส่วนนี้ โดยได้ดำเนินการศึกษากับเส้นทางเก่า การศึกษานี้ให้ความสนใจกับฐานรากโดยประกอบด้วยการเก็บตัวอย่างและทดสอบในสนาม (unit weight และ water content) ที่จุดต่างๆของหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 2 นอกจากนี้มีการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยการ wet sieve ตัวอย่างเป็น 3 ส่วน คือ coarse aggregate (ขนาด 50-9.5 มม. (2-3/8 นิ้ว)), coarse fouling (ขนาด 9.5-0.075 มม. (3/8 นิ้ว-#200)), และ fine fouling (เล็กกว่า 0.075 มม. (ผ่าน #200)) แล้วทำการทดสอบที่เหมาะสมกับส่วนต่างๆดังนี้ hydrometer, specific gravity, water absorption, Los Angeles abrasion, aggregate compression value, aggregate impact value, flat and elongation, sulfate soundness, Atterberg limit, และ scanning electron microscopy รูปที่ 3 สรุปแผนการดำเนินการวิจัย



รูปที่ 2 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างและทดสอบในสนาม



รูปที่ 3 แผนการดำเนินการวิจัย

6. ผลการทดสอบ

หน้าตัดที่ศึกษาเป็นทางตรงและมีลักษณะทางกายภาพ คือ เป็นคันดินสูงประมาณ 2.5 ม. และมีระดับรางสูงจากคันดินประมาณ 50 ซม.

6.1 In-situ unit weight และ water content

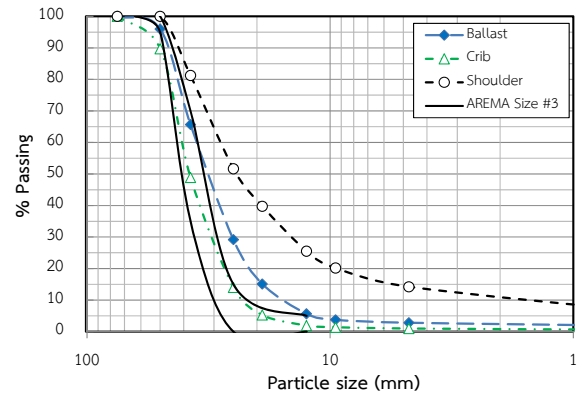
ตารางที่ 3 แสดงค่า in-situ dry unit weight (γ_{dry}) และ water content (w) ที่ตำแหน่งต่างจากการทดสอบ sand cone [5] ผลการทดสอบแสดงว่า (i) ตัวอย่าง ballast และ crib มีค่า γ_{dry} เท่ากับ 13-14 kN/m³ ยกเว้น shoulder ที่มีค่าน้อยกว่า, (ii) ตัวอย่าง sub-ballast มีค่า γ_{dry} เท่ากับ 13 kN/m³, และ (iii) ตัวอย่าง subgrade มีค่า γ_{dry} เท่ากับ 10 kN/m³ ตัวอย่าง ballast, shoulder, และ crib มีค่า w น้อยเนื่องจากสัมผัสกับบรรยากาศ ส่วนตัวอย่าง sub-ballast, subgrade 1, และ subgrade 2 มีค่า w ที่มากกว่า

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ dry unit weight และ water content

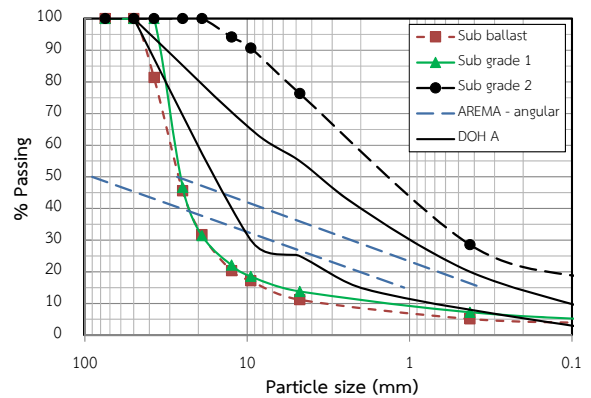
ตัวอย่าง	Dry unit weight (kN/m ³)	Water content (%)
Ballast	12.8	0.4
Crib	13.6	0.4
Shoulder	9.2	0.4
Sub-ballast	12.5	2.3
Subgrade 1	10.4	1.6
Subgrade 2	9.8	3.7

6.2 Sieve analysis

รูปที่ 4 และ 5 แสดง particle distribution curve (PSD) ของตัวอย่างต่างจากการทดสอบ wet sieve ([6], [7], [8]) และการทดสอบ hydrometer [9] โดยรูปทั้งสองได้แสดง PSD ของเกณฑ์ ballast และ sub-ballast ที่กำหนดโดย AREMA [10] ด้วย ตารางที่ 4 แสดงส่วนประกอบของตัวอย่างที่แบ่งเป็น coarse aggregate, coarse fouling, และ fine fouling และแสดงชนิดของหินที่เป็นส่วนประกอบหลักของ coarse aggregate



รูปที่ 4 ขนาดคละของหินโรยทาง



รูปที่ 5 ขนาดคละของชั้นใต้หินโรยทาง

ตารางที่ 4 ส่วนประกอบของตัวอย่างโดยน้ำหนัก (%)

ตัวอย่าง	Coarse aggregate (ชนิดของหิน)	Coarse-fouling	Fine-fouling
Ballast	96.3 (Rhyolite/limestone)	1.9	1.8
Crib	98.6 (Rhyolite)	1.1	0.3
Shoulder	79.8 (Rhyolite)	16.8	3.4
Sub-ballast	82.9 (Rhyolite)	13.4	3.7
Subgrade 1	81.5 (Shale)	13.7	4.8
Subgrade 2	9.3	73.9	17.4

ผลการทดสอบแสดงว่า (i) ตัวอย่าง ballast และ crib มี PSD ใกล้เคียงกับเกณฑ์ของ AREMA (size #3) [10] แต่ตัวอย่าง shoulder มีส่วนละเอียดมากกว่าซึ่งอาจทำให้ γ_{dry} ต่ำกว่า, (ii) ตัวอย่าง sub-ballast และ subgrade 1 มี PSD เหมือนกันซึ่งอาจเนื่องจากตัวอย่างมีสภาพเหมือนกันจากการจมน้ำของ ballast ลงไปในส่วน subgrade 1 และ PSD มีขนาดคละหยาบกว่าเกณฑ์ของชั้นวัสดุพื้นทางหินคลุก A ของกรมทางหลวง [11] และไม่เป็นไปตามเกณฑ์ filter/separation ของ AREMA [10], (iii) ตัวอย่าง subgrade 2 ส่วนมากกว่า 9.5 มม. เนื่องจากเป็นดินเหนียว, และ (iv) ตัวอย่าง ballast และ crib มี coarse aggregate, coarse fouling, และ fine fouling เท่ากับ 97%, 1.5%, และ 1% ตามลำดับ แต่ตัวอย่าง shoulder มี coarse aggregate น้อยกว่าและ coarse fouling มากกว่า

6.3 Specific gravity of solid และ water absorption

ตารางที่ 5 แสดงค่า specific gravity of solid (G_s) ของส่วนต่างๆของ ตัวอย่างและ water absorption (A) ของส่วน coarse aggregate โดย coarse aggregate และ fine foudling ทำการทดสอบตาม [12] และ [13] ตามลำดับ ส่วน coarse foudling ได้จากการประมาณผลจากการทดสอบ ทั้งสองวิธี ผลการทดสอบแสดงว่าค่า G_s มีค่าประมาณ 2.6-2.8 ส่วนค่า A มีค่าน้อยมาก

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบ specific gravity of solid และ water absorption

ตัวอย่าง	Coarse aggregate (% absorption)	Coarse foudling	Fine foudling
Ballast	2.75 (0.4)	2.73	2.81
Crib	2.70 (1.1)	2.67	NA
Shoulder	2.67 (0.9)	2.69	2.7
Sub-ballast	2.74 (0.6)	2.71	2.84
Subgrade 1	2.56 (0.7)	2.73	2.81
Subgrade 2	NA	2.74	2.64

6.4 Durability

ตารางที่ 6 แสดงผลการทดสอบ durability ของส่วน coarse aggregate ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบ Los Angles abrasion (LAA) (grading 2 หรือ 3) [14], Aggregate Crushing Value (ACV) [15], และ Aggregate Impact Value (AIV) [16] ผลการทดสอบแสดงว่าส่วน coarse aggregate ของทุกตัวอย่างมีผลการทดสอบใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบ durability ของส่วน coarse aggregate

ตัวอย่าง	LAA (%)	ACV (%)*	AIV (%)*
Ballast	20.8	28.1	11.8
Crib	22.9	NA	NA
Shoulder	18.8	28.6	13.2
Sub-ballast	23.8	28.8	10.3
Subgrade 1	29.4	NA	NA
Subgrade 2	NA	NA	NA

*ตัวอย่างมีขนาดอนุภาค 10-14 มม.

6.5 Sulfate soundness

ตารางที่ 7 แสดงผลการทดสอบ sulfate soundness [17] ของส่วน coarse aggregate โดยใช้โซเดียมซัลเฟต ผลการทดสอบแสดงว่าส่วน coarse aggregate ของทุกตัวอย่างมีค่า sulfate soundness เท่ากับ 4-7% ยกเว้นตัวอย่าง crib มีค่าน้อยกว่าและส่วน subgrade 2 ค่ามากกว่า

6.6 Flat and elongation

ตารางที่ 8 แสดงผลการทดสอบ flat and elongation ของส่วน coarse aggregate [18] โดยใช้อัตราส่วน 1:3 ผลการทดสอบแสดงว่าส่วน coarse aggregate ของทุกตัวอย่างมีค่า % flat and elongation เท่ากับ 0% ยกเว้นตัวอย่าง crib มีค่า % elongation มากกว่า

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบ sulfate soundness ของส่วน coarse aggregate

ตัวอย่าง	Sulfate soundness (%)
Ballast	5.0
Crib	1.0
Shoulder	4.5
Sub-ballast	2.3
Subgrade 1	4.8
Subgrade 2	7.4

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบ flat and elongation ของส่วน coarse aggregate

ตัวอย่าง	% Flat	% elongation
Ballast	0	0
Crib	0	4
Shoulder	0	0
Sub-ballast	0	1
Subgrade 1	0	0
Subgrade 2	NA	NA

6.7 Atterberg limit

ตารางที่ 9 แสดงผลการทดสอบ Atterberg limit ของส่วน fine aggregate [19] ผลการทดสอบแสดงว่าส่วน ballast และ sub-ballast มีค่า Atterberg limit เท่ากันและส่วน subgrade 1 และ subgrade 2 มีค่า Atterberg limit เท่ากัน

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบ Atterberg limit ของส่วน fine aggregate

ตัวอย่าง	Liquid limit	Plastic limit	Plasticity index
Ballast	27.8	24.1	3.7
Crib	NA	NA	NA
Shoulder	NA	NA	NA
Sub-ballast	25.3	24.6	0.8
Subgrade 1	33.5	25.2	8.3
Subgrade 2	31.7	20.8	10.8

6.8 Scanning electron microscopy

รูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบ scanning electron microscopy ของ ส่วน fine aggregate โดยใช้กำลังขยาย 1500 เท่า ผลการทดสอบแสดงว่าทุกตัวอย่างมีลักษณะเหมือนกัน

7. วิเคราะห์ผล

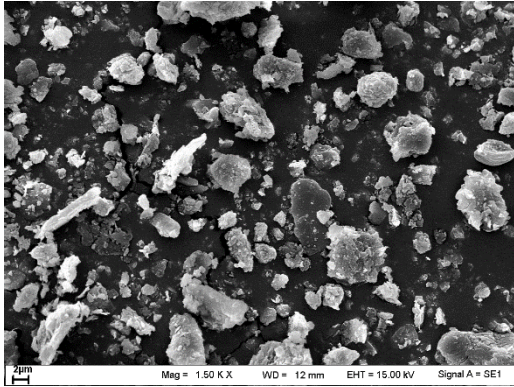
ตารางที่ 10 เปรียบเทียบผลการทดสอบตัวอย่าง ballast, crib, และ shoulder กับเกณฑ์ของ AREMA [10] ซึ่งแสดงว่าตัวอย่าง ballast, crib, และ shoulder มีคุณสมบัติผ่านตามเกณฑ์ยกเว้นตัวอย่าง shoulder ที่มี ส่วนละเอียดมากเกินไปซึ่งอาจเกิดจากการบดบดจากอนุภาคละเอียด ที่มาจากผิวทาง ตารางที่ 11 เปรียบเทียบผลการทดสอบตัวอย่าง sub-ballast และ subgrade 1 กับเกณฑ์ของชั้นวัสดุพื้นทางหินคลุก A ของ กรมทางหลวง [11] ซึ่งแสดงว่าตัวอย่าง sub-ballast มีคุณสมบัติผ่านตาม เกณฑ์เกือบทั้งหมดยกเว้น filter/separation ส่วนตัวอย่าง subgrade 1 ก็มีคุณสมบัติผ่านตามเกณฑ์เกือบทั้งหมดยกเว้น filter/separation และ

Atterberg limit ตัวอย่าง subgrade 2 เป็นดินเดิมซึ่งสามารถจำแนกชนิดของดินตาม USCS [20] เป็น sandy clay (SC)

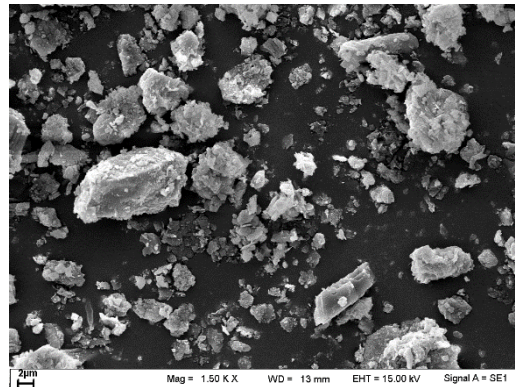
ตารางที่ 12 แสดงผลการวิเคราะห์ fouling ของตัวอย่าง ballast, crib, และ shoulder ซึ่งสามารถจำแนกอัตราการ fouling ได้ดังนี้ (i) ตัวอย่าง ballast – clean ถึง moderately clean, (ii) ตัวอย่าง crib – clean ถึง moderately clean, และ (iii) ตัวอย่าง shoulder – fouled ถึง moderately fouled โดยพบว่าการจำแนกโดยใช้ PVC ตามเกณฑ์ที่กำหนด [4] ไม่สามารถแยกแยะอัตราการ fouling ของทั้ง 3 ตัวอย่างได้

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์ fouling ด้วยทฤษฎีต่างๆซึ่งแสดงว่าค่า FI, PVC, และ R_{b-f} มีความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงกับค่า % fouling ดังสมการที่ (4) และแสดงว่าค่า R_{b-f} มี sensitivity มากที่สุด

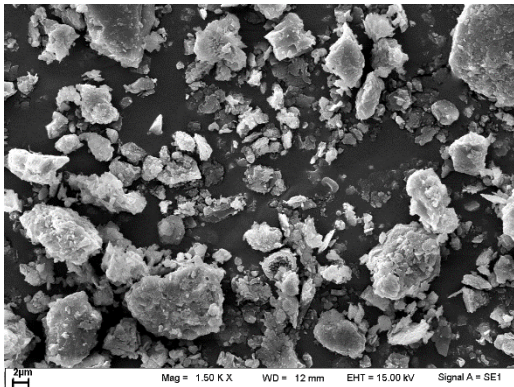
$$\left. \begin{aligned} FI &= 0.89 (\% \text{ fouling}) \\ PVC &= 0.54 (\% \text{ fouling}) \\ R_{b-f} &= 1.23 (\% \text{ fouling}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$



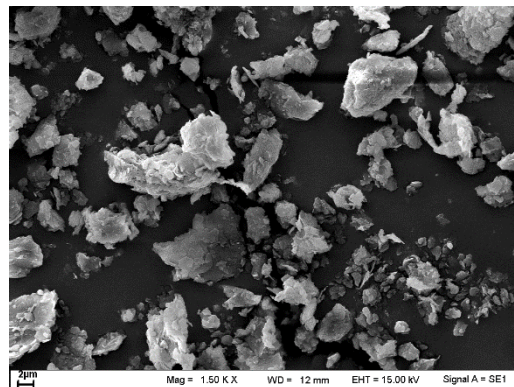
Ballast



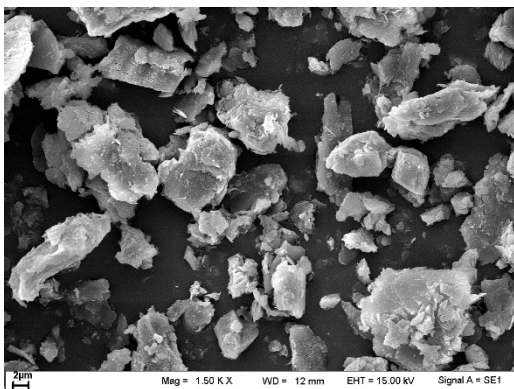
Sub-ballast



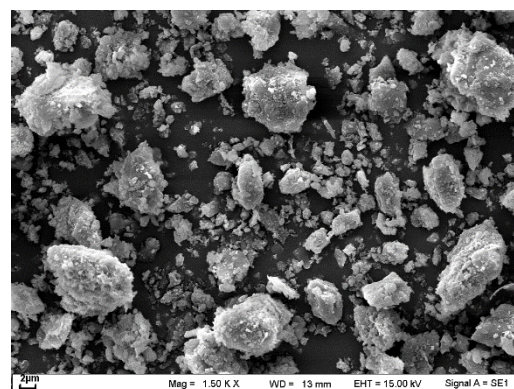
Crib



Shoulder



Subgrade 1



Subgrade 2

รูปที่ 6 ผลการทดสอบ SEM (ขยาย 1500 เท่า)

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบตัวอย่าง ballast, crib, และ shoulder

การทดสอบ	AREMA [10]	Ballast	Crib	Shoulder
PSD	รูปที่ 4	OK	OK	Not OK
LAA	< 30%	20.8	22.9	18.8
Flat & elongation (1:3)	< 5%	0.3	0.9	4.0
ACV	< 25%*	28.1	NA	28.6
AIV	< 20%**	11.8	NA	13.2
Water absorption	< 1%	0.4	1.1	0.9
Specific gravity	> 2.6	2.75	2.70	2.67
Sulfate soundness	< 5%	5.0	1.0	4.5
< #200	< 1%	1.8	0.3	3.4

ผลทดสอบส่วน coarse aggregate

* มาตรฐาน Australia [21]

** มาตรฐาน India [22]

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบตัวอย่าง sub-ballast และ subbase 1

การทดสอบ	DOH [11]	Sub-ballast	Subbase 1
PSD	รูปที่ 5	OK	OK
Filter/separation	รูปที่ 5*	Not OK	Not OK
LAA	< 40%	28.3**	29.4**
Sulfate soundness	< 9%	2.3**	4.8**
LL	< 25	25.3 [§]	33.5 [§]
PI	< 6	0.8 [§]	8.3 [§]
CBR (Modified Proctor)	> 90	NA	NA
< #200	< (2/3) ของผ่าน #40	OK	OK
< #200	< 5%*	3.7	4.8

*AREMA [10]

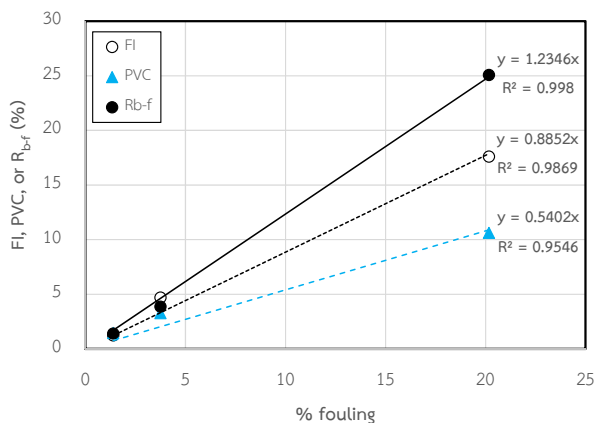
**ผลทดสอบส่วน coarse aggregate

§ผลทดสอบส่วน fine aggregate

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์ fouling ของตัวอย่าง ballast, crib, และ shoulder

ตัวอย่าง	% fouling	FI (%)	PVC (%)	R _{b-f} (%)
Ballast	3.8 (moderately clean) ¹	4.7 (moderately clean) ²	3.3 (clean) ¹	3.9 (moderately clean) ¹
Crib	1.4 (clean) ¹	1.2 (moderately clean) ²	1.5 (clean) ¹	1.4 (clean) ¹
Shoulder	20.2 (fouled) ¹	17.6 (moderately fouled) ²	10.6 (clean) ¹	25.1 (fouled) ¹

¹ [4], ² [2]



รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ fouling

8. สรุปผล

หินโรยทางโดยรวมมีคุณสมบัติตาม AREMA [10] ยกเว้นตัวอย่าง shoulder ที่มี coarse aggregate น้อยกว่าปกติและมี coarse fouling และ fine fouling มากกว่าปกติซึ่งทำให้มีค่า γ_{dry} น้อยกว่าปกติ โดยสาเหตุอาจเกิดจากการปนเปื้อนจากอนุภาคละเอียดที่มาจากผิวทาง ตัวอย่าง sub-ballast และ subgrade 1 มีลักษณะเหมือนกันซึ่งอาจเนื่องจากการจมนองของ ballast ลงไปในส่วน subgrade 1 โดยที่ตัวอย่างดังกล่าวมีขนาดละเอียดกว่าเกณฑ์ของชั้นวัสดุพื้นทางหินคลุก A ของกรมทางหลวง [11] และไม่เป็นไปตามเกณฑ์ filter/separation ของ AREMA [10]

ผลการวิเคราะห์ fouling ของตัวอย่าง ballast, crib, และ shoulder สามารถจำแนกอัตราการ fouling ได้คือ ballast และ crib มีสภาพ clean ถึง moderately clean แต่ตัวอย่าง shoulder มีสภาพ fouled ถึง moderately fouled โดยพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์ fouling ด้วยทฤษฎีต่างๆเป็นเส้นตรงกับค่า % fouling และค่า R_{b-f} มี sensitivity มากที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 136/2559 และจากกองทุนวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยบูรพา เลขที่สัญญา 4/2557 ขอขอบคุณ ธนพงศ์ อนันต์วรปัญญา และ วรฤทธิ์ ชะบังรัมย์ ในการมีส่วนช่วยดำเนินการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Japanese Ministry of Transport. *Summary of Transport-Related Energy Consumption*, 1966.
- [2] E.T. Selig & J.M. (1994), *Track Geotechnology and Substructure Management*, Thomas Telford, 1994.
- [3] F. Feldman & D.Nissen, D. 2002. "Alternative testing method for the measurement of ballast fouling: percentage void contamination", *Proc. of Conf. on Railway Engg*, Australia, pp. 101–109, 2002.
- [4] B. Indraratna, L.J. Su, & C. Rujikiatkamjorn, C. (2011). "A new parameter for classification and evaluation of railway ballast fouling", *Canadian Geotech J*, 48, pp. 322-326, 2011.
- [5] ASTM D1556. Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cone Method.
- [6] ASTM C117. Standard Test Method for Materials Finer than 75- μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing.
- [7] ASTM D1140. Standard Test Methods for Determining the Amount of Material Finer than 75- μm (No. 200) Sieve in Soils by Washing.
- [8] ASTM D6913. Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis.
- [9] ASTM D422. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.
- [10] AREMA. *Manual of Railway Engg*, American Railway Engg and Maintenance-of-Way Association, 2002.
- [11] กรมทางหลวง. *รายละเอียดและข้อกำหนดการก่อสร้างทางหลวง*, เล่มที่ 1, 2535.
- [12] ASTM C127. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate.
- [13] ASTM D854. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.
- [14] ASTM C535. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
- [15] BS812-110. Testing aggregates – Part 110: Methods for determination of aggregate crushing value (ACV).
- [16] BS812-112. Testing aggregates – Part 112: Methods for determination of aggregate impact value (AIV).
- [17] ASTM C88. Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.
- [18] ASTM D4791. Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate.
- [19] ASTM D4318. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- [20] ASTM D2487. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
- [21] ARCT. *Ballast Specification*, ETA-01-01, Australian Rail Track Corporation Ltd., 2007.
- [22] Indian Railways. *Specifications for Track Ballast*, IRS-GE-1, 2004.