รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

กลไกการเสื่อมสภาพของโครงสร้างฐานรากของทางรถไฟ: กรณีศึกษาของทางรถไฟสายตะวันออก

Mechanism of railway sub-structure deterioration: case study of Eastern line

สยาม ยิ้มศิริ
สิทธิภัสร์ เอื้ออภิวัชร์

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล
(งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2561A10802149
สัญญาเลขที่ 49/2561

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

กลไกการเสื่อมสภาพของโครงสร้างฐานรากของทางรถไฟ: กรณีศึกษาของทางรถไฟสายตะวันออก

Mechanism of railway sub-structure deterioration: case study of Eastern line

สยาม ยิ้มศิริ
สิทธิภัสร์ เอื้ออภิวัชร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กรกฎาคม 2561

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 49/2561 ขอขอบพระคุณ นายช่าง วีระยุทธ โพธิ์ใหญ่ วิศวกรกำกับการกองบำรุงทางเขตฉะเชิงเทรา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบพระคุณ ณัฐภัทร์ อินทร์มงคล, ปรัชญา สอนดี, พีรายุ เรืองหิรัญ. และ วัชระพงศ์ ถิ่นใหญ่ ที่ช่วยในการดำเนินงานวิจัยนี้

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาพฐานรากของทางรถไฟสายตะวันออกบริเวณเสาโทรเลขที่ 72/15 จ.ฉะเชิงเทรา และ เสาโทรเลขที่ 145/9 จ.ชลบุรี 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 of Eastern line at Kilometerage 72/15, Chachoengsao Province and 145/9, Chonburi 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 2-4

2.1.4 Ballast 2-5

2.1.5 Sub-Ballast 2-6

2.1.6 Sub-Grade 2-6

2.1.7 Drainage 2-7

2.2 ชนิดของหินโรยทางรถไฟ 2-7

2.3 มาตรฐานหินโรยทางรถไฟประเทศต่างๆ 2-9

2.3.1 มาตรฐานหินโรยทางรถไฟประเทศออสเตรเลีย 2-9

2.3.2 มาตรฐานหินโรยทางรถไฟประเทศอินเดีย 2-10

2.3.3 มาตรฐานหินโรยทางรถไฟประเทศอเมริกา 2-10

2.4 ข้อแตกต่างของหินโรยทางรถไฟแต่ละประเทศกับมวลรวมของคอนกรีต 2-11

2.4.1 การเปรียบเทียบมาตรฐานของหินโรยทางรถไฟของแต่ละประเทศ 2-11

2.4.2 การเปรียบเทียบมาตรฐานมวลรวมหยาบของคอนกรีตกับมาตรฐานหินโรยทางรถไฟของประเทศต่างๆ 2-12

2.5 คุณสมบัติของหินโรยทางรถไฟ 2-12

2.5.1 การทดสอบคุณสมบัติความคงทนของอนุภาค 2-12

2.5.2 การทดสอบรูปร่าง Shape Tests 2-13

2.5.3 การหาขนาดคละ 2-14
2.5.4 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) 2-14
2.5.5 การทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมความต้านทานซัลเฟต (ASTM C88-99a) 2-15
2.5.6 การทดสอบด้านอื่นๆ 2-15
2.6 การเสื่อมสภาพของหินโรยทางรถไฟ (Ballast Fouling) 2-16
2.6.1 บัลลาสต์เกิดความเสียหาย (Ballast breakdown) 2-16
2.6.2 การแทรกซึมจากพื้นผิว (Infiltration from ballast surface) 2-17
2.6.3 การสึกหรอของหมอนรอง (sleeper wear) 2-17
2.6.4 การแทรกซึมจากชั้นล่างของบัลลาสต์ (Infiltration from underlying granular layers) 2-18
2.6.5 การแทรกซึมของดินชั้นฐานราก (Subgrade Infiltration) 2-19
2.7 ผลกระทบจากการปนเปื้อน 2-20
2.8 ค่าการปนเปื้อน 2-20
2.8.1 ค่าดัชนีการปนเปื้อน (Fouling index : F_i) 2-20
2.8.2 ค่าดัชนีการปนเปื้อนสำหรับขนาดหินโรยทางขนาดอื่นๆ (Fouling Index : $FI_{P.D}$) 2-21
2.8.3 เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC) 2-22
2.8.4 ดัชนีการปนเปื้อนในช่องว่าง (Void contamination index: VCI) 2-22
2.8.5 อัตราส่วนความสัมพันธ์การปนเปื้อนของหินโรยทาง (Relative Ballast fouling ratio: R_{b-f}) 2-24
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 2-24
2.9.1 การศึกษาในอเมริกาเหนือ (North America studies) 2-24
2.9.2 การศึกษาการปนเปื้อนของหินโรยทางในยุโรป 2-25
2.9.3 การศึกษาความเสียหายจากการซ่อมแซมชั้นหินโรยทาง (Tamping damage) 2-26
2.9.4 การศึกษาการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ความปนเปื้อนต่างๆ 2-26

บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการวิจัย

3.1 สถานที่การเก็บตัวอย่าง 3-1
3.2 การเก็บตัวอย่าง 3-3
3.3 แผนการดำเนินงาน 3-4
3.4 วิธีการทดลองในห้องปฏิบัติการ 3-5
3.4.1 การทดสอบคุณสมบัติความคงทนของอนุภาค 3-5
3.4.2 การทดสอบรูปร่าง Shape Tests 3-8
3.4.3 การหาขนาดคละ 3-9
3.4.4 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) 3-9

3.4.5 การทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมความต้านทานซัลเฟต (ASTM C88-9) 3-11
3.4.6 การทดสอบด้านอื่นๆ 3-14
3.5 วิธีการทดลองภาคสนาม 3-15

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลบริเวณฉะเชิงเทรา

4.1 ผลการทดสอบ sieve analysis (ASTM D422, D1140, D6913) 4-1
4.2 Coarse Aggregate 4-3
4.3 Coarse fouling (ผ่านตะแกรงขนาด $\frac{3}{8}$ ” – ค้างตะแกรงเบอร์ 200) 4-6
4.4 Fine fouling (เล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200) 4-9
4.5 การทดสอบหาความหนาแน่นของดินในสนาม 4-12
4.6 การทดสอบหาความชื้นของดิน 4-13
4.7 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐาน 4-13
4.7.1 เปรียบเทียบกับมาตรฐานของหินโรยทางรถไฟในประเทศออสเตรเลียหน่วยงาน Australian Rail Track Corporation (ARTC) 4-13
4.7.2 เปรียบเทียบกับ Specification for track ballast ในประเทศอินเดีย 4-16
4.7.3 เปรียบเทียบกับมาตรฐานหินโรยทางรถไฟของหน่วยงาน American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) ในประเทศอเมริกา 4-18
4.8 วิเคราะห์การปนเปื้อน 4-21

บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลบริเวณชลบุรี

5.1 ผลการทดสอบ sieve analysis (ASTM D422, D1140, D6913) 5-1
5.2 Coarse Aggregate 5-3
5.3 Coarse fouling (ผ่านตะแกรงขนาด $\frac{3}{8}$ ” – ค้างตะแกรงเบอร์ 200) 5-5
5.4 Fine fouling (เล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200) 5-9
5.5 การทดสอบหาความหนาแน่นของดินในสนาม 4-11
5.6 การทดสอบหาความชื้นของดิน 4-12
5.7 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐาน 4-12
5.7.1 เปรียบเทียบกับมาตรฐานของหินโรยทางรถไฟในประเทศออสเตรเลียหน่วยงาน Australian Rail Track Corporation (ARTC) 4-12
5.7.2 เปรียบเทียบกับ Specification for track ballast ในประเทศอินเดีย 4-15
5.7.3 เปรียบเทียบกับมาตรฐานหินโรยทางรถไฟของหน่วยงาน American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) ในประเทศอเมริกา 4-17

5.8 วิเคราะห์การปนเปื้อน 5-20

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง

เอกสารอ้างอิง R-1

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาของปัญหา

เนื่องจากการขนส่งทางรางเป็นระบบการขนส่งทางบกที่มีความประหยัดและมีความปลอดภัยที่สุดเมื่อคิดการขนส่งในจำนวนเท่ากัน (ตารางที่ 1-1) เช่น การใช้การใช้รถไฟขนสินค้าจะประหยัดกว่ารถบรรทุก 3.5-4.5 เท่า หรือ การใช้รถไฟขนผู้โดยสารจะประหยัดพลังงานมากกว่าการใช้รถโดยสารสาธารณและรถโดยสารส่วนบุคคล 1.7-2.0 เท่า และ 5 เท่าตามลำดับ นอกจากนั้นระบบการขนส่งทางรางที่เป็นรถไฟฟ้ายังสามารถใช้พลังงานไฟฟ้าที่มาจากต้นกำเนิดอื่น เช่น ถ่านหิน, ก๊าซธรรมชาติ, และพลังงานนิวเคลียร์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้การขนส่งทางรางจึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าระบบการขนส่งรูปแบบอื่นๆ และนอกจากนี้ระบบการขนส่งทางรางยังใช้ที่ดินเพื่อการก่อสร้างน้อยกว่าระบบขนส่งทางอื่นๆจึงใช้ทรัพยากรที่ดินน้อยกว่า

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

	รถไฟ	รถเมล์	เครื่องบิน	รถยนต์ส่วนบุคคล
ดัชนีการใช้พลังงานเปรียบเทียบ	100	176	409	578
การปลดปล่อย CO_2เปรียบเทียบ	100	413	643	946

จากความสำคัญของการขนส่งระบบรางและมีแผนการก่อสร้างระบบรางเป็นจำนวนมากในอนาคตจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงการก่อสร้างโครงสร้างทางรถไฟที่เหมาะสมเพื่อความประหยัดในการก่อสร้างทางรถไฟและการบำรุงรักษารวมทั้งความปลอดภัยในการใช้งาน ในปัจจุบันการก่อสร้างและการบำรุงรักษาทางรถไฟในประเทศไทยยังกระทำโดยอาศัยประสบการณ์เป็นหลักและยังไม่ใช้การวิเคราะห์ทางวิชาการและการตัดสินใจเชิงปริมาณประกอบกับความเข้าใจกลไกในการเสื่อมสภาพของทางรถไฟยังมีอยู่อย่างจำกัดจึงทำให้ต้องมีการบำรุงรักษาคันทางอยู่บ่อยครั้งและยังทำให้รถไฟไม่สามารถวิ่งด้วยความเร็วที่ออกแบบไว้ ดังจะเห็นได้จากสถิติรถไฟตกรางเป็นจำนวนมาก เช่น ในปี พ.ศ. 2555 เกิดเหตุรถไฟตกราง 89 ครั้ง และ 8 เดือนแรกในปี พ.ศ. 2556 รถไฟตกราง 113 ครั้ง เพื่อความปลอดภัยและเพื่อให้รถไฟใช้ความเร็วได้ตามที่มีการออกแบบไว้ทางรถไฟต้องถูกซ่อมบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง โดยหินโรยทาง (Ballast) เป็นส่วนประกอบที่มีสำคัญของระบบรางรถไฟทำหน้าที่รับแรงที่กระทำกับหมอนรองราง (Sleeper), ให้ช่องว่างขนาดใหญ่สำหรับการระบายน้ำ, และลดเสียงรบกวน หากช่องว่างในหินโรยทางถูกเติมเต็มด้วยอนุภาคละเอียดจะเกิดการปนเปื้อน (Foul) และจะทำให้หินโรยทาง(Ballast) สูญเสียหน้าที่ ดังนั้นการบำรุงรักษาหินโรยทางให้อยู่ในสภาพดีจึงสำคัญมากเพื่อให้แน่ใจว่าทางรถไฟจะสามารถทำงานได้ดีหินโรยทางจะต้องถูกตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอและมีการปรับปรุงตามตารางเวลาเพื่อให้แน่ใจถึงความปลอดภัยในการใช้งานของทางรถไฟ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้คือการศึกษากลไกและหาสาเหตุของการเสื่อมสภาพของทางรถไฟสายตะวันออกว่าเกิดจากสาเหตุใดเป็นหลัก ซึ่งการศึกษานี้จะเป็นส่วนช่วยในการออกแบบโครงสร้างทางรถไฟและช่วยกำหนดคุณสมบัติของวัสดุต่างๆเพื่อให้การก่อสร้างและการบำรุงรักษาทางรถไฟมีความประหยัดขึ้นและเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการเดินทาง โดยมีจุดประสงค์หลักสามารถจำแนกเป็นข้อๆดังนี้

- สำรวจและทดสอบในสนามเพื่อวิเคราะห์สภาพทางรถไฟ
- ทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมและกายภาพของหินโรยทางที่ใช้งานแล้ว
- ทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมและกายภาพของวัสดุที่ปนเปื้อนในหินโรยทางที่ใช้งานแล้ว
- วิเคราะห์กลไกการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

การศึกษาของโครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นความสนใจไปที่วัสดุหินโรยทาง (Ballast) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของโครงสร้างทางรถไฟ โดยจะดำเนินการศึกษาเส้นทางรถไฟสายตะวันออกบริเวณเสาโทรเลขที่ 72/15 ในจังหวัดฉะเชิงเทรา และ 145/9 ในจังหวัดชลบุรี การศึกษานี้ประกอบด้วยการสำรวจและการตรวจสอบในสนาม และ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

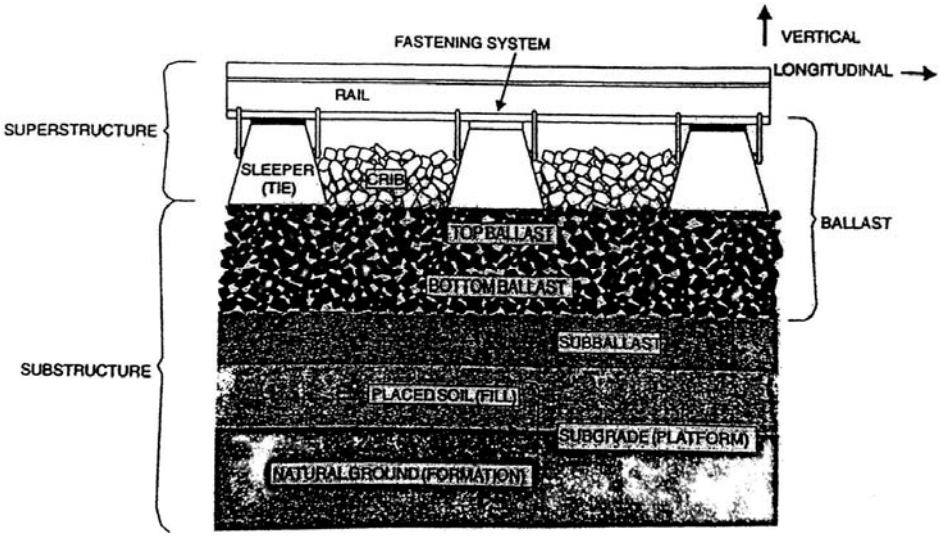
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับคือหาสาเหตุการเสื่อมสภาพของทางรถไฟสายตะวันออกว่าเกิดจากสาเหตุใดเป็นหลัก รวมถึงแนวทางการแก้ไขและปรับปรุงคุณภาพของโครงสร้างทางรถไฟให้สอดคล้องกับการใช้งานเป็นต้น

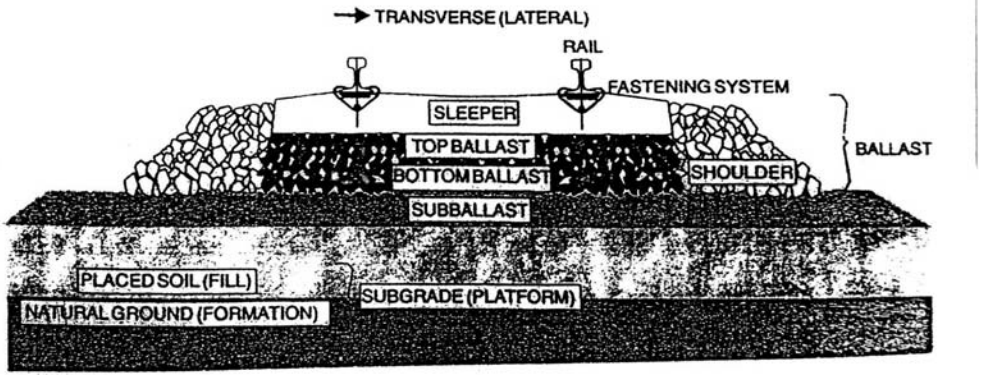
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ส่วนประกอบโครงสร้างทางรถไฟ

โครงสร้างของทางรถไฟมีส่วนประกอบสำคัญไม่ใช่แค่รางรถไฟอย่างเดียว แต่ยังมีส่วนที่อยู่ใต้รางรถไฟอีกซึ่งแสดงดังรูปที่ 2-1 และ 2-2 โดยแต่ละส่วนมีความสำคัญตามลำดับไป



รูปที่ 2-1 รูปตัดตามยาวทางรถไฟ



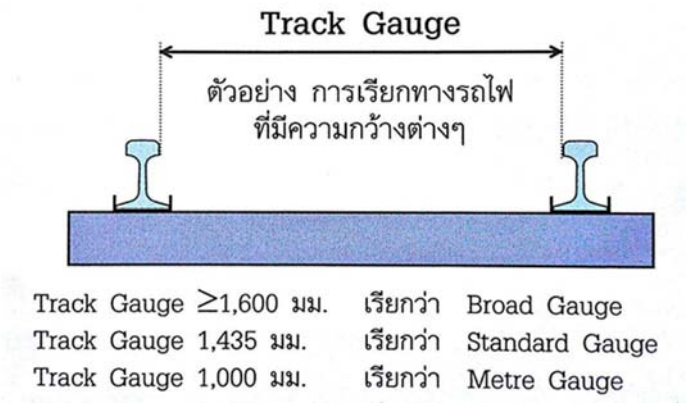
รูปที่ 2-2 รูปตัดขวางทางรถไฟ

2.1.1 รางรถไฟ (Rail)

รางรถไฟ คือ ชิ้นส่วนเหล็กตามแนวยาว เป็นตัวนำทางของล้อรถไฟเพื่อให้มีความราบเรียบและต่อเนื่อง ชิ้นส่วนเหล่านี้มีความแข็งแรง รับน้ำหนักเหมือนกับคาน เพื่อทำการถ่ายน้ำหนักจากล้อลงไปสู่หมอนเพื่อไม่ทำให้เกิดการแอ่นตัวมากเกินไประหว่างจุดรองรับ

ขนาดความกว้างของรางรถไฟ (rail gauge หรือ track gauge) คือ ระยะห่างของรางรถไฟ โดยวัดจากหัวรางด้านในข้างซ้ายถึงหัวรางด้านในข้างขวา สแตนดาร์ดเกจ (standard gauge) เป็นชื่อของขนาดความกว้างรางที่นิยมใช้มากที่สุดทั่วโลก โดยประมาณ 60% ของรางรถไฟทั้งหมด มีขนาด 1,435 มม. ประเทศไทยรางรถไฟส่วนใหญ่มีขนาดความกว้าง ที่เรียกว่า มิเตอร์เกจ ที่มีขนาดความกว้าง 1,000 มม. ซึ่งที่แผนการจะพัฒนาปรับปรุงเพื่อใช้สำหรับรถไฟความเร็วสูง

ประเภทของรางรถไฟ



รูปที่ 2-3 Track gauge

A. รางแคบ (Narrow gauge)

เป็นรางรถไฟที่มีความกว้างรางน้อยกว่า 1.435 เมตร ได้แก่

- สก๊อตต์ เกจ (Scotch gauge) ขนาดความกว้างราง 1.372 เมตร (4 ฟุต 6 นิ้ว)
- เคปเกจ (Cap gauge) ขนาดความกว้างราง 1.067 เมตร (3 ฟุต 6 นิ้ว)
- มิเตอร์ เกจ (Meter gauge) ขนาดความกว้างราง 1.000 เมตร
  (รางรถไฟของการรถไฟแห่งประเทศไทยใช้ รางแคบแบบ มิเตอร์ เกจ)

B. รางมาตรฐาน (Standard gauge)

เป็นราง 1.435 เมตร หรือ 1,435 มม. นิยมใช้มากที่สุด เรียก มาตรฐานรางกว้างขนาดนี้ ว่า Standard gauge บางครั้งเรียกว่า European Standard Gauge (ESG.) เป็นรางรถไฟที่กำหนดเป็น มาตรฐานตามกลุ่มในประเทศยุโรป การใช้รางขนาดนี้คิดเป็น 60% ของรางรถไฟโลก

C. รางกว้าง (Broad gauge)

เป็นรางที่มีขนาดความกว้างมากกว่า 1.435 เมตรขึ้นไป

- อินเดียเกจ (Indian gauge) 1.676 เมตร

- ไอเบอเรี่ยน เกจ (Iberian gauge) 1.668 เมตร
- ไอริส เกจ (Iris gauge) 1.600 เมตร
- รัสเซีย เกจ (Russian gauge) 1.520 เมตร

D. รางรถไฟรางผสม (Mixed gauge) หรือรางรถไฟร่วม (Dual gauge)

รางรถไฟรางผสม (Mixed gauge) หรือรางรถไฟร่วม (Dual gauge) เป็นการทำรางรถไฟเพื่อให้รถไฟที่ต้องการความกว้างของราง 2 ระบบ สามารถใช้เส้นแนวทางเดิมได้ โดยวางรางเสริมเข้ากับรางระบบเดิม จึงได้ราง 2 ระบบในแนววางรางเดิม ซึ่งปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มีระบบรางรถไฟรางร่วม

2.1.2 ระบบยึดจับรางรถไฟ (Fasten System)

เป็นสิ่งที่ใช้ยึดเชื่อมต่อระหว่างหมอนรองรางรถไฟและรางรถไฟ ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติการใช้งานหลักของระบบยึดจับรางรถไฟ รวมถึงข้อแตกต่างระหว่างระบบไม้และระบบคอนกรีต จุดประสงค์หลักของระบบยึดจับนั้น คือ การยึดรางติดกับหมอนรองรางรถไฟและต้านการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง และแนวนอน การเคลื่อนที่ตามยาวและพลิกคว่ำของรางรถไฟระบบแรงที่ทำให้เกิด การเคลื่อนที่ต่างๆนั้นมาจากล้อของรถไฟและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของรางรถไฟ

หมอนรองแบบไม้ ต้องการแผ่นเหล็กรองเพื่อที่จะกระจายแรงที่กระทำจากรางลงสู่ผิวไม้ ทำให้ไม้สามารถรับแรงแบกทางที่เหมาะสม และป้องกันไม้จากการทำลายเชิงกล ในการใส่แผ่นเหล็กนี้เพื่อช่วยการจับยึด ในการยึดรั้งการเคลื่อนที่ด้านข้างด้วยการใช้แรงเสียดทาน และการยกพื้นราดเอียงเป็นการพัฒนาเพื่อช่วยเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างล้อกับรางรถไฟในการเข้าโค้ง

การตอกตะปูในการยึดจับ ปกติใช้ในแถบอมริกาเหนือ เพื่อยึดแผ่นเหล็กไม่ให้เคลื่อนที่ในแนวราบตัวแผ่นเหล็กจะมีส่วนที่เกินออกมาเพื่อใช้ในการต้านการเคลื่อนที่ด้านข้างของรางรถไฟแผ่นรองยึดหยุ่นจะไม่ถูกนำมาใช้ในหมอนรองชนิดไม้เนื่องจากตัวหมอนรองแบบไม้นั้นมีความยึดหยุ่นในตัว

หมอนรองชนิดคอนกรีต มีการยึดรั้งในแนวตั้งแนวยาว และ ด้านข้างระบบยึดจับนี้ยังป้องกันการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าจากวงจรการส่งสัญญาณ ไปสู่หมอนรองรางรถไฟหรือรางรถไฟ แผ่นรองจะต้องอยู่ระหว่างรางรถไฟกับหมอนรองรางรถไฟชนิดคอนกรีต เพื่อให้มีฟังก์ชั่นดังนี้

- เพื่อให้ความยืดหยุ่นระหว่างระบบรางรถไฟกับหมอนรองรางรถไฟระบบคอนกรีต
- เพื่อลดการสั่นสะเทือนของล้อรถไฟ
- เพื่อป้องกันหรือลดการเสียดสีของผิดสัมผัสรางรถไฟกับหมอนรองรางชนิดคอนกรีต
- เพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าจากวงจรการส่งสัญญาณของทางรถไฟ

2.1.3 หมอนรองรางรถไฟ

หมอนรองราง (อังกฤษ railroad sleeper, อเมริกา :railroad tie) เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้ยึดจับรางรถไฟให้อยู่กับที่ ช่วยให้ขอบรางทั้ง 2 เส้นมีระยะที่เท่ากันและช่วยถ่ายเทน้ำหนักลงสู่หิน หรือ วัสดุรองราง หมอนรองรางรถไฟนิยมทำจากไม้เนื้อแข็ง ดังตัวอย่างในรูปที่ 2-4 หรือ คอนกรีตอัดแรง

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุสาหกรรม หมอนรองรางที่จะนำมาใช้ต้องนำมาทดสอบทั้งในด้านความทนทานต่อการกดดัน ตลอดจนความต้านทางไฟฟ้าที่อาจจะลัดวงจรจากรางเส้นหนึ่งไปหาอีกเส้นหนึ่งได้ เพื่อให้สามารถใช้ระบบวงจรไฟฟ้า (Track circuit) ได้โดยไม่มีปัญหาขัดข้อง

รูปที่ 2-4 ลักษณะของหมอนไม้

A. หมอนรองรางชนิดไม้

หมอนไม้ทำจากไม้เนื้อแข็ง (เช่น ไม้เต็ง ไม้มะค่า ฯลฯ) หรือไม้เนื้ออ่อนชนิดแข็งอาบน้ำยาครีโอโซต (creosote) หรือโบรอนเพื่อป้องกันปลวกแมลงแทะ ถูกนำมาใช้รองรางรถไฟตั้งแต่ในอดีตมาจนถึงปัจจุบัน หมอนไม้มีข้อดี คือ มีความแข็งแรงพอที่จะถ่ายน้ำหนักขบวนลงสู่หินรองราง ตลอดจนมีความอ่อนตัวต่อแรงกระแทก นอกจากนี้ ความที่ไม้เป็นฉนวนไฟฟ้าก็สามารถวางวงจรไฟฟ้า สำหรับติดตามขบวนรถ เมื่อขบวนรถผ่านจะทำให้วงจรต่อครบจะแสดงผลออกทางวงจร วงจรชนิดนี้ เรียกว่า วงจรโฟตอน

อย่างไรก็ตาม ข้อเสียที่สำคัญของหมอนไม้ คือ ผุง่ายและเมื่อใช้ไปนานๆจาน รองรางจะกินลึก เข้าไปในเนื้อไม้ทำให้ระดับสันรางทรุดตัวลง ต้องเปลี่ยนใหม่ นอกจากนี้ตะปูยึดรางเมื่อได้รับแรงโยกคลอนของขบวนรถที่วิ่งผ่านมากๆเข้า ก็ทำให้ตะปูหลุด ต้องย้ายไปตอกตำแหน่งใหม่ หรือแม้แต่เปลี่ยนหมอน ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการใช้หมอนคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ซึ่งนอกจากจะทนทานกว่าแล้ว ก็ยังรองรับความเร็วขบวนรถที่เพิ่มมากขึ้นได้อีกด้วย

B. หมอนรองรางชนิดคอนกรีตอัดแรง

ด้วยปัญหาที่ในหมอนไม้แบบเดิมมีมาก และสงวนพื้นที่ป่าไม้ จึงทำให้มีการพัฒนาหมอนรองรางที่ทำด้วยคอนกรีตอัดแรง ใส่โครงเหล็กไว้ภายใน ซึ่งมีราคาถูกกว่าไม้ และรองรับแรงที่กระทำต่อเพลาได้มากขึ้น ยิ่ง

ไปกว่านั้นการใช้หมอนคอนกรีตอัดแรงกับรางเชื่อมยาวก็ยังสามารถทำให้ความเร็วขบวนรถมีมาก และลดเสียงรบกวน จากการเด้งของรางได้ด้วย อย่างไรก็ตาม หมอนคอนกรีตต้องติดตั้งกับหินรองทางที่โรยอย่างหนาแบะคันทางที่อัดแน่นอย่างดี จึงเกิดประสิทธิภาพในการใช้งานสูงสุด

ความคิดเรื่องหมอนคอนกรีตอัดแรงมีมาตั้งแต่ พ.ศ.2420 โดยได้มีการคิดค้นหมอนรองรางที่ทำจากคอนกรีตขึ้น กระนั้นก็ยังไม่เป็นที่แพร่หลายนัก จวบจนสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งไม้หาได้ยากขึ้นทำให้เกิดการพัฒนาหมอนคอนกรีตในยุโรป เมื่อยิ่งเพิ่มน้ำหนักของรางและเชื่อความยาวรางให้ติดกันมากขึ้นเท่าใด การผลิตหมอนก็ต้องมีคุณภาพดีมากขึ้นเท่านั้นในปัจจุบันหมอนคอนกรีตมีการใช้แพร่หลายกันในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทย

2.1.4 Ballast

คือ วัสดุที่ใช้โรยทางและทำการบดอัดในชั้นบนสุดของโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งอยู่ใต้หมอนรองรางรถไฟ โดยปกติแล้ว หินที่มีความแข็งแรง มีเหลี่ยมมุม มีความต้านทานต่อการขัดสี นี้เป็นองค์ประกอบที่ช่วยให้เป็นรางรถไฟที่สมบูรณ์แบบเรื่องที่กล่าวมานั้นเป็นเรื่องที่ซับซ้อนที่ยังมีการวิจัยอยู่จากความพร้อมของทางเศรษฐกิจ การเงิน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกวัสดุบัลลาสต์ ดังนั้น ความหลากหลายของวัสดุต่างๆ ที่ถูกนำใช้เป็นบัลลาสต์ เช่น หินแกรนิต หินบะซอลต์ หินปูน เศษหิน และกรวดจึงทำให้มีคุณภาพแตกต่างกันไป บัลลาสต์อาจแบ่งย่อยออกเป็น 4 หมวดดังนี้

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

บัลลาสต์มีหน้าที่ดังนี้

- ต้านทานแรงในแนวตั้ง แนวนอนและตามยาว จากหมอนรองรางรถไฟเพื่อรักษาทางรถไฟให้อยู่ในตำแหน่งเดิม
- ให้ความยืดหยุ่นและซึมซับพลังงานจากรางรถไฟ
- ให้ช่องว่างขนาดใหญ่เพื่อเก็บวัสดุที่ปนเปื้อนในบัลลาสต์ และเคลื่อนย้ายอนุภาคผ่านชั้นบัลลาสต์
- ทำให้ง่ายในการบำรุงรักษาผิวหน้า และขั้นตอนการดำเนินการซ่อมแซมชั้นบัลลาสต์ (tamping)
- ช่วยให้เกิดการระบายน้ำในทันที เมื่อมีน้ำขังอยู่บนรางรถไฟ
- ลดแรงแบกทานจากไม้หมอนเพื่อให้มีค่าความเค้นที่ยอมให้ของวัสดุชั้นถัดลงไป แม้ว่าค่าความเครียดจะลดลงโดยเพิ่มความหนาของชั้นบัลลาสต์ ถึงกระนั้นชั้นที่รองรับบัลลาสต์จะต้องมีอนุภาคที่มีความคงทนและสัมผัสกับความเครียดสูงตามไปด้วย
- เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช โดยให้มีชั้นปกคลุมที่ไม่เหมาะต่อการเจริญเติบโตของพืช

- ดูดซับเสียงในอากาศ
- ให้มีความต้านทานไฟฟ้าเพียงพอระหว่างรางรถไฟ

2.1.5 Sub-Ballast

คือ ชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นบัลลาสต์และชั้นดินเดิม มีหน้าที่ดังนี้

- ลดค่าความเครียดบริเวณใต้ชั้นบัลลาสต์ที่เกิดจากการใช้งานให้อยู่ในระดับชั้นดินเดิมสามารถรับได้
- ขยายการป้องกันการแข็งตัวของน้ำในชั้น Subgrade
- ป้องกันการแทรกซึมของดินเดิมและบัลลาสต์
- ป้องกันการเคลื่อนย้ายของวัสดุที่มีความละเอียดเล็ดลอดมาจากชั้นดินเดิม
- ป้องกันการสึกกร่อนของบัลลาสต์จะเกิดเมื่อมีน้ำซึ่งนำไปสู่การสลายและการป้องกันต้นเหตุของการเกิด pumping นี่คือปัญหาหลักของชั้นดินเดิมที่แก้ไขปัญหาได้ยาก
- ระบายน้ำจากบัลลาสต์และชั้นดินเดิมไหลไปสู่คูน้ำด้านหน้าของทางรถไฟ
- ยอมให้มีการระบายน้ำขึ้นมาจากชั้นดินเดิมนี่คือ ฟังก์ชั่นที่สำคัญที่สุดในประสิทธิภาพของบัล-ลาสต์ที่น่าพึงพอใจ

2.1.6 Sub-Grade

คือ ฐานที่ใช้รองรับการสร้างโครงสร้างทางรถไฟเพื่อให้ฐานรากมีเสถียรภาพ โดยอิทธิพลจากค่าความเครียดที่เกิดจากการใช้งานขยายตัวลึกลงถึง 5 เมตรใต้หมอนรองรางรถไฟเกินความลึกของบัลลาสต์และชั้นรองบัลลาสต์ ด้วยเหตุนี้ชั้นดินเดิมจึงเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากในโครงสร้างพื้นฐานซึ่งมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของทางรถไฟและการบำรุงรักษา สำหรับตัวอย่างดินเดิม คือ ส่วนประกอบหลักที่มีความยืดหยุ่นในการรองรับโครงสร้างขนาดใหญ่และด้วยเหตุนี้มีส่วนอย่างมากในการโก่งตัวช่วงอิลาสติกของรางรถไฟภายใต้น้ำหนักจากล้อ การเพิ่มความหนาจากชั้นดินเดิมเชื่อได้ว่ามีผลต่อการเสื่อมสภาพของบัลลาสต์รางรถไฟและหมอนรางรถไฟ ชั้นดินเดิมนี้เป็นสาเหตุการทรุดตัวของรางที่แตกต่างกัน

ชั้นดินเดิมนี้อาจแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ ชั้นดินเดิมที่มีตามธรรมชาติและชั้นดินเดิมที่มีการสร้างขึ้นเพื่อที่จะให้บริการที่มีเสถียรภาพที่ดีจะต้องหลีกเลี่ยง

- การทำให้เกิดการทรุดตัวเพิ่มขึ้นมากเกินไปจากน้ำหนักการจราจรที่เกิดขึ้นซ้ำไปซ้ำมา
- การทรุดตัวคายน้ำและการพังด้วยแรงเฉือนมากๆจากการรวมน้ำหนักของรถไฟ ทางรถไฟ และน้ำหนักดิน
- มีการพังจากแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนักของล้อกระทำซ้ำไปซ้ำมา
- การเปลี่ยนแปลงปริมาตรมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความชื้น
- การสึกกร่อนของชั้นดินเดิม

2.1.7 Drainage

ลักษณะส่วนประกอบของทางรถไฟจะไม่สมบูรณ์ถ้าไม่กล่าวถึงสิ่งที่สำคัญที่สุดคือ ระบบ การระบายน้ำ ระบบระบายน้ำมีหลายฟังก์ชั่น เช่น

- ป้องกันน้ำใต้ผิวดินไม่ให้เข้าไปในบริเวณโครงสร้างทางรถไฟ
- ป้องกันน้ำด้านข้างทางรถไฟเข้าไปในโครงสร้างทางรถไฟ
- กำจัดน้ำที่ระบายออกมาจากชั้นบัลลาสต์และชั้นรองบัลลาสต์

2.2 ชนิดของหินโรยทางรถไฟ

หินที่นำมาใช้โรยทางรถไฟ หรือหินที่มักจะนำมาทำเป็นบัลลาสต์มีดังนี้

- หินแกรนิต (granite) เป็นหินอัคนีบาดาลสีเทาขาว โดยมากจะมีจุดประสีดำ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2-5 ประกอบด้วย แร่ควอตซ์สีขาวใส แร่เฟลด์สปาสีขาวขุ่น และแร่ไบโอไทต์สีคล้ำ เป็นส่วนใหญ่ หินแกรนิตเป็นส่วนสำคัญบนเปลือกโลก ในประเทศไทย มักพบตามแนวเขาขนาดใหญ่ของประเทศ แถบทิวเขาตะนาวศรี ทิวเขาภูเก็ตภาคตะวันตก และภาคใต้ (จังหวัดพังงา ระนอง ภูเก็ต) ทิวเขาธงชัย ทิวเขาผีปั่นน้ำแบะทางภาคเหนือ ประโยชน์ ใช้ทำหินประดับ หินแกะสลักทำอนุสาวรีย์ วัสดุก่อสร้าง
- หินบะซอลต์ (Basalt) เป็นหินภูเขาไฟสีเข้มถึงดำ เนื้อละเอียด ดังตัวอย่างในรูปที่ 2-6 และมีส่วนประกอบของแร่เฟลด์สปาร์ ฮอร์นเบลนด์ ผลึกดอกมักเป็นแร่โอลิวีนหรือไพร็อกซีน เนื้อหินมักมีรูพรุนในประเทศไทยมักพบที่จังหวัด ศรีสะเกษ ลำปาง กาญจนบุรี และจันทบุรีบางแห่งซึ่งเป็นต้นกำเนิดพลอย
- หินดินดาน (Shale) เป็นหินเนื้อละเอียดมากเหมือนดินเหนียว มักมีรอยชั้นบางๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2-7 เมื่อบิดจะแตกตัวตามรอยชั้น มักจะพบซากดึกดำบรรพ์อยู่มีสีต่างกัน เช่น น้ำตาล แดงเหลือง เทา เขียว และดำ ซึ่งจะประกอบด้วยแร่ควอตซ์ซึ่งมีจำนวนน้อยกว่ามอนต์มอร์โลไนท์ ดินเหนียว และ ไมกา พบเกือบทุกจังหวัดในภาคกลางของประเทศไทย เช่น จังหวัด ลพบุรี สระบุรี อยุธยา นนทบุรี เป็นต้น ประโยชน์ ใช้ทำเครื่องปั้นดินเผา เซรามิค ให้เป็นส่วนประกอบในการทำปูนซีเมนต์
- หินควอร์ตไซต์ (Quartzite) เป็นหินประเภทหินแปรเมื่อแตกจะมีหินแตกตามรอยโค้งเว้า เนื้อละเอียด เป็นผลึกคล้ายน้ำตาลทราย ดังตัวอย่างในรูปที่ 2-8 แกร่งแต่เปราะ แปรสภาพมาจากหินทราย โดยในประเทศไทยจะพบหินชนิดนี้ ในประเทศไทยบริเวณ จังหวัดชลบุรี กาญจนบุรี ประโยชน์ใช้ทำหินก่อสร้าง อุตสาหกรรมแก้ว และวัสดุทนไฟ
- หินปูน (limestone) หินปูนมีเนื้อแน่นละเอียดทึบ มีสีออกขาว เทา ชมพู หรือสีดำก็ได้ อาจมีซากดึกดำบรรพ์ในหินได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2-9 โดยในประเทศไทยจะพบที่บริเวณ เพชรบุรี กระบี่ พังงา เป็นต้น ประโยชน์ ใช้ทำหินประดับ หินแกะสลัก หินลับมีด
- หินไรโอไลต์ (Rhyolite) เนื้อละเอียดมากโดยทั่ว ๆ ไป มักจะมีสีจาง เช่น ขาว ชมพูซีด หรือ เทาบางทีก็มีเนื้อแก้วมักจะเป็นเม็ดแร่ควอร์ตซ์ใสๆฝังในเนื้อหิน ดังตัวอย่างในรูปที่ 2-10 โดยในประเทศไทยจะพบหิน

ปรากฏเป็นบริเวณทั่วไปตามภาคต่างๆที่มีลักษณะเป็นเขาใหญ่ที่มีต่อเนื่องกัน พบที่จังหวัดสระบุรี ลพบุรี เพชรบุรี และจังหวัดแพร่ ยกเว้นภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

รูปที่ 2-5 หินแกรนิต

รูปที่ 2-6 หินบะซอลต์

รูปที่ 2-7 หินดินดาน

รูปที่ 2-8 หินควอร์ตไซต์

รูปที่ 2-9 หินปูน

รูปที่ 2-10 หินไรโอไลต์

2.3 มาตรฐานหินโรยทางรถไฟประเทศต่างๆ

2.3.1 มาตรฐานหินโรยทางรถไฟประเทศออสเตรเลีย

มาตรฐานของหินโรยทางรถไฟในประเทศออสเตรเลียถูกกำหนดโดย หน่วยงาน Australian Rail Track Corporation (ARTC) ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 มาตรฐานหินโรยทางรถไฟประเทศออสเตรเลีย

Bulk Density	เพื่อให้ข้อกำหนดตรงกับมาตรฐาน AS1141.4 ต้องให้ Bulk Densityไม่น้อยกว่า 1200 Kg/m^3
Particle Density	เพื่อให้ข้อกำหนดตรงกับมาตรฐาน AS1141.6 ต้องให้ค่า Particle Density มีค่าไม่น้อยกว่า 2500 Kg/m^3
Particle Shape	ตามมาตรฐาน AS1141.14 ต้องให้บัลลาสต์ที่มีลักษณะไม่ได้มาตรฐานค้างบนตะแกรงขนาด 9.5 mm ไม่เกิน 30% และมีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวเป็น 2:1
Flakiness Index	ตามมาตรฐาน AS1141.15 สัดส่วนบัลลาสต์ที่เป็นฝุ่นต้องค้างบนตะแกรง 6.70 mm ต้องไม่เกิน 30% และมีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวเป็น 2:1
Crushed Particles of Coarse Aggregate	ตามมาตรฐาน AS1141.18 บัลลาสต์ที่ได้มาจากกรวดแม่น้ำ ต้องมีมวลของอนุภาคบดอัดอย่างน้อย 75% และต้องมีสัดส่วน uncrushed 5%
Aggregate Crushing Value	ตามมาตรฐาน AS1141.21 ต้องให้บัลลาสต์ที่ผ่านตะแกรง ขนาด 26.5 mm และค้างบนตะแกรง 19.00 mm จะได้ค่า 25%max
Wet Attrition Value	การขัดสีของบัลลาสต์ที่เปียก ตามมาตรฐาน AS1141.27 สำหรับบัลลาสต์ที่ผ่านตะแกรงขนาด 53.00 mm และค้างบนตะแกรง 37.5 mm ควรจะได้ค่า 6% max
Los Angeles Values	ตามมาตรฐาน AS1141.23 ควรจะได้ค่า 25%max

ตารางที่ 2-1 มาตรฐานหินโรยทางรถไฟประเทศออสเตรเลีย (ต่อ)

Particle Size Distribution	Sieve Size (mm)	Nominal Size (mm)
		60
		% passing by mass
	63.0	100
	53.0	85-100
	37.5	20-65
	26.5	0-20
	19.0	0-5
	13.2	0-2
	9.50	-
	4.75	0-1
	1.18	-
	0.075	0-1

2.3.2 มาตรฐานหินโรยทางรถไฟประเทศอินเดีย

ตารางที่ 2-2 มาตรฐานหินโรยทางรถไฟประเทศอินเดีย

Particle shape	บัลลาสต์ควรจะมีเหลี่ยมเท่าที่จะเป็นไปได้ ที่ผิวของบัลลาสต์ควรจะสะอาด แบนและไม่โค้งมนมากเกินไป
Aggregate Abrasion value	BG,MG & NG 30%max NG&MG 35%max
Aggregate Impact value *BG คือ Broad Gauge MG คือ Metre Gauge NG คือ Narrow Gauge	BG,MG & NG 20%max NG&MG 30%max
	Note: โดยในทางทางเทคนิคหรือในพื้นที่เศรษฐกิจของประเทศอินเดียจะใช้ค่าการทดสอบนี้อยู่ที่ไม่เกิน 25%-35%
Water Absorption	การทดสอบตามมาตรฐาน IS 2386 Pt.3-1963 กำหนดไว้ว่าการทดสอบนี้ไม่ควรเกิน 1% และขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของ เจ้าของโครงการก่อสร้าง
SIZE AND GRADATION	ไม่ผ่านตะแกรงขนาด 65 mm (+,- 1.5mm) 5%max
	ไม่ผ่านตะแกรงขนาด 40 mm (+,- 1.5 mm) 40%-60%
	- ไม่ผ่านตะแกรงขนาด 20 mm (+,- 1 mm) - ไม่น้อยกว่า 98% สำหรับเครื่องเขย่า - ไม่น้อยกว่า 95%สำหรับมือเขย่า

2.3.3 มาตรฐานของหินโรยทางรถไฟประเทศอเมริกา

มาตรฐานของหินโรยทางรถไฟของประเทศอเมริกาถูกกำหนดโดย หน่วยงาน American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 มาตรฐานของหินโรยทางรถไฟประเทศอเมริกา

Property	Ballast Material							
	Grantie	Traprock	Quatzite	Limes tone	Dolomitic Limestone	Blast Furnace Slag	Steel Furnace Slag	ASTM Test
Percent Material passing No.200 Sieve	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	C117
Bulk Specific Gravity	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	C127
Absorption Percent	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	C127
Clay Lump and Friable Particles	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	C142
Degradation	35%	25%	30%	30%	30%	40%	30%	-

Soundness (Sodium Sulfate)	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	C88
Flat and Elongated	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	D4791

ตารางที่ 2-3 มาตรฐานของหินโรยทางรถไฟประเทศอเมริกา (ต่อ)

Size	Nominal Size Opening	Percent Passing									
		3 ”	2.5 ”	2 ”	1.5 ”	1 ”	$\frac{3}{4}$ ”	0.5 ”	d ”	No.4	No.8
24	2.5 ”- $\frac{3}{4}$ ”	100	90-100	-	25-60	-	0-10	0-5	-	-	-
25	2.5 ” -d ”	100	80-100	60-85	50-70	25-50	-	5-20	0-10	0-3	-
3	2 ” -1 ”	-	100	95-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-
4A	2 ” - $\frac{3}{4}$ ”	-	100	90-100	60-90	10-35	0-10	-	0-3	-	-
4	1.5 ” - $\frac{3}{4}$ ”	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-	-
5	1 ” - d ”	-	-	-	100	90-100	40-75	15-35	0-15	0-5	-
57	1 ” -No.4	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5

Note : Gradation Numbers 24, 25, 3, 4A, and 4 are main line ballast materials. Gradation Numbers 5 and 57 are yard ballast materials.

2.4 ข้อแตกต่างของหินโรยทางรถไฟแต่ละประเทศกับมวลรวมของคอนกรีต

2.4.1 การเปรียบเทียบมาตรฐานของหินโรยทางรถไฟของแต่ละประเทศ

หินโรยทางรถไฟของแต่ละประทศจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปตามหน่วยงานของประเทศ นั้น ๆ กำหนด ดังตารางที่ 2-4 จากตารางการที่ 2-4 การเปรียบเทียบหินโรยทางรถไฟของแต่ละประเทศซึ่งนำเอาคุณสมบัติที่เหมือนกันของหินโรยทางของแต่ละประเทศมาจะเห็นได้ว่าแต่ละประเทศมีมาตรฐานของหินโรยทางที่มีคุณสมบัติตามการทดลองได้ค่าออกมาเท่า ๆ กัน ซึ่งมาตรฐานของออสเตรเลียจะมีความน่าเชื่อถือมากที่สุดเพราะค่าของการทดลองที่ระบุจะบอกแบบชัดเจน

ตารางที่ 2-4 การเปรียบเทียบมาตรฐานของหินโรยทางรถไฟของแต่ละประเทศ

รายละเอียด	อินเดีย	อเมริกา	ออสเตรเลีย
ค่าความถ่วงจำเพาะ	2.6	2.6 – 2.65	2.5
ค่าความดูดซึม	ไม่เกิน 1 %	1 – 2 %	-
ลักษณะทางกายภาพ	มีเหลี่ยมแต่ไม่โค้งมนเกินไป	มีเหลี่ยมแต่ไม่โค้งมนเกินไป	ไม่เกิน 30 % (AS1141.6)
ดัชนีความแบน	-	5 %	ไม่เกิน 30 % (AS1141.15)
ค่าความต้านทานการบดอัด (ACV)	25 – 35 %	-	25 % max
ค่าความทนทาน (LAA)	-	25 – 40 %	25 % max

2.4.2 การเปรียบเทียบมาตรฐานมวลรวมหยาบของคอนกรีตกับมาตรฐานหินโรยทางรถไฟของประเทศต่างๆ

จากตารางที่ 2-5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของหินโรยทางรถไฟกับมวลรวมหยาบของส่วนผสมคอนกรีตพบว่าค่าการขัดสีของหินโรยทางรถไฟมีค่าน้อยกว่าแสดงให้เห็นว่ามีความคงทนมากกว่ามวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีตรวมถึงค่า การทดสอบ Soundness ด้วย

ตารางที่ 2-5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของหินโรยทางกับหินที่เป็นส่วนผสมคอนกรีต

รายละเอียด	คอนกรีต	ออสเตรเลีย	อินเดีย	อเมริกา
ความถ่วงจำเพาะ	ไม่น้อยกว่า 2.60	2.50	2.60	2.60-2.65
Los Angeles Values	ไม่เกิน 50	25%	30-35%	25-40%
Soundness	ไม่เกิน 12	-	-	5%

2.5 คุณสมบัติของหินโรยทางรถไฟ

2.5.1 การทดสอบคุณสมบัติความคงทนของอนุภาค

คุณภาพของวัสดุบัลลาสต์ถูกกำหนดโดยลักษณะเฉพาะของอนุภาค มีการทดสอบมากมายที่ใช้ในการหาลักษณะเฉพาะของอนุภาค โดยแต่ละการทดสอบนี้มีการบรรยาย และบอกขั้นตอนตามมาตรฐาน

A. Los Angeles abrasion (ASTM C131, ASTM C535)

การทดสอบ LAA test คือการทดสอบแบบแห้ง ซึ่งใช้วัดค่าความทนทาน หรือแนวโน้มการแตกร้าวของวัสดุ มาตรฐานที่เหมาะสมในการทดสอบบัลลาสต์ คือ ASTM C535 ซึ่งประกอบด้วยวัสดุแห้ง จำนวน 10 กิโลกรัม ลูกเหล็กกลม 12 ลูก น้ำหนักรวม 5 กิโลกรัม ลงในเครื่องทดสอบโดยหมุน 1000 รอบซึ่งการกระแทก

ของลูกบอล จะทำให้อนุภาคของบัลลาสต์เกิดการแตก จากนั้นนำวัสดุมาทำการล้างโดยใช้ตะแกรงร่อนเบอร์ 12 (1.7 ม.ม.) ค่าที่ได้ คือเปอร์เซ็นอัตราส่วนวัสดุที่ผ่านตะแกรงต่อน้ำหนักของวัสดุก่อนทดสอบ

B. Aggregate Compression Value (BS 812 Part 110:1990)

คือการทดสอบการบดอัด เป็นการวัดค่าความต้านทานการบดอัดของหินเมื่อถูกน้ำหนักบดทับตัวอย่างที่เตรียมอยู่ใน Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 154 mm. ลึก 134 mm. แรงที่กระทำจากด้านบนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึง 390 กิโลนิวตัน (40 ตัน) ในระยะเวลา 10 นาที จากนั้นนำตัวอย่างมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ที่กำหนด แล้วนำส่วนค้างไปอบ ค่าที่ได้คือเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนน้ำหนักหินที่ค้างบนตะแกรงส่วนด้วยน้ำหนักของหินทั้งหมด

C. Aggregate Impact Value (BS 812 Part 112:1990)

คือการทดสอบวัดค่าความต้านทานแรงที่กระทำอย่างฉับพลันหรือแรงกระแทก ในการทดสอบนี้จะทำการเตรียมตัวอย่างใน mold เหล็กและทำการกระแทก 15 ครั้ง ด้วยลูกตุ้ม น้ำหนักประมาณ 14 กิโลกรัม ตกกระแทกอย่างอิสระที่ความสูง 380 มิลลิเมตร จากนั้นนำตัวอย่างมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ที่กำหนด แล้วนำส่วนที่ค้างไปอบ ค่าที่ได้คือเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนน้ำหนักหินที่ค้างบนตะแกรงส่วนด้วยน้ำหนักของหินทั้งหมด

2.5.2 การทดสอบรูปร่าง Shape Tests

A. การทดสอบ Flat & Elongation (ASTM D4791)

การทดสอบ Flat คือการหาค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความกว้างต่อความยาวของอนุภาคโดยใช้อัตราส่วน 1:2 หรือ 1:3 หากอัตราส่วนที่ได้มีค่าเกินกว่าที่กำหนดอนุภาคนั้นถือว่า flat ค่าที่ได้จะแสดงเป็นรูป % น้ำหนักอนุภาคที่ flat

การทดสอบ Elongation คือการหาค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความหนาต่อความกว้างของอนุภาคโดยใช้อัตราส่วน 1:2 หรือ 1:3 หากค่าอัตราส่วนที่ได้มีค่าเกินกว่าที่กำหนดอนุภาคนั้นถือว่า flat ค่าที่ได้แสดงในรูป % อนุภาคที่ Elongation

B. การตรวจสอบด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscopy (SEM)

คือการขยายภาพดินส่วนละเอียดด้วยกำลังขยาย 500 – 3500 เท่า เพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบของดินในส่วนละเอียด เพื่อช่วยในการสันนิษฐานว่าดินส่วนละเอียดมาจากส่วนใด และมีโครงสร้างใหญ่หรือเล็กเพียงใดเมื่อเทียบกัน

2.5.3 การหาขนาดคละ

A. Sieve Analysis (ASTM D422, D1140, D6913)

คือการทดสอบหาขนาดคละของบัลลาสต์ โดยใช้การร่อนและล้างผ่านตะแกรง การใช้เครื่องร่อน มีขั้นตอน ตามการทดสอบต่าง ๆ เช่น ASTM C117, C136 และ D422 เป็นต้น ลำดับชั้นทั่วไปแสดงในรูปการกระจายความถี่สะสม โดยแกนตั้งแสดงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักวัสดุผ่านตะแกรง ส่วนแกนนอนแสดง log ของขนาดอนุภาควัสดุ

B. การทดสอบ hydrometer (ASTM D422)

เป็นการทดสอบที่ต่อเนื่องจากการร่อนผ่านตะแกรง โดยการทดสอบนี้จะหาขนาดคละของดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) โดยผลการทดสอบจะพล็อตในกราฟ semi – log ระหว่างค่า % finer และขนาดของอนุภาคดิน ซึ่งการทดสอบ hydrometer เป็นการทดสอบการตกตะกอนของอนุภาคดินในน้ำแล้วนำมาวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคโดยอาศัยหลักการของ Stoker' s law ซึ่งให้ความสัมพันธ์ ระหว่างความเร็วของทรงกลมในของเหลว, เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม, specific gravity ของทรงกลมและของเหลว และความหนืดของของเหลว

2.5.4 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

A. การทดสอบหาค่า Specific Gravity และ Absorption of Aggregates (ASTM C127)

ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม หมายถึงอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาตรเนื้อแท้ของมวลรวมต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน โดยที่มวลรวมมีรูพรุน ดังนั้นความถ่วงจำเพาะของมวลรวมจึงอาจแยกออกได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

- ความถ่วงจำเพาะทั้งหมด (Bulk Specific Gravity) เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาตรของมวลรวม (ที่รวมทั้งรูพรุนทั้งหมดและช่องว่างภายในของมวลรวม) ต่อน้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน
- ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent Specific Gravity) เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาตรเนื้อแท้มวลรวม (ที่รวมรูพรุนที่น้ำเข้าไม่ได้ (Impermeable porous) และช่องว่างภายในของมวลรวม) ต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน
- ความถ่วงจำเพาะสมบูรณ์ (Absolute or True Specific Gravity) เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาตรเนื้อแท้ของมวลรวม (ที่รวมรูพรุนและช่องว่าง) ต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน

ปริมาณน้ำในมวลรวมอาจอยู่ในสภาวะใดสภาวะหนึ่งใน 4 อย่าง

- แห้งด้วยเตาอบ (Oven Dry) ในสภาวะนี้มวลรวมสามารถดูดซึมความชื้นได้เต็มที่
- แห้งในอากาศ (Air Dry) หรือแห้งที่ผิวแต่มีความชื้นอยู่ภายในช่องว่างข้างใน ในปริมาณที่น้อยกว่าสภาวะอิ่มตัวและผิวแห้ง ดังนั้นมวลรวมจึงอาจดูดซึมความชื้นได้บ้าง

- อิ่มตัวและผิวแห้ง (Saturated Surface-Dry) เป็นสภาวะที่ดีที่สุด โดยที่มวลรวมไม่คายน้ำออกหรือดูดน้ำจากคอนกรีต
- ชื้นหรือเปียก (Damp or Wet) เป็นสภาวะที่ปริมาณความชื้นสูงมากเกินไป โดยมีน้ำหุ้มก้อนมวลรวมอยู่ด้วย

B. การทดสอบ Specific gravity โดยวิธีใช้ Volumetric flask (ASTM D854)

Specific gravity คือค่าอัตราส่วนส่วนมวลของอนุภาคดินต่อมวลน้ำที่มีปริมาตรเท่ากันที่ 20 องศาเซลเซียส โดยการทดสอบจะนำเอาขวด Volumetric flash แห้งไปชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่า จากนั้นเติมน้ำให้ถึงขีดปริมาตรรอจนอุณหภูมิคงที่ แล้วนำไปชั่งน้ำหนักบันทึกค่าเป็น Volumetric flash + water พร้อมบันทึกอุณหภูมิ จากนั้นเทดินอบแห้งที่เตรียมไว้ใส่ลงไปในขวด Volumetric flash แล้วเติมน้ำให้มีระดับประมาณ 1/3 ของขวดแล้วนำไปต้มเพื่อไล่อากาศออกจากดิน เมื่อเสร็จให้เติมน้ำให้ถึงขีดปริมาตรของขวดรอให้อุณหภูมิคงที่แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเป็นค่า Volumetric flask + water +soil แล้วนำค่าที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณหาค่า Specific gravity โดยค่า Specific gravity สามารถนำไปใช้ในการทดสอบ hydrometer ได้

2.5.5 การทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมความต้านทานซัลเฟต (ASTM C88-99a)

การทดสอบความต้านทานซัลเฟต คือการหาความต้านทานของการสึกกร่อนจากการแข็งตัวและการดูดซึมน้ำของมวลรวมซ้ำไปซ้ำมาโดยสารละลายโซเดียม มาตรฐาน ASTM การทดสอบจะกระทำห้ารอบสลับกันโดยการแช่มวลรวมในสารละลายตามด้วยการอบ ค่าที่ได้คือเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนน้ำหนักหินที่ค้างบนตะแกรงส่วนด้วยน้ำหนักของหินทั้งหมด ผลของค่าความต้านทานมีความสัมพันธ์กับชนิดของหิน

2.5.6 การทดสอบด้านอื่นๆ

A. Atterberg limit (ASTM D4318)

จากสภาพทั่วไปของดิน ถ้าพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบ (Phase Relation) ของดินที่ประกอบไปด้วยเม็ดดินและน้ำ ถ้าดินมีน้ำผสมอยู่มาก สภาพของดินจะอยู่สภาพเป็นของเหลว (Liquid State) และมีปริมาตรอยู่ในระดับหนึ่ง เมื่อความชื้นหรือน้ำในมวลดินลดลงจนสถานะของดินเปลี่ยนเป็นพลาสติก (Plastic State)ปริมาตรของดินก็จะลดลงมาในระดับหนึ่ง และเมื่อความชื้นหรือน้ำในมวลดินลดลงอีก จนสถานภาพของดินเปลี่ยนสภาพเป็นกึ่งของแข็ง (Semi-solid State) ซึ่งปริมาตรของดินก็จะลดลงอีกระดับหนึ่ง และเมื่อความชื้นในมวลดินลดลงอีก สภาพของดินก็จะเปลี่ยนเป็นสภาพของแข็ง (Solid State) ซึ่งปริมาตรของดินเมื่อลดลงมาถึงระดับนี้แล้ว หากมีการสูญเสียความชื้นหรือน้ำในมวลดินต่อไปอีก ปริมาตรของดินก็จะอยู่คงที่ ดังนั้นปริมาณความชื้นจึงเป็นตัวกำหนดสถานภาพของมวลดิน โดยแสดงในรูปของค่าพิกัด ต่างๆ ดังนี้

- **Liquid Limit (L.L.)** ทำโดยใช้เครื่องมือของ Casagrande ที่เรียกว่า Liquid Limit- Aparatus โดยนำดินเปียกมาใส่ในถ้วยทองเหลือง ปาดผิวหน้าให้เรียบ แล้วแบ่งดินเป็น 2 ส่วนด้วย Grooving tool หมุนให้ถ้วยยกกระแทกกับฐานเครื่องมือ ด้วยความเร็ว 2 ครั้งต่อวินาที ระยะที่ตกกระแทกเท่ากับ 10 มม.

จนกระทั่งดินที่แบ่งไว้ 2 ส่วนเคลื่อนเข้ามาติดกันประมาณ 1 ซม.บันทึกจำนวนครั้งที่ตกกระแทกและนำดินนั้นไปหา ปริมาณความชื้น ทำซ้ำเช่นนี้ 4-5 ครั้ง โดยให้ดินมีปริมาณความชื้นต่างๆกัน แล้วนำผลไปเขียนเส้นความสัมพันธ์ ระหว่างจำนวนครั้ง กับความชื้นในกราฟ semi-log จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ซึ่งปริมาณความชื้นที่ 25 ครั้ง Liquid Limit ของดิน ซึ่ง A.cassagrande ได้ให้ความเห็นว่าเท่ากับความชื้น ณ จุดที่กำลังของดินเท่ากับ 25 กรัมต่อ ตารางเซนติเมตร โดยเปรียบเทียบไว้ว่าการเคาะแต่ละครั้งเท่ากับหน่วยแรงเฉือนที่กระทำต่อมวลดิน มีค่าประมาณ 1 กรัมต่อตารางเซนติเมตร

- **Plastic Limit (P.L.)** การหา Plastic Limit (P.L.) ทำโดยนำดินชื้นมาคลึงด้วยฝ่ามือบนแผ่นกระจก จนเป็นเส้นด้ายขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 มม.(1/8 นิ้ว) แล้วเริ่มเกิดรอยร้าว ปริมาณความชื้นที่จุดนั้น คือ Plastic Limit ของดิน
- **Shrinkage Limit (S.L.)** คือ ความชื้นซึ่งดินเปลี่ยนจากสภาพกึ่งของแข็งเป็นของแข็ง และจะไม่มีการหดตัวต่อไปอีกแล้ว แต่เมื่อความชื้นยิ่งลดลงไป ฟองอากาศจะเริ่มแทรกเข้าไปในมวลดิน และทำให้เกิดสภาวะไม่อิ่มตัวเกิดขึ้น จนกระทั่งไม่มีความชื้นอยู่เลย

B. การหาอินทรีย์สารเจือปนในมวลรวมละเอียด (Standard Test Method For Organic Impurities in Fine Aggregate)(ASTM C40)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาอินทรีย์สารเจือปนในมวลละเอียดโดยวิธีเทียบสีแผ่นกับแผ่นสีมาตรฐานกับกระจกสีมาตรฐาน โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับน้ำสะอาดแล้วนำตัวอย่างทรายที่ต้องการทดสอบมาผสมด้วย โดยแช่ทรายตัวอย่างไว้ในสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมน้ำไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดให้แผ่นสีมาตรฐานมาเทียบกับสีน้ำในของสารละลายโซเดียมไฮ-ดรอกไซด์ผสมกับทราย

2.6 การเสื่อมสภาพของหินโรยทางรถไฟ (Ballast Fouling)

โครงสร้างพื้นฐานในอุดมคติของทางรถไฟคือ ชั้นหินโรยทางและชั้นรองชั้นหินโรยทางควรมีความคงทนสูง ชั้นฐานรากมีเสถียรภาพ และมีระบบการระบายน้ำที่ดี ชั้นรองหินโรยทางต้องมีความเหมาะสมเพื่อใช้ในการป้องกันการแทรกตัวของดินในชั้นฐานรากเข้าไปสู่ช่องว่างในชั้นหินโรยทางสดหากไม่มีจะทำให้เกิด 3 สาเหตุในการปนเปื้อนของวัสดุหินโรยทาง ในบัลลาสต์ใหม่ ควรพบการปนเปื้อนเพียง 1-2% ต่อน้ำหนักทั้งหมด จากการศึกษาพบว่ามีการปนเปื้อนของบัลลาสต์ที่เพิ่มขึ้นจากหลายสาเหตุ และมีการแบ่งสาเหตุของการปนเปื้อนออกมาเป็น 5 สาเหตุหลัก คือ

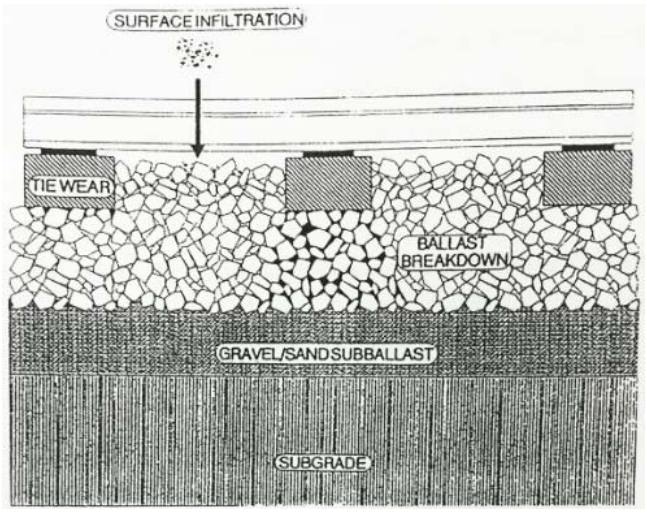
2.6.1 บัลลาสต์เกิดความเสียหาย (Ballast breakdown)

คือการที่วัสดุโรยทางเกิดความเสียหาย ความเสียหายที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งเกิดจากขั้นตอนการขนส่งด้วยเหตุนี้จึงควรมีการตรวจสอบหินโรยทางในขั้นตอนการส่งมอบ ซึ่งการปนเปื้อนที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดบริเวณใต้หมอนรองรางรถไฟที่เกิดจากการรับแรงแบกทานเพียงอย่างเดียว แต่ยังเกิดจากหลายสาเหตุ เช่นการทำลายที่เกิดจากเครื่องจักร ผลจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การพังจากการซ่อมแซมชั้นหินโรยทาง

(tamping) รวมถึงการทำลายที่เกิดน้ำหนักบรรทุกจากการใช้งาน และอนุภาคที่ปนเปื้อนเมื่อมีการซ่อมแซมหินโรยทาง (tamping) จากการสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟที่ผ่านจากการเคลื่อนที่ของน้ำในช่องว่าง

2.6.2 การแทรกซึมจากพื้นผิว (Infiltration from ballast surface)

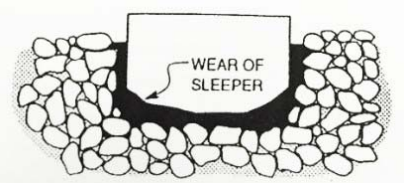
การปนเปื้อนของหินโรยทางที่เกิดจากการแทรกตัวบริเวณผิวจากสิ่งปนเปื้อนร่วงหล่นจากรถไฟ ลมพัดพาสิ่งปนเปื้อนมาและการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำที่มีสิ่งปนเปื้อนจากบริเวณพื้นผิวหินโรยทาง



รูปที่ 2-11 รูปแสดงการซึมจากพื้นผิว

2.6.3 การสึกหรอของหมอนรอง (sleeper wear)

การเสื่อมสภาพของหมอนรองรางรถไฟ ซึ่งสามารถรับรู้ได้ทั้งแบบหมอนรองชนิดไม้และแบบหมอนรองชนิดคอนกรีต เกิดจากถูกกัดกร่อนเป็นปัญหาที่ร้ายแรงสำหรับหินโรยทางและหมอนรองรางรถไฟ จากการศึกษา British railways โดยอาจเรียกว่าการกัดกร่อนจากน้ำของหินโรยทางและหมอนรางรถไฟ (hydraulic erosion of ballast and sleeper) จากการสังเกตพบว่าการทำลายส่วนใหญ่เกิดจากบริเวณจุดที่ติดกันของหินโรยทางกับหมอนรองรางรถ ไฟ ซึ่งเกิดการขัดจากหินโรยทางที่ละเอียด เมื่อมวล ละเอียดนี้รวมกับน้ำจะกลายเป็นสารละลายกัดกร่อนหมอนรองรางรถไฟ และหินโรยทางและก่อให้เกิดช่องว่างใต้หมอนรองรางรถไฟ เมื่อมีแรงมากระทำจะช่วยเพิ่มการกัดกร่อนทำให้ เกิดความเสียหายมากขึ้น ภายใต้แรงกระทำที่เกิดจากการใช้งานผลักดันหมอนรองทำให้เกิดแรงดันน้ำที่ใต้หมอนรองรางรถไฟ น้ำส่วนเกินจะเกิดการพุ่งกระจายเมื่อเกิดแรงดันออกด้านข้าง และด้านบนจากใต้รางรถไฟเมื่อมีความเร็วมากๆจะทำให้เกิดแรงดันมากเช่นกัน



รูปที่ 2-12 รูปแสดงการสึกหรอของหมอนรอง

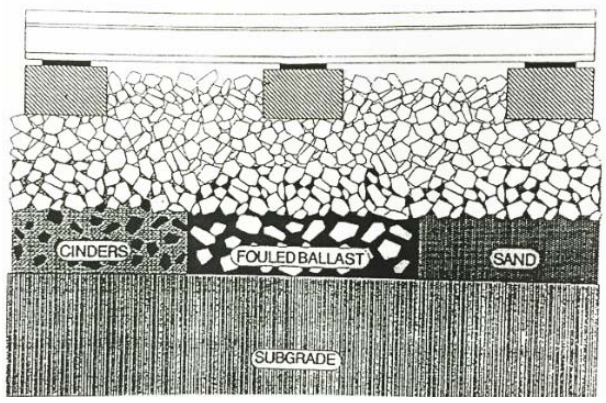
ปัญหาการกัดกร่อนจากน้ำสามารถเริ่มต้นจากสาเหตุการปนเปื้อนอื่นๆก่อน และจะทำให้เกิดการรวมตัวของมวลละเอียดล้อมรอบส่วนล่างของหมอนรองรางรถไฟ และทำให้เกิดแอ่งรองรับน้ำภายใต้หมอนรอง การเกิดการพุ่งออกของน้ำเป็นการที่มีน้ำและสิ่งปนเปื้อนเข้ามาแทนที่หินโรยทางบริเวณล้อมรอบ ใต้หมอนรอง ผลคือจะทำให้ค่าการต้านทานการเคลื่อนที่ด้านข้างของหมอนรองรางรถไฟลดลง และทำให้เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงต่อหมอนรองรางรถไฟชนิดคอนกรีต และจะทำให้เกิดการปนเปื้อนกระจายทั่วทั้งรางรถไฟ ปัจจัยทั่วไปลักษณะของการพังของทางรถไฟในประเทศอังกฤษมีดังนี้

- มีระบบระบายน้ำที่ไม่ดี
- หมอนรองคอนกรีตได้รับน้ำหนักมาก
- วัสดุเห็นโรยทางมีความต้านทานการทำลายต่ำ
- ภายใต้หมอนรองรางรถไฟมีช่องว่างที่เกิดจากการกระแทก จากการใช้งานหรือจากระบบน้ำ

การสลายของหินโรยทางก่อให้เกิดการทำลายหินโรยทางและหมอนรองสามารถป้องกันได้โดย ใช้วัสดุหินโรยทาง ที่มีค่าความต้านทานการทำรายสูงและวัสดุหินโรยทางควรมีระบบการระบายน้ำที่ดี

2.6.4 การแทรกซึมจากชั้นล่างของบัลลาสต์ (Infiltration from underlying granular layers)

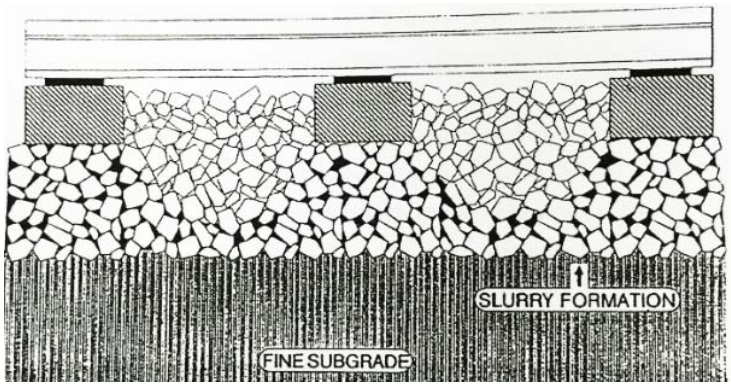
ชั้นใต้หินรองทางเป็นสาเหตุที่สี่ของการปนเปื้อนการปนเปื้อนที่แทรกซึมเข้าไปในช่องว่างของหิน-โรยทาง เกิดจากความบกพร่องในการทำงานของชั้นหินโรยทาง เช่นเมื่อมีการปูวัสดุโรยทางใหม่มีเศษของวัสดุเก่าปนเปื้อนโดยวัสดุเหล่านั้นมักจะถูกกำจัดไม่หมดหรือวัสดุจะเกิดการแตกเล็กลงเมื่อผ่านการใช้งานมากๆ ทำให้มีอนุภาคมีการละเอียดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจมีการใช้ทรายเป็นชั้นรองหินโรยทาง แม้ว่าทรายจะมีความคงทน แต่ก็ยังไม่เป็นที่น่าพอใจเพราะทรายแทรกซึมเข้าไปในชั้นหินโรงทางได้ ทั้งสามสถานการณ์การณ์นี้ การเคลื่อนตัวของสิ่งปนเปื้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเมื่อมีน้ำในชั้นรองชั้นหิน เพราะจะเกิดแรงดันจากน้ำใต้ดิน (tamping) เมื่อมีการใช้งานในบริเวณนั้น



รูปที่ 2-13 รูปแสดงการแทรกซึมจากชั้นล่างของบัลลาสต์

2.6.5 การแทรกซึมของดินชั้นฐานราก (Subgrade Infiltration)

คือการที่ดินในชั้นฐานรากหรือ subgrade เกิดการแทรกตัวขึ้นไปปนเปื้อนด้านบน เมื่อเร็วๆนี้มี การวิจัยที่มหาวิทยาลัย แมซซาชูเสส ในการสังเกตภาคสนามเพื่อหาสาเหตุการปนเปื้อนพบว่า ดินอ่อนในชั้นฐานรากไม่มีผลต่อการปนเปื้อน ในชั้นหินโรยทาง และในความจริงแล้วจากการศึกษาพบว่า สาเหตุหลักในการปนเปื้อนจะเกิดในบริเวณที่มีชั้นฐานรากเป็นดินชนิดดินดาน ดินแข็ง เมื่อทำการตัดหน้าตัดทางรถไฟเพื่อดูโครงสร้างพบว่า มีน้ำขึ้นสู่ชั้นหินโรยทาง ก่อให้เกิดการปนเปื้อน จะเกิดการทำลายจากในบริเวณผิวที่เต็มไปด้วยดินโคลน เมื่อมีแรงกระทำซ้ำไปมาทำให้บริเวณที่มีน้ำทำให้เกิดการสึกกร่อน น้ำเป็นสิ่งเดียวที่ช่วยทำให้ผิวดินโคลนแข็งเกิดการอ่อนตัว แต่อนุภาคของดินชั้นฐานรากที่มาจากการสลายตัวของดินเหนียวจะเป็นส่วนประกอบทำให้ถูกดูดขึ้นไปตามช่องว่างของอากาศในชั้นหินโรยทางและชั้นรองชั้นหินโรยทาง ผลของการปนเปื้อนจะเห็นได้ชัดเมื่ออนุภาคของดินเหนียวละเอียดมาล้อมรอบหมอนรองทางรถไฟทำให้เกิดการกัดกร่อนหมอนรองรางรถไฟ เกิดความเสียหาย ทางแก้ไขที่มีประสิทธิภาพคือ การเลือกวัสดุที่ใช้ในชั้นรองชั้นหินโรยทางให้เป็นวัสดุหินกรวดหรือทรายที่มีความคงทนและมีการระบายน้ำที่ดี เพื่อทำหน้าที่ในการป้องกันชั้นหินโรยทางจากการแทรกซึมของดินในชั้นฐานราก



รูปที่ 2-14 รูปแสดงการแทรกซึมของดินชั้นฐานราก

2.7 ผลกระทบจากการปนเปื้อน

ผลกระทบของการปนเปื้อนของหินโรยทางนั้นก็คือส่วนที่ปนเปื้อนนั้นจะขัดขวางไม่ให้หินโรยทางทำหน้าที่ต่างๆของมันได้ ลักษณะของผลกระทบนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณการปนเปื้อนและสาเหตุของการปนเปื้อนของวัสดุ จากการทดลองพบว่าการสูญเสียความสามารถในการทำหน้าที่ของหินโรยทางนั้น เกิดจากการปนเปื้อนของวัสดุที่เป็นตะกอนและดินเหนียว ความรุนแรงนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณการปนเปื้อนและขนาดของดินเหนียว ดินเหนียวเพียงอย่างเดียวนั้นจะไม่ทำให้เกิดการขัดสี แต่อนุภาคของตะกอนนั้นจะสามารถทำให้เกิดการขัดสีได้ ซึ่งทั้งดินเหนียวและตะกอนนั้นจะขัดขวางระบบการระบายน้ำของรางรถไฟและด้วยเหตุนี้ ดินเหนียวหรือตะกอนจึงเป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพของหินโรยทางเพราะการรายน้ำที่ไม่ดีของรางรถไฟนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้หินโรยทางเสื่อมสภาพ โดยมีสาเหตุหลักคือ (1.) การกัดกร่อนจากแรงดันน้ำ (2.) การขัดสีของดินจากชั้นฐานราก (3.) การสูญเสียเสถียรภาพของหินโรยทาง และสุดท้ายเมื่อระดับการปนเปื้อนสูงพอจะทำให้ไม่สามารถควบคุมคุณสมบัติและพฤติกรรมของหินโรยทางได้ และการซ่อมแซมด้วยวิธี tamping จะมีประสิทธิภาพน้อยลงเมื่อ (1.) หินโรยทางแห้งมากซึ่งจะทำให้ลำบากในการเจาะและจัดเรียงอนุภาค (2.) เมื่อหินโรยทางมีสภาพเปียกมากและอนุภาคมีมวลละเอียดมาเคลือบทำให้ลื่น จะทำให้โครงสร้างชั้นหินโรยทางอ่อนตัวหลังจากทำการ tamping ทำให้ไม่ผ่านการตรวจสอบ

ส่วนการปนเปื้อนที่มาจากอนุภาคของทรายและกรวดละเอียดนั้นจะเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนและค่าความแข็งแรงของหินโรยทางและเพิ่มเสถียรภาพ แต่จะทำให้มีช่องว่างในการระบายน้ำน้อยลงและค่าความยืดหยุ่นลดลงด้วย การปนเปื้อนของทรายและกรวดละเอียดไม่ใช่ปัญหาสำคัญในการซ่อมบำรุง

2.8 ค่าการปนเปื้อน

การหาค่าการปนเปื้อนของหินโรยทาง(Ballast)จากการรวบรวมข้อมูลสามารถทำการแบ่งออกเป็น 5 สมการดังนี้

2.8.1 ค่าดัชนีการปนเปื้อน (Fouling index : F_i)

ในปี ค.ศ.1994 Selig และ Water ได้เสนอพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดค่าการปนเปื้อนของหินโรยทางในอเมริกาเหนือ โดยมีสมการดังนี้

$$F_i = P_{0.075} + P_{4.75}$$

เมื่อ $P_{0.075}$ คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของวัสดุที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร(ตะแกรงเบอร์200)

$P_{4.75}$ คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของวัสดุที่ผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (ตะแกรงเบอร์ 4)

ตารางที่ 2-6 การแบ่งค่าระดับการปนเปื้อนจากสมการ Fouling index

ระดับการปนเปื้อนของ Ballast	ดัชนีการปนเปื้อน(%)
สะอาด	F_i< 1
สะอาดปานกลาง	1<F_i<10
ปนเปื้อนปานกลาง	10<F_i<20
ปนเปื้อน	20<F_i<40
ปนเปื้อนมาก	40<F_i

2.8.2 ค่าดัชนีการปนเปื้อนสำหรับขนาดหินโรยทางขนาดอื่นๆ (Fouling Index : $FI_{P.D}$)

ในปี ค.ศ. 2004 Ionescu ได้เสนอพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดค่าการปนเปื้อนของหินโรยทางในออสเตรเลีย โดยมีสมการดังนี้

$$FI_P = P_{0.075} + P_{13.2}$$

เมื่อ $P_{0.075}$ คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของวัสดุที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร

$P_{13.2}$ คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของวัสดุที่ผ่านตะแกรงขนาด 13.2 มิลลิเมตร

ตารางที่ 2-7 การแบ่งระดับการปนเปื้อนจากสมการการปนเปื้อน(Fouling Index : FI_P)

ระดับการปนเปื้อนของ Ballast	ดัชนีการปนเปื้อน(%)
สะอาด	F_i< 2
สะอาดปานกลาง	2< F_i <10
ปนเปื้อนปานกลาง	10< F_i <20
ปนเปื้อน	20< F_i<40
ปนเปื้อนมาก	40 ≤ F_i

และ Ionescu ยังได้เสนอสมการในการใช้งานไว้อีกสมการคือ

$$FI_D = \frac{D_{90}}{D_{10}}$$

เมื่อ D_{90} คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกับเปอร์เซ็นต์ผ่าน โดยพิจราณาที่เปอร์เซ็นต์ผ่านเท่ากับ 90

D_{10} คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกับเปอร์เซ็นต์ผ่าน โดยพิจารณาที่เปอร์เซ็นต์ผ่านเท่ากับ 10

ตารางที่ 2-8 การแบ่งระดับการปนเปื้อนจากสมการการปนเปื้อน(Fouling Index : FI_D)

ระดับการปนเปื้อนของ Ballast	ดัชนีการปนเปื้อน(%)
สะอาด	F_i< 2.1 และ$P_{13.2}$≤ 1.5 %
สะอาดปานกลาง	2.1< F_i <4
ปนเปื้อนปานกลาง	4< F_i <9.5
ปนเปื้อน	9.6< F_i<40
ปนเปื้อนมาก	40 ≤ F_iและ$P_{13.2}$ ≥ 40%, $P_{0.075}$ ≥ 5%

2.8.3 เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC)

ในปี ค.ศ. 2002 Feldman และ Nissen ได้เสนอ พารามิเตอร์PVCเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษาการปนเปื้อนเพิ่มในช่องว่างอากาศในหินโรยทาง ทำให้ได้สมการดังนี้

$$PVC = \frac{V_2}{V_1} \times 100$$

โดยที่ V_1 คือ ปริมาตรช่องว่างระหว่างบดอัด

V_2 คือ ปริมาตรทั้งหมดของวัสดุที่ปนเปื้อนที่บดอัด(อนุภาคที่ผ่านตะแกรงขนาด 9.5 มิลลิเมตร)

ตารางที่ 2-9 การแบ่งค่าระดับการปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC) Feldman และ Nissen (ค.ศ. 2002)

ระดับการปนเปื้อนของ Ballast	เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนในช่องว่าง, PVC(%)
สะอาด	0 - 20
ปนเปื้อนปานกลาง	20 -39
ปนเปื้อน	≥40

2.8.4 ดัชนีการปนเปื้อนในช่องว่าง (Void contamination index: VCI)

ในปี ค.ศ. 2011 Indraratna, ได้ทำการเสนอพารามิเตอร์ VCI ซึ่งพารามิเตอร์นี้ได้พัฒนามาจากพารามิเตอร์ PVC ของ) Feldman และ Nissen โดยเป็นการหาค่าการปนเปื้อนที่เกิดขึ้นจริงของหินโรยทาง โดยหาได้จากสมการ

$$VCI = \frac{1+e_f}{e_b} \times \frac{G_{sb}}{G_{sf}} \times \frac{M_f}{M_b} \times 100$$

เมื่อ e_b คือ อัตราส่วนช่องว่างของหินโรยทางที่สะอาด

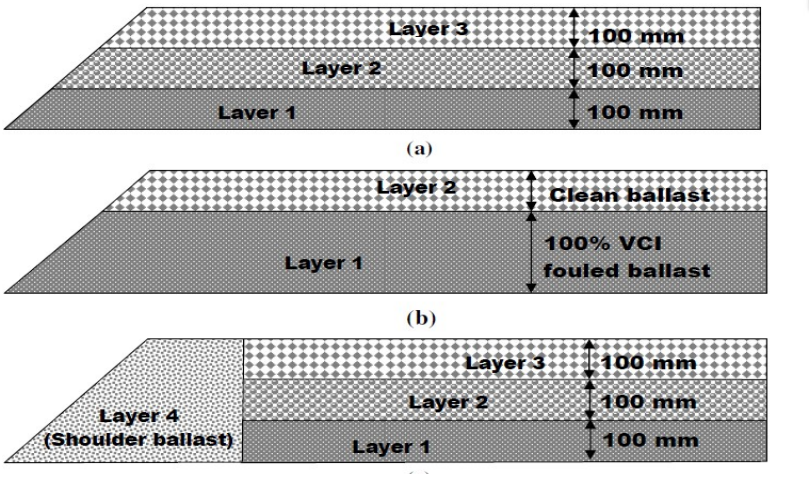
e_f คือ อัตราส่วนช่องว่างของวัสดุปนเปื้อน

G_{sb} คือ ความถ่วงจำเพาะของหินโรยทางที่สะอาด

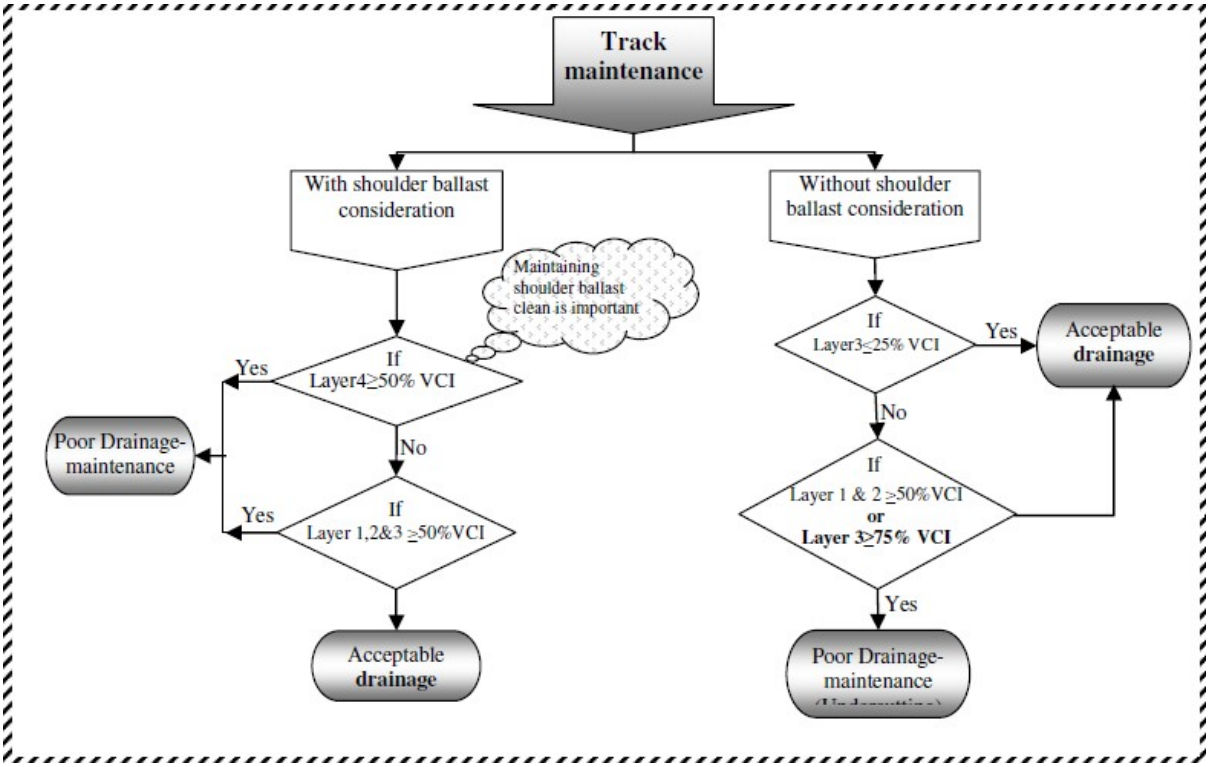
G_{sf} คือ ความถ่วงจำเพาะของวัสดุปนเปื้อน

M_b คือ น้ำหนักแห้งของหินโรยทาง

M_f คือ น้ำหนักแห้งของวัสดุปนเปื้อน



รูปที่ 2-15 Layerของบัลลาสต์เพื่อใช้ในการประเมินการซ่อมบำรุง



รูปที่ 2-16 Flow Chart ของการซ่อมบำรุงรางรถไฟ

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

ในปี ค.ศ. 2011 Indraratna, Li-jun Su, Rujikiatkamjorn ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าดัชนีการปนเปื้อน(Fouling index : F_i) และค่าเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC) ทำให้ได้พารามิเตอร์ใหม่ คือ Relative Ballast fouling ratio(R_{b-f}) โดยสามารถหาได้จากสมการ

$$R_{b-f} = \frac{M_f(\frac{G_{b-f}}{G_{s-f}})}{M_b} \times 100$$

เมื่อ M_f คือมวลของวัสดุปนเปื้อนที่อยู่ในสภาพแห้ง

M_b คือมวลของหินโรยทางที่อยู่ในสภาพแห้ง

G_{b-f} คือค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุหินโรยทาง

G_{s-f} คือค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุปนเปื้อน

ตารางที่ 2-10 การแบ่งค่าระดับการปนเปื้อนของอัตราส่วนความสัมพันธ์ของหินโรยทาง (Relative ballast fouling ratio: R_{b-f})

ระดับการปนเปื้อนของ Ballast	อัตราส่วนความสัมพันธ์การปนเปื้อน, 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≤R_{b-f}

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การศึกษาในอเมริกาเหนือ (North America studies)

พื้นที่ภาคสนามและห้องทดลองของโครงการ ดำเนินการจัดทำโดย Canadian Pacific Railroad เพื่อใช้ในการพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติของหินโรงทาง นักวิจัยขององค์กรได้สรุปปัญหาหลักของการปนเปื้อนของหินโรยทาง มาจากปัญหาการทำลายของหินโรยทาง (Ballast Breakdown) ซึ่งในความจริงแล้วคุณสมบัติความเหมาะสมของชั้นรองชั้นหินโรยทางที่ใช้ในการแยกระหว่างชั้นหินโรยทางและชั้นดินของฐานรากออกจากกันก็เป็นสิ่งสำคัญมากเช่นกัน

การศึกษาต่อมาโดย University of Massachusetts เพื่อรวบรวมความหลากหลายของสภาพทางรถไฟสายหลักที่ผ่านอเมริกาเหนือ หลายพื้นที่พบโคลนในบริเวณของหินโรยทาง ซึ่งเป็นสภาพที่เห็นทั่วไปของอุตสาหกรรมทางรถไฟที่เกิดจากดินชั้นฐานรากที่มีความละเอียด และพบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ด้านข้างของทางไม่ได้เต็มไปด้วยโคลน

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

ในห้องทดลอง ผ่านการตรวจสอบตามมาตรฐาน ASTM D2488 ตัวอย่างหินโรยทาง การปนเปื้อนของหินโรยทางถูกนั้นจะถูกแบ่งขนาด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ส่วนประกอบ สำหรับตัวอย่างหินโรยทางที่มีการปนเปื้อน จะมีอนุภาคเล็กกว่า 9.5 มิลลิเมตร(3/8นิ้ว) ซึ่งสมมติว่าเป็นค่าที่แสดงการปนเปื้อนของหินโรย-ทาง ค่าการปนเปื้อนของหินโรยทางจะประกอบด้วย ส่วนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มิลลิเมตร(3/8นิ้ว) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นทราย และส่วนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.075 มิลลิเมตร (ใช้ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200) ส่วนประกอบที่ละเอียดจะเป็นตะกอนและดินเหนียว การแบ่งแยกกลุ่มของหินโรยทางอาจใช้กล้องจุลทรรศน์ในการวิเคราะห์แยกหมวดหมู่ แต่สำหรับตะกอนดินและดินเหนียวที่มีขนาดเล็ก ไม่สามารถใช้กล้องจุลทรรศน์ในการระบุได้ จึงต้องมีการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแทนการวิเคราะห์แบ่งแยกหมวดหมู่ แล้วน้ำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักของตัวอย่างทั้งหมด

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

2.9.2 การศึกษาการปนเปื้อนของหินโรยทางในยุโรป

ในเยอรมันพบว่ามีสาเหตุหลักมาจากการปนเปื้อนบริเวณผิว ดังนั้นอย่างแรกต้องมีการแบ่งแยกชั้นใต้ชั้นหินโรยทางออกจากกันเพื่อจำกัดและป้องกันการแทรกของดินชั้นฐานรากอย่างที่สองคือในการขนส่งหินโรยทางนั้นต้องพยายามไม่ให้หินโรยทางกระแทกกันโดยพยายามให้ขนาดและรูปร่างของหินโรยทางเปลี่ยนไปจากเดิมน้อยที่สุด

การปนเปื้อนจากดินฐานราก เป็นผลจาการที่หินโรยทางนั้นรับน้ำหนักการใช้งานมากเกินไปในจุดที่อยู่ระหว่างหินโรยทางกับชั้นดินฐานราก หากมีการใช้วัสดุในการแบ่งแยกชั้นที่ไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดการ pumping ซึ่งเป็นหนึ่งในปัญหาที่แก้ไขได้ยาก และยังพบว่าถ้าเราใช้วัสดุหรือกรแบ่งชั้นที่ไม่ดีนั้นจะทำให้เกิดน้ำขังและจะทำให้ฐานรากเกิดการอ่อนตัวและเกิดการทรุดตัวตามมา ดังนั้นการป้องกันที่ดีควรมีการเพิ่มชั้นรองหินโรยทางเพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการระบายน้ำให้น่าพึงพอใจ British Railways engineers มีการนำหินโรยทางที่ปนเปื้อน ที่มีขนาดเล็กกว่า 14 มิลลิเมตรมาแยกหาสาเหตุการปนเปื้อน ดังนี้

ตารางที่ 2-11 การสรุปค่าการปนเปื้อนที่ได้จากการศึกษาของ British Railways engineers

No.	สาเหตุการปนเปื้อน	ค่าการปนเปื้อนในระยะเวลา 15 ปี	
		กิโลกรัม/1หมอนรองราง	%ทั้งหมด
1	เกิดจากขั้นตอนการขนส่ง	29	7
2	จากการใช้เครื่องจักรซ่อมแซมหินโรยทาง	88	20
3	การขัดสีจากน้ำหนักการใช้งานและการสึกหรอของหมอนรองชนิดคอนกรีต	90	21
4	สิ่งปนเปื้อนจากภายนอก	225	52
	รวม	432	100

2.9.3 การศึกษาความเสียหายจากการซ่อมแซมชั้นหินโรยทาง (Tamping damage)

British Railways ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับขนาดของหินโรยทางที่ลดลงหลังจากการซ่อมแซมหินโรยทางภายใต้หมอนรองรางรถไฟ หรือการ tamping ผลจากการ tamping อนุภาคขนาด 38-51 มิลลิเมตร จะลดลงเหลือเพียง 15-45% ของทั้งปริมาณทั้งหมด ซึ่งตอนแรกมีอยู่ 46-71% ของปริมาณทั้งหมด ซึ่งจากการสำรวจพบว่าหินโรยทางที่มีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 13 มิลลิเมตรเริ่มแรกมีเพียง 1%โดยน้ำหนัก แต่หลังจากการ tamping พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 5% โดยน้ำหนัก

การศึกษาอื่นๆในห้องทดลองที่ British Railways พบว่ามีหินโรยทางขนาดน้อยกว่า 14 มิลลิเมตรเพิ่มขึ้น 2-4 กิโลกรัมต่อการซ่อมใต้หมอนรองรางรถไฟ ซึ่งการลดลงของขนาดเกิดการ tamping

2.9.4 การศึกษาการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ความปนเปื้อนต่างๆ

เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง Relative ballast fouling กับ PVC

ค่า $V_2 = \frac{M_f}{G_{s-f}\,\rho_w}(1+e_f)$

$V_1 = \frac{M_b}{G_{b-f}\,\rho_w}(e_b)$

โดยที่ e_f คือ อัตราส่วนช่องว่างของวัสดุปนเปื้อน, e_b คือ อัตราส่วนช่องว่างของหินโรยทาง

ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ

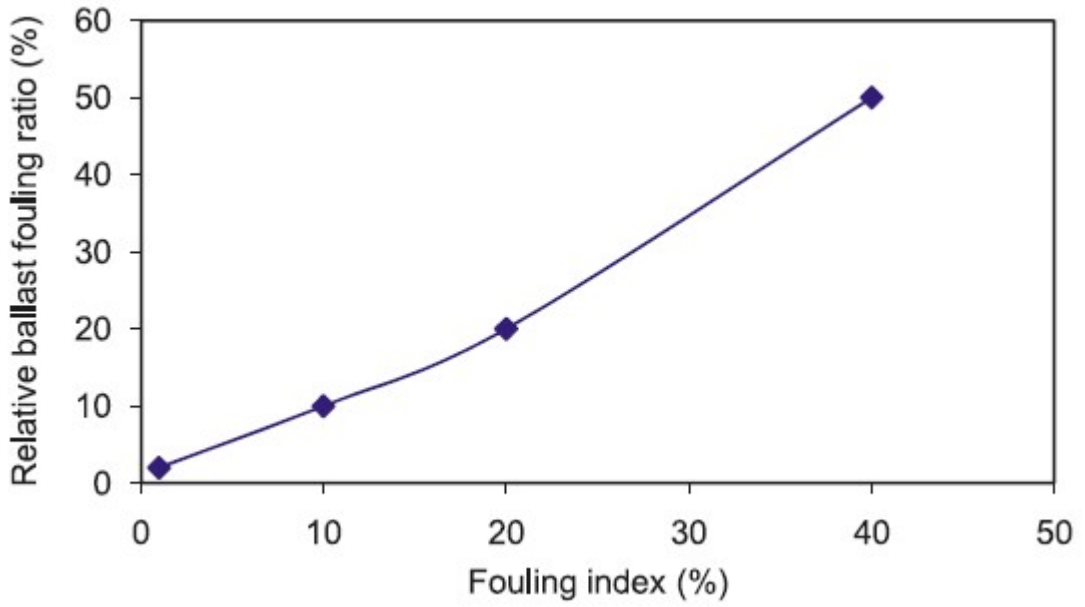
จะได้ว่า $$\mathrm{PVC} = \frac{M_f\left(\frac{G_{s-b}}{G_{s-f}}\right)}{M_b}\frac{(1+e_f)}{e_b}\times 100\%$$

หรือ $$R_{b\text{-}f} = \mathrm{PVC}\frac{e_b}{(1+e_f)}$$

ซึ่งเมื่อดูจากตัวอย่างแล้วค่าe_bส่วนมากจะมีค่าใกล้เคียงกันe_fนั้นจะแสดงให้เห็นว่าค่า PVC นั้นขัดแย้งกันเพราะเมื่อค่าe_fมากขึ้นก็กลับกลายเป็นว่ามีการปนเปื้อนมากขึ้นทั้งๆที่ควรจะมีค่าน้อยลงเพราะมีโพรง

เยอะสามารถระบายน้ำได้ดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า Relative Ballast fouling ratio สามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของการปนเปื้อนได้ดีกว่า PVC

เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง Relative ballast fouling กับ PVC



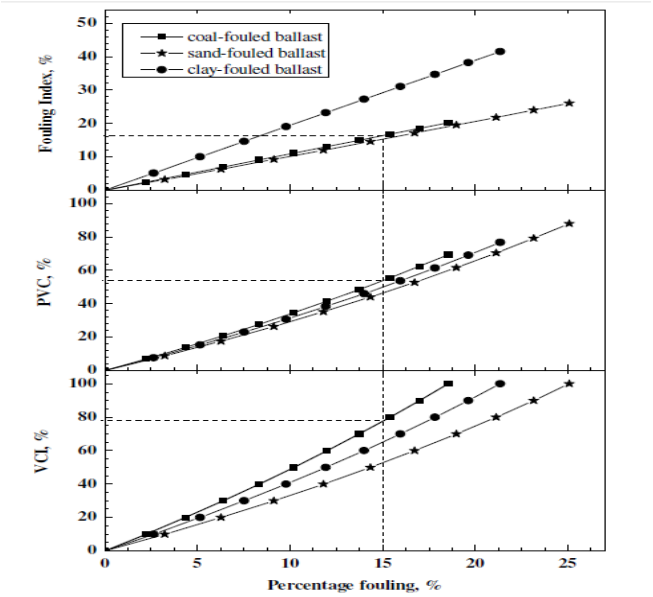
รูปที่ 2-17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Fouling index และ Relative ballast fouling ratio

ซึ่งจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ แสดงให้เห็นว่าค่า FI และค่า Relative ballast fouling ratioนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน และจากการทดลองการใช้สมการFouling index เหมาะสำหรับค่า FI ที่ไม่เกิน 20% หากค่าที่ได้เกินควรใช้ Relative ballast fouling ratio ในการคำนวณเนื่องจากผลการทดสอบพบว่าสมการ Relative ballast fouling ratio ให้ผลค่าการปนเปื้อนที่ได้มีความละเอียดมากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบค่า Percentage Void Contamination (PVC) กับFouling Index (FI)

ถ้าวัสดุปนเปื้อนไม่ได้อยู่ในช่องว่างจนเต็ม ซึ่งในกรณีนี้หินโรยทางจะสามารถระบายน้ำได้ในขอบเขตที่ยอมรับได้ ในทางกลับกันถ้าFouling Index มีค่ามากขึ้นนั้นจะส่งผลกับการระบายน้ำซึ่งอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ และแม้ว่า PVC จะเป็นตัวชี้วัดโดยตรงของเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยวัสดุปนเปื้อนแต่ถ้าวัสดุปนเปื้อนนั้นมีอนุภาคที่ใหญ่ (4.75–9.5 mm) ซึ่งค่า ของสมการ PVC อาจจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งความจริงไม่ได้เป็นเช่นนั้น วัสดุปนเปื้อนจะส่งผลกับหินโรยทางทำให้การระบายน้ำนั้นอาจจะอยู่ในเกณฑ์ที่รับไม่ได้

เมื่อเปรียบเทียบ VCI กับ Fouling Index และPVC



รูปที่ 2-18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Percentage fouling กับ VCI, PVC และ Fouling Index

จากกราฟ แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบระหว่าง FI, PVC และ VCI สำหรับช่วงต่างๆของร้อยละของความปนเปื้อนของหินโรยทาง

ยกตัวอย่างเช่นให้เราพิจารณา Percent fouling ที่ 15% โดยสิ่งปนเปื้อนเป็น ถ่านหิน,ทราย,ดินเหนียว บัลลาสต์ปนเปื้อนที่ค่า VCI จากถ่านหิน ดินเหนียว ทราย เท่ากับ 78%, 65% และ 52% ตามลำดับ ซึ่งค่าFI ที่สอดคล้องกัน 16, 28, และ 15 ตามลำดับ เป็นที่ชัดเจนว่าถ่านหินและทรายให้ค่าใกล้เคียงกัน (ความแตกต่างของ16-15 = 1) ทั้งๆที่มีความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะของถ่านหินและทราย เมื่อเทียบกับความแตกต่างใน VCI นี้ (78-52 = 26) ซึ่ง

ค่า PVC จากการปนเปื้อนของถ่านหิน ดินเหนียว และทราย เท่ากับ 54%, 48% และ 42% ซึ่งทั้ง3ค่ามีค่าการกระจายตัวที่น้อย (42-54%) เมื่อเทียบกับช่วงของค่า VCI นี้ (52-78%)

ดังนั้นพารามิเตอร์ VCI นั้น ได้นำเอาผลกระทบของอัตราส่วนช่องว่าง ความถ่วงจำเพาะ และการกระจายตัวของขนาดคละของวัสดุปนเปื้อนและหินรองราง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า VCI นั้นครอบคลุมการปนเปื้อนของหินรองรางดีกว่าและยังสามารถนำเอามาใช้ได้ค่าที่ถูกต้องกว่า Fouling Index โดยเฉพาะอย่ายิ่งเมื่อวัสดุปนเปื้อนนั้นมีค่าความถ่วงจำเพาะที่ไม่ใช่ค่าความถ่วงจำเพาะของหิน ซึ่งค่าที่จำเป็นต้องใช้ของVCIคือ น้ำหนักแห้ง อัตราส่วนช่องว่างและค่าความถ่วงจำเพาะ ของทั้งหินรองรางและวัสดุปนเปื้อน

บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการวิจัย

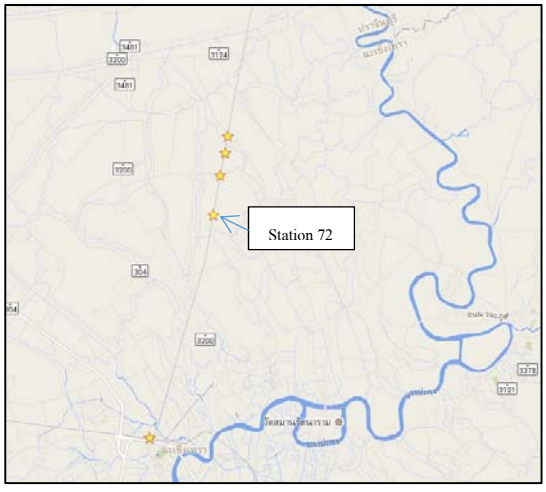
ในการทำวิจัยครั้งนี้ได้มีการแบ่งระบบขั้นตอนในการดำเนินงานออกเป็น 6 ขั้นตอน คือ

1. ศึกษาเอกสารและค้นหาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. วางแผนการทำโครงการ
3. ทำการเก็บตัวอย่างในสถานที่จริง
4. ขั้นตอนการทดสอบตัวอย่าง
5. การวิเคราะห์ข้อมูล
6. การจัดเตรียมรูปเล่มเพื่อนำเสนอรายงานโครงงานวิจัย

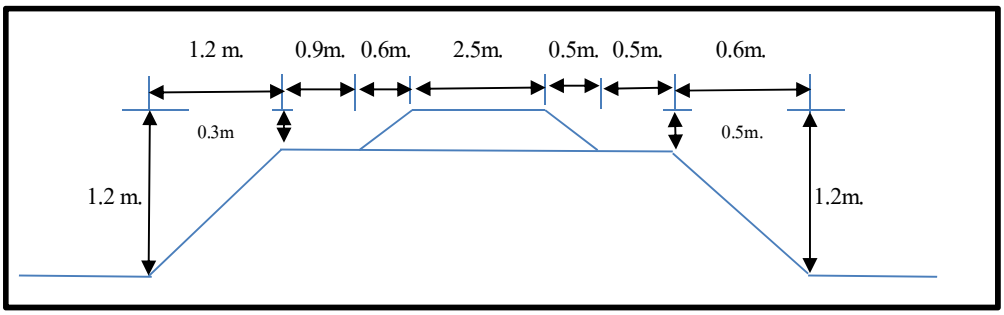
การทำวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาเก็บข้อมูลการใช้เส้นทางรถไฟ ณ อำเภอบางน้ำเปรี้ยว จังหวัดฉะเชิงเทรา มุ่งเน้นความสนใจไปที่วัสดุหินโรยทาง (Ballast) ประกอบด้วยการสำรวจและการตรวจสอบในภาคสนาม และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในการเก็บตัวอย่างและการทดสอบในสนามนั้นอันดับแรกจะทำการวิเคราะห์หมอนรองรางรถไฟว่าสภาพโดยรวมเป็นอย่างไร วัดขนาดความกว้างของราง ทำการถ่ายรูป เพื่อเก็บข้อมูล

3.1 สถานที่การเก็บตัวอย่าง

ชุมทางรถไฟฉะเชิงเทรา ถึง สถานีรถไฟบางน้ำเปรี้ยว จังหวัดฉะเชิงเทรา เก็บตัวอย่างที่ตำแหน่งเสาโทรเลขที่ 72/15 (พิกัด 13.784451,101.089840) และแสดงในรูปที่ 3-1 โดยได้ทำการวัดขนาดของหน้าตัดทางรถไฟดังแสดงในรูปที่ 3-2 บริเวณ Station นี้เป็นทางตรงพื้นที่รอบข้างเป็นป่าหญ้าจากการสอบถามเจ้าหน้าที่การรถไฟพบว่า Station นี้มีการล้างหินไปเมื่อเดือน พฤศจิกายน 2557 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างนี้มีค่า Quality Index เท่ากับ 32 (ค่า QI. สภาพทาง: 0-20% ดี-ดีมาก, 21-30 %พอใช้, 31-40% ต้องปรับปรุง , 41% ขึ้นไป ปรับปรุงด่วน)

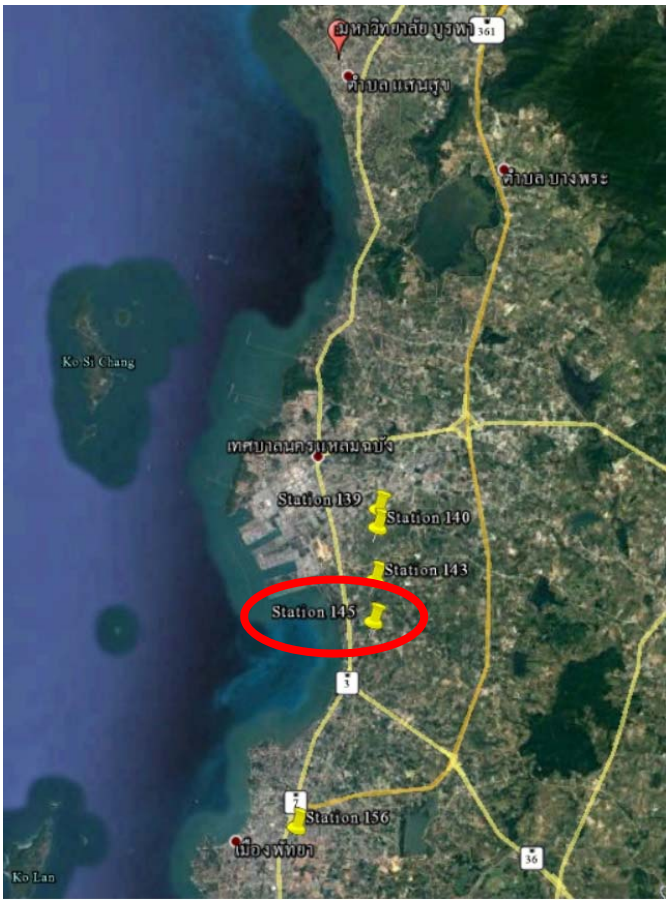


รูปที่ 3-1 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างตำแหน่งเสาโทรเลขที่ 72/15

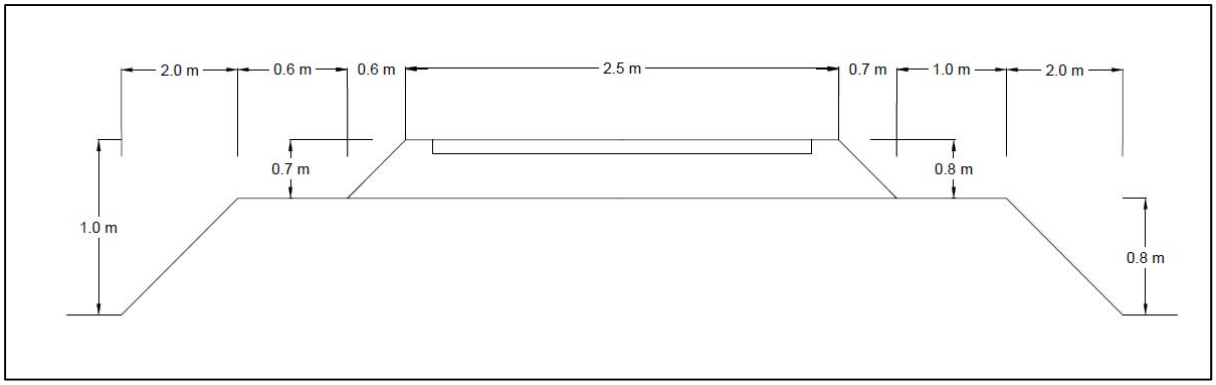


รูปที่ 3-2 ขนาดหน้าตัดของคันทางรถไฟตำแหน่งเสาโทรเลขที่ 72/15

ชุมทางศรีราชา ถึง สถานีพัทยา จังหวัดชลบุรี เก็บตัวอย่างที่ตำแหน่งเสาโทรเลขที่ 145/9 (พิกัด 13.0210651657868, 100.93953832984) และแสดงในรูปที่ 3-3 โดยได้ทำการวัดขนาดหน้าตัดของทางรถไฟดังแสดงในรูปที่ 3-4 บริเวณ Station อยู่ใกล้กับทางแยก ตัดกับถนน บริเวณด้านข้างเป็นหญ้าสูงประมาณ 2 ฟุต ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างนี้มีค่า Quality Index เท่ากับ 24 (ค่า QI. สภาพทาง: 0-20% ดี-ดีมาก, 21-30 %พอใช้, 31-40% ต้องปรับปรุง, 41% ขึ้นไป ปรับปรุงด่วน)



รูปที่ 3-3 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างตำแหน่งเสาโทรเลขที่ 145/9

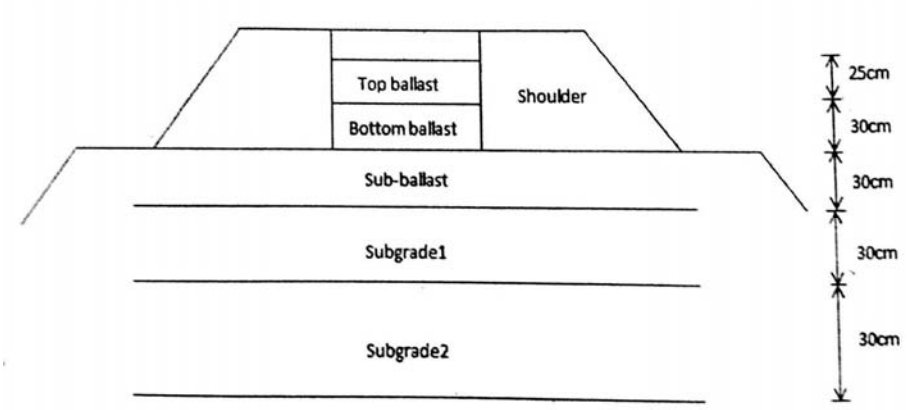


รูปที่ 3-4 ขนาดหน้าตัดของคันทางรถไฟตำแหน่งเสาโทรเลขที่ 145/9

3.2 การเก็บตัวอย่าง

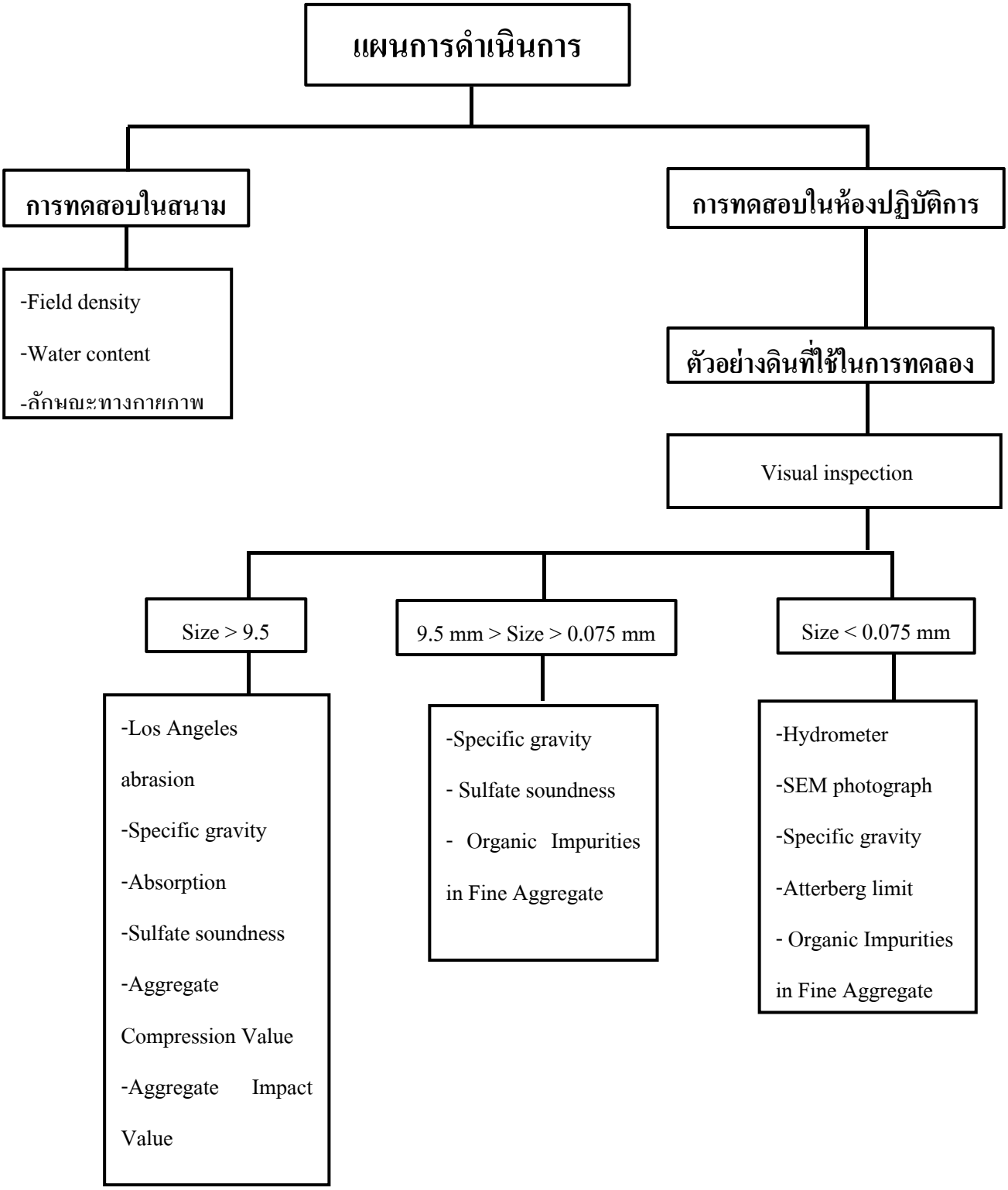
ในการเก็บตัวอย่างจะทำการเก็บสถานีละ 6 ตัวอย่างตัวอย่างละ 50 กิโลกรัม ดังนี้

1. Ballast
2. Shoulder
3. Crib
4. Sub – ballast
5. Subgrade 1
6. Subgrade 2



รูปที่ 3-5 การเก็บตัวอย่างในแต่ละชั้น

3.3 แผนการดำเนินงาน



รูปที่ 3-6 ผังแสดงแผนการดำเนินงาน

3.4 วิธีการทดลองในห้องปฏิบัติการ

3.4.1 การทดสอบคุณสมบัติความคงทนของอนุภาค

คุณภาพของวัสดุบัลลาสต์ถูกกำหนดโดยลักษณะเฉพาะของอนุภาค มีการทดสอบมากมายที่ใช้ในการหาลักษณะเฉพาะของอนุภาค โดยแต่ละการทดสอบนี้มีการบรรยาย และบอกขั้นตอนตามมาตรฐาน

A. Los Angeles abrasion (ASTM C131, ASTM C535)

การทดสอบ LAA test คือการทดสอบแบบแห้ง ซึ่งใช้วัดค่าความทนทาน หรือแนวโน้มการแตกร้าวของวัสดุ

<u>อุปกรณ์การทดลอง</u>

1. เครื่องลอสแองเจิลลิส (Los Angeles Machine)
2. ตาชั่งที่มีความละเอียด 0.1 % ของน้ำหนักทั้งหมดของตัวอย่าง
3. ตะแกรงมาตรฐานที่มีขนาดตั้งแต่ช่วง 1.7 – 80.0 มิลลิเมตร (ASTM เบอร์ 12 ถึง 3")
4. ลูกบอลโลหะทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 46.8 มิลลิเมตร และมีน้ำหนักแต่ละ อยู่ระหว่าง 390 และ 445 กรัม

<u>ขั้นตอนการทดลอง</u>

1. ตัวอย่างทดสอบต้องผ่านตะแกรงขนาด 2.5 mm , 5 mm , 10 mm , 15 mm,20 mm, 25 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm และ 80 mm จากนั้นทำการล้างตัวอย่างด้วยน้ำสะอาด และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 – 110 องศาเซลเซียส จนกระทั้งน้ำหนักคงที่
2. น้ำหนักของตัวอย่างจะต้องมีค่า ดังตารางที่ 3.3 โดยในการทดสอบครั้งนี้เลือกใช้น้ำหนักตาม (งานวิจัยนี้ใช้เกรด F)

ตารางที่ 3-1 น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง Los Angeles Value

ขนาดตะแกรง (มม.)		ขนาดของมวล (กรัม) ของแต่ละชั้นตัวอย่าง						
ผ่าน	ค้าง	A	B	C	D	E	F	G
75.0	63					2,500 ± 50		
63.0	50.8					2,500 ± 50		
50.8	37.5					5,000 ± 50	5,000 ± 50	
37.5	25	1,250 ± 25					5,000 ± 25	5,000 ± 25
25	19	1,250 ± 25						5,000 ± 25
19	12.5	1,250 ± 10	1,250 ± 10					
12.5	9.5	1,250 ± 10	1,250 ± 10					
9.5	6.3			1,250 ± 10				
6.3	4.75			1,250 ± 10				
4.75	2.36							
มวลตัวอย่างรวม		5,000 ± 10	5,000 ± 10	5,000 ±10	5,000 ± 10	10,000 ± 50	10,000 ± 50	10,000 ± 50
จำนวนรอบ		500				1,000		

3. จำนวนของลูกเหล็กจะต้องเป็นไปตามการแบ่งเกรด

4. หลังจากใส่ลูกเหล็กและตัวอย่างที่มีน้ำหนัก w_1 ในถังทรงกระบอกของเครื่อง ถังทรงกระบอกจะหมุนด้วยอัตราการหมุน 30–33 รอบต่อนาที จำนวน 500 รอบสำหรับตัวอย่างเกรด A , B , C และ 1,000 รอบสำหรับตัวอย่างเกรด E , F, และ G
5. ตัวอย่างถูกนำออกมาจากเครื่องและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 12 (1.7 mm wire sieve)
6. ตัวอย่างที่ค้างอยู่บนตะแกรงจะถูกล้างและทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 100-110 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่, w_2
7. ค่าการขัดสี (Abrasion loss, R) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100$$

B. Aggregate Compression Value (BS 812 Part 110:1990)

คือการทดสอบการบดอัด เป็นการวัดค่าความต้านทานการบดอัดของหินเมื่อถูกน้ำหนักบดทับตัวอย่างที่เตรียมอยู่ใน Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 154 mm. ลึก 134 mm. แรงที่กระทำจากด้านบนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึง 390 กิโลนิวตัน (40 ตัน) ในระยะเวลา 10 นาที จากนั้นนำตัวอย่างมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ที่กำหนด แล้วนำส่วนค้างไปอบ ค่าที่ได้คือเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนน้ำหนักหินที่ค้างบนตะแกรงส่วนด้วยน้ำหนักของหินทั้งหมด

<u>อุปกรณ์</u>

1. โมลขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 154 mm. ลึก 134 mm
2. ตะแกรงร่อนขนาด 2.36 , 10 , 12.5 มม.
3. tamping rod ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8 นิ้ว ยาว 12 นิ้ว
4. เครื่องให้แรงอัด

<u>ขั้นตอนการทดอง</u>

1. นำตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงขนาด 19 มม.และค้างตะแกรงขนาด 9.5 มม.ใช้ในการทดสอบ 700 กรัมและอบที่อุณหภูมิ 100-110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3-4 ชม.
2. ใส่ตัวอย่างในโมลแบ่งเป็น 3 ชั้นกระทุ้งด้วย tamping rod ชั้นละ 25 ครั้งชั่งน้ำหนักตัวอย่าง (A)
3. ทำการทดสอบให้แรงที่กระทำจากด้านบนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึง 390 กิโลนิวตัน (40 ตัน) ในระยะเวลา 10 นาที
4. นำตัวอย่างหลังให้แรงกระทำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2.36 มม.แล้วชั่งน้ำหนัก (B)

Aggregate crushing value = (B/A) x 100%

C. Aggregate Impact Value (BS 812 Part 112:1990)

เป็นการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ โดยการทดลองนี้จะทำเพื่อหาปริมาณการแตกหักของวัสดุเมื่อถูกแรงตกกระแทก

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการ sieve ตัวอย่างเพื่อหาขนาดที่ต้องการคือผ่านตะแกรงขนาด 19 มม.ค้างตะแกรงขนาด 9.5 มม.ใช้ในการทดสอบ 4,500 กรัม(โดยใช้ มาตรฐาน ASTM C136)
2. เมื่อได้ตัวอย่างที่ต้องการแล้วนำไปชั่ง โดยชั่งให้ได้น้ำหนัก 2.5 kg
3. นำตัวอย่างที่ได้ไปล้างโดยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดฝุ่นที่ติดอยู่ที่บริเวณมวลรวม
4. นำตัวอย่างที่ได้กระจายและปล่อยให้แห้งในอากาศให้ผิวแห้งหรืออบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
5. ชั่ง mold ขนาด 102x52mm กำหนดให้เป็นค่า M1
6. ใส่มวลรวมลงใน mold เหล็ก โดยแบ่งออกเป็น 3 ชั้น โดนแต่ละชั้นทำการกระทุ้ง 25 ครั้งต่อชั้น
7. ชั่ง moldที่มีมวลรวมอยู่ โดยกำหนดให้เป็น M2
8. นำ mold มาติดตั้งที่บริเวณฐานของเครื่อง ดังตัวอย่างรูปที่ 3-7 โดยลูกตุ้มที่ทำการกระแทกมีน้ำหนักประมาณ 14 kg
9. ปล่อยลูกตุ้มเหล็กให้กระแทกกับมวลรวม 15 ครั้ง โดยปล่อยให้ตกอย่างอิสระที่ความสูง 380 mm
10. นำตัวอย่างไป sieve ผ่านตะแกรง 2.36 mmนำตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงไปชั่งน้ำหนักจะได้ค่า M3

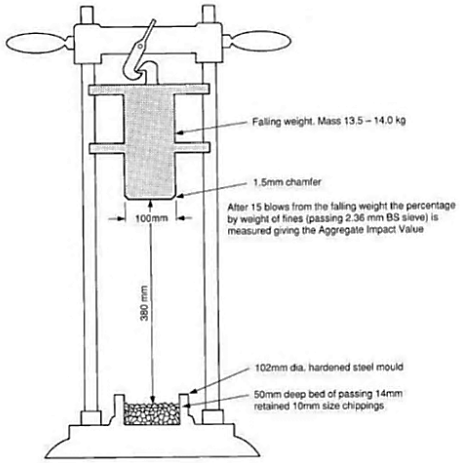
    AIV(%)=[M3/(M2-M1)]x100

    AIV(%) คือ ค่าความต้านทานแรงที่กระทำอย่างฉับพลัน

    M1 คือน้ำหนักของ moldเหล็กขนาด 102x52 mm

    M2 คือน้ำหนักของ mold เหล็ก+นน.ของมวลรวม

    M3 คือน้ำหนักมวลรวมหลังการกระแทกที่ผ่านตะแกรง 2.36 mm



รูปที่ 3-7 อุปกรณ์ Aggregate Impact Value

3.4.2 การทดสอบรูปร่าง Shape Tests

A. การทดสอบ Flat & Elongation (ASTM D4791)

การทดสอบ Flat คือการหาค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความกว้างต่อความยาวของอนุภาคโดยใช้อัตราส่วน 1:2 หรือ 1:3 หากอัตราส่วนที่ได้มีค่าเกินกว่าที่กำหนดอนุภาคนั้นถือว่า flat ค่าที่ได้จะแสดงเป็นรูป % น้ำหนักอนุภาคที่ flat

<u>อุปกรณ์ในการทดลอง</u>

1. อุปกรณ์วัดเวอร์เนีย
2. ตะแกรงสำหรับมวลรวมหยาบ
3. เครื่องเขย่า
4. ตาชั่งที่มีความละเอียดถึง 0.1 % ของมวลที่ใช้ทดสอบ

<u>ขั้นตอนการทดลอง</u>

1. ทำการวิเคราะห์ขนาดคละโดยการใช้ตะแกรงร่อนขนาดดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 การเลือกขนาดเกจและน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ Flat & Elongation

คำอธิบาย	เกณฑ์
Nominal Maximum Size	Minimum Weight
$\frac{3}{8}$ in. (9.5mm.)	1 kg
$\frac{1}{2}$ in. (12.5 mm.)	2 kg
$\frac{3}{4}$ in. (19 mm.)	5 kg
1 in (20.5 mm.)	10 kg
$1\frac{1}{2}$ in. (37.5 mm.)	15 kg

2. หากต้องการให้น้ำหนักในการทดลองคงที่ ต้องนำตัวอย่างที่จะมาทดสอบไปใส่ในตู้อบในอุณหภูมิคงที่ ที่ 110 ± 5 องศาเซลเซียส
3. เมื่อได้น้ำหนักตัวอย่างตามที่ทดสอบแล้ว (โดยการทดสอบครั้งนี้ใช้น้ำหนักตัวอย่างที่ 15 กิโลกรัม)และนำตัวอย่างมาวัดโดยใช้ เวอร์เนียโดยจะวัดตัวอย่างไปทีละก้อน
4. เมื่อได้ขนาดตัวอย่างสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 เกณฑ์การบ่งบอก flat และ elongated

คำอธิบาย	เกณฑ์
Flat	width / thickness > 3
Elongated	Length / width > 3
Flat and elongated	เป็นทั้ง flat และ Elongated

การทดสอบ Elongation คือการหาค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความหนาต่อความกว้างของอนุภาคโดยใช้อัตราส่วน 1:2 หรือ 1:3 หากค่าอัตราส่วนที่ได้มีค่าเกินกว่าที่กำหนดอนุภาคนั้นถือว่า flat ค่าที่ได้แสดงในรูปเปอร์เซ็นต์ของ อนุภาคที่ Elongation

B. การตรวจสอบด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscopy (SEM)

คือการขยายภาพดินส่วนละเอียดด้วยกำลังขยาย 500 – 3500 เท่า เพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบของดินในส่วนละเอียด เพื่อช่วยในการสันนิษฐานว่าดินส่วนละเอียดมาจากส่วนใด และมีโครงสร้างใหญ่หรือเล็กเพียงใดเมื่อเทียบกัน

3.4.3 การหาขนาดคละ

A. Sieve Analysis (ASTM D422, D1140, D6913)

คือการทดสอบหาขนาดคละของบัลลาสต์ โดยใช้การร่อนและล้างผ่านตะแกรง การใช้เครื่องร่อน มีขั้นตอน ตามการทดสอบต่าง ๆ เช่น ASTM C117, C136 และ D422 เป็นต้น ลำดับชั้นทั่วไปแสดงในรูปการกระจายความถี่สะสม โดยแกนตั้งแสดงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักวัสดุผ่านตะแกรง ส่วนแกนนอนแสดง log ของขนาดอนุภาควัสดุ

B. การทดสอบ hydrometer (ASTM D422)

เป็นการทดสอบที่ต่อเนื่องจากการร่อนผ่านตะแกรง โดยการทดสอบนี้จะหาขนาดคละของดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) โดยผลการทดสอบจะพล็อตในกราฟ semi – log ระหว่างค่า % finer และขนาดของอนุภาคดิน ซึ่งการทดสอบ hydrometer เป็นการทดสอบการตกตะกอนของอนุภาคดินในน้ำแล้วนำมาวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคโดยอาศัยหลักการของ Stoker’ s law ซึ่งให้ความสัมพันธ์ ระหว่างความเร็วของทรงกลมในของเหลว, เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม, specific gravity ของทรงกลมและของเหลว และความหนืดของของเหลว

3.4.4 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

A. การทดสอบหาค่า Specific Gravity และ Absorption of Aggregates (ASTM C127)

เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาตรของมวลรวม (ที่รวมทั้งรูพรุนทั้งหมดและช่องว่างภายในของมวลรวม) ต่อน้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน

<u>อุปกรณ์การทดสอบ</u>

1. ตะกร้าลวดที่มีหูหิ้ว
2. ภาชนะบรรจุน้ำ ที่สามารถใส่ตะกร้าลวดลงไปได้
3. ผ้าที่แห้ง ขนาด 75 × 45 ซม. จำนวน 2 ผืน
4. ถาดสี่เหลี่ยมขนาดพื้นที่ต่ำสุด 650 cm^2

5. ภาชนะที่ปิดแน่นไม่ให้อากาศเข้าได้ลักษณะคล้ายตะกร้าลวดข้อ 1
6. ตู้อบ
7. เครื่องชั่งละเอียด 0.5 กรัม

ตารางที่ 3-4 การเลือกน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ Specific gravity

คำอธิบาย	**เกณฑ์**
Nominal Maximum Size, mm (in.)	Minimum Weight, kg
12.5 (1/2)	2
19.0 (3/4)	3
25.0 (1)	4
37.5 (1-1/2)	5
50 (2)	8
63 (2-1/2)	12
75 (3)	18
90 (3-1/2)	25
100 (4)	40
125 (5)	75

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการเลือกน้ำหนักของตัวอย่างตามตารางที่ 3.6 (โดยในการทดสอบครั้งนี้ใช้น้ำหนัก 8 กิโลกรัม) ทิ้งวัสดุที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ไปนำตัวอย่างไปล้างให้ทั่วเพื่อขจัดฝุ่นหรือสารที่เคลือบผิว ของอนุภาค อบให้แห้งจนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ที่อุณหภูมิ 110 ± 5 °C ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ถึง 3 ชั่วโมง จากนั้นแช่ตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 24 ± 4 ชั่วโมง
2. นำตัวอย่างออกจากน้ำและเกลี่ยบนผ้าที่ดูดซึมน้ำจนกระทั่งไม่เห็นน้ำเคลือบที่ผิวของตัวอย่าง แต่ผิวของตัวอย่างยังคงชื้นอยู่ ระวังอย่าให้เกิดการระเหยระหว่างที่ทำให้ผิวแห้ง
3. ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface-dry condition, SSD) ให้ละเอียดถึง 0.5 กรัม จากนั้นใส่ตัวอย่างที่อิ่มตัวผิวแห้งลงในตะกร้าลวด เพื่อที่จะหาน้ำหนักในน้ำ ไล่ฟองอากาศออกก่อนที่จะทำการชั่งน้ำหนักโดยการเขย่าภาชนะขณะที่จุ่มน้ำ
4. อบให้แห้งจนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ที่อุณหภูมิ 110 ± 5 °C ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและชั่งน้ำหนักให้ละเอียดถึง 0.5 กรัม
5. ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมสามารถคำนวณได้ดังนี้:

(ก) ความถ่วงจำเพาะทั้งหมด = A/(B-C)

(ข) ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดที่สภาพ SSD = B/(B-C)

(ค) ความถ่วงจำเพาะปรากฏ = A/(A-C)

(ง) ร้อยละการดูดซึม = [(B-A)/A]×100

โดยที่

A = น้ำหนักของตัวอย่างที่อบแห้งในอากาศ (กรัม)

B = น้ำหนักของตัวอย่างที่สภาพ SSD ในอากาศ (กรัม)

C = น้ำหนักของตัวอย่างที่สภาพ SSD ในน้ำ (กรัม)

B. การทดสอบ Specific gravity โดยวีธีใช้ Volumetric flask

Specific gravity คือค่าอัตราส่วนส่วนมวลของอนุภาคดินต่อมวลน้ำที่มีปริมาตรเท่ากันที่ 20 องศาเซลเซียส โดยการทดสอบจะนำเอาขวด Volumetric flash แห้งไปชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่า จากนั้นเติมน้ำให้ถึงขีดปริมาตรรอจนอุณหภูมิคงที่ แล้วนำไปชั่งน้ำหนักบันทึกค่าเป็น Volumetric flash + water พร้อมบันทึกอุณหภูมิ จากนั้นเทดินอบแห้งที่เตรียมไว้ใส่ลงไปในขวด Volumetric flash แล้วเติมน้ำให้มีระดับประมาณ 1/3 ของขวดแล้วนำไปต้มเพื่อไล่อากาศออกจากดิน เมื่อเสร็จให้เติมน้ำให้ถึงขีดปริมาตรของขวดรอให้อุณหภูมิคงที่แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเป็นค่า Volumetric flask + water +soil แล้วนำค่าที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณหาค่า Specific gravity โดยค่า Specific gravity สามารถนำไปใช้ในการทดสอบ hydrometer ได้

3.4.5 การทดสอบด้านสิ่งแวดล้อมความต้านทานซัลเฟต (ASTM C88-9)

<u>อุปกรณ์การทดสอบ</u>

1. ตะแกรงขนาดต่าง ๆ ดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 ตะแกรงขนาดต่าง ๆ

2 ½ นิ้ว (63 มม.)	5/16 นิ้ว (8.0 มม.)
2 นิ้ว (50 มม.)	No.4 (4.75 มม.)
1 ½ นิ้ว (37.5 มม.)	No.5 (4.00 มม.)
1 นิ้ว (25.0 มม.)	No. 8 (2.36 มม.)
¾ นิ้ว (19.0 มม.)	No. 16 (1.18 มม.)
5/8 นิ้ว (16.0 มม.)	No. 30 (600 m m)
½ นิ้ว (12.5 มม.)	No. 50 (300 m m)
3/8 นิ้ว (9.5 มม.)	No. 100 (600 m m)

2. เครื่องชั่ง ชั่งได้ละเอียดไม่น้อยกว่า 0.1 กรัม

3. เตาอบ

4. Hydrometer วัด ถ.พ.ได้ในช่วง 1.151 - 1.174

<u>การเตรียมตัวอย่าง</u>

ในการหาความคงตัวของวัสดุโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การทดสอบแบบ Fine aggregate และการทดสอบแบบ Coarse aggregate ซึ่งในการทดสอบของวัสดุแต่ละประเภทจะมีข้อกำหนดเรื่องปริมาณและส่วนคละที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 3-6 และ 3-7

ตารางที่ 3-6 ข้อกำหนดของวัสดุประเภท Fine aggregate

ผ่าน	ค้าง	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)
3/8	No.4	100
No.4	No.8	100
No.8	No.16	100
No.16	No.30	100
No.30	No.50	100

ตารางที่ 3-7 ข้อกำหนดของวัสดุประเภท Coarse aggregate

กลุ่ม	ผ่าน	ค้าง	ปริมาณที่ใช้ แต่ละเบอร์ (กรัม)	ปริมาณที่ใช้รวม (กรัม)
A	$2\frac{1}{2}$"	2 "	3000 ± 300	5000 ± 300
	2 "	$1\frac{1}{2}$ "	2000 ± 200	
B	$1\frac{1}{2}$ "	1 "	1000 ± 50	1500 ± 50
	1 "	$\frac{3}{4}$ "	500 ± 30	
C	$\frac{3}{4}$ "	$\frac{1}{2}$ "	670 ± 10	1000 ± 10
	$\frac{1}{2}$ "	$\frac{3}{8}$ "	330 ± 5	
D	$\frac{3}{8}$ "	No.4	300 ± 5	300 ± 5

<u>การเตรียมตัวอย่าง</u>

จะต้องนำวัสดุที่จะใช้ทดลองมาทำการแบ่งตัวอย่างตาม ตารางที่ 3-3, 3-4 ให้ได้ปริมาณตามการทดสอบขนาดคละ (โดยในการทดสอบครั้งนี้ใช้ Fine aggregate ที่ผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว ค้างตะแกรงเบอร์ 4 ส่วน Coarse aggregate ใช้ตามกลุ่ม C) แล้วทำการทดสอบขนาดคละ จากนั้นให้นำค่า % ค้างนำมาหาปริมาณวัสดุที่จะนำไปใช้ในการทดลองตามเกณฑ์ข้างต้นเมื่อได้ตัวอย่างตามข้อกำหนดแล้วให้นำมาล้าง แล้วอบให้แห้งชั่ง น้ำหนักก่อนการทดสอบ

การเตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟต ($Na_2 SO_4$) ให้ใช้ $Na_2 SO_4$ ประมาณ 350 กรัม/น้ำ 1 ลิตรละลายทิ้งไว้ประมาณ 48 ชม. แล้วทำการตรวจสอบค่าถ่วงจำเพาะ ของสารละลายให้อยู่ระหว่าง 1.151 – 1.174 (rate ในการใช้ $Na_2 SO_4$ แล้วแต่ความบริสุทธิ์ของ $Na_2 SO_4$)

<u>วิธีทดลอง</u>

1. ให้นำตัวอย่างที่ได้จากขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างตามข้อกำหนด มาแยกใส่กะละมังหรือภาชนะ
2. เทสารละลาย $Na_2 SO_4$ ให้ท่วมวัสดุไม่น้อยกว่าครึ่งนิ้ว แล้วแช่วัสดุทิ้งไว้ประมาณ 16-18 ชม.
3. รินสารละลายออกโดยให้นำตะแกรงที่ใช้กรองตามข้อ 7 มารอง เพื่อป้องกันการหลุดหายของวัสดุไปกับสารละลาย
4. นำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105–115 องศา 24 ชม. แล้วนำออกมาทิ้งให้เย็น
5. นำตัวอย่างวัสดุมาแช่สารละลายอีกเป็นรอบที่ 2 ซึ่งสารละลายที่ใช้จะต้องเปลี่ยนใหม่ทุกครั้งทำการทดสอบจนครบ 5 รอบ
6. นำตัวอย่างมาล้างด้วยสารละลาย $BaCl_2$ หรือน้ำสะอาด จากนั้นนำไปอบให้แห้ง
7. ร่อนตัวอย่างที่แห้งแล้วผ่านตะแกรง ตามข้อกำหนด ว่าเป็น Fine หรือ coarse aggregate ถ้าเป็น Fine aggregate ก็ให้ร่อนผ่านตะแกรงของใครของมัน คือ No.4, No.8, No.16, No.30 และ No.50 ถ้าเป็น coarse aggregate ก็ให้ใช้ตามข้อกำหนดตามกลุ่ม A, B, C และ D ดังตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3-8 ข้อกำหนดของ Coarse aggregate ตามกลุ่ม

กลุ่ม	ร่อนผ่านตะแกรง No.
A	1 ¼ ”
B	5/8 ”
C	5/16 ”
D	No.5

8. นำตัวอย่างที่ค้างตะแกรงจาก ข้อ 7 มาหาน้ำหนัก เพื่อคำนวณหา % Loss ของแต่ละเบอร์ตะแกรงหรือกลุ่มตะแกรง

$$\% \text{ Loss} = \frac{(\text{นน.ก่อนทดลอง} - \text{นน.หลังทดลอง}) \times 100}{\text{นน. ก่อนทดลอง}}$$

9. ในกรณีที่เปอร์เซ็นต์ค้างของแต่ละเบอร์หรือแต่ละกลุ่มน้อยกว่า 5% ไม่ต้องทำการทดสอบส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์หรือกลุ่มนั้นให้ใช้ % Loss ของชุดข้างเคียง โดยพิจารณาดังนี้

- ถ้าอยู่ระหว่างเบอร์หรือกลุ่มอื่น ให้ใช้ % Loss เฉลี่ยของชุดที่ประกบอยู่
- ถ้าอยู่ปลายสุดด้านบน ให้ใช้ % Loss ของชุดถัดลงมา
- ถ้าอยู่ปลายสุดด้านล่าง ให้ใช้ % Loss ของชุดถัดขึ้นไป

$$\% \text{ Loss รวม} = \frac{(\text{เปอร์เซ็นต์ Loss} \times \text{เปอร์เซ็นต์ค้าง})}{100}$$

3.4.6 การทดสอบด้านอื่นๆ

A. Atterberg limit (ASTM D4318)

คือจุดเปลี่ยนสถานภาพ หรือลิมิตของมวลดิน แบ่งออกเป็น

- Liquid Limit คือ ความชื้นในมวลดินขณะที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนสภาพจากของเหลวไปเป็นสารหนืด ตัวในสถานภาพพลาสติก

การทดสอบ liquid limit โดยวิธี Casagrande cup ขีดจำกัดลิควิดนิยามว่าเป็นความชื้นของดินที่วางอยู่ในจานเหลือง เซาะร่องด้วยอุปกรณ์มาตรฐานและปล่อยตกกระแทกจากความสูง 10 มม. จนปิดเข้าหากันเป็นระยะ 12.7 มม. เมื่อจำนวนครั้งในการตกกระแทกเท่ากับ 25 ครั้ง ที่อัตราการกระแทก 120 ครั้ง/นาที โดยทำการทดสอบความชื้นหลาย ๆ จุดที่มีค่าระหว่าง N = 15 ถึง 35 และพล้อตค่าจำนวนครั้งในการตกกระแทก blow count (N) ในสเกล semi – logarithm กับความชื้นจะได้เส้นตรง และหาเส้นตรง best fit (flow curve) Flow curve จะมีสมการอยู่ในรูป w = A log N + B โดยค่าความชันของ flow curve (A) จะเรียกว่า flow index ($\mathbf{i_f}$) และใช้ในการคำนวณ toughness index (I_t) และค่าความชื้นที่ตรงกับ N= 25 คือค่าขีดจำกัดลิควิด LL

$$\mathbf{I_t} = \frac{PI}{|I_f|} \quad ; \text{PI} = \text{LL} - \text{PL}$$

- Plastic Limit คือความชื้นในมวลดินขณะที่เปลี่ยนสถานภาพจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็งการ ทดสอบขีดจำกัดพลาสติกกำหนดว่าเป็นความชื้นของดินที่ดินจะร่วนออกเป็นชิ้นเมื่อปั้นเป็นแท่งยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 $\pm$ 0.5 มม.
- Shrinkage limit

ระหว่างการสูญเสียความชื้นของดินจนถึงค่าขีดจำกัดการหดตัวจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเกิดขึ้นพร้อมกัน เมื่อดินมีความชื้นน้อยกว่าขีดจำกัดการหดตัวจะไม่มีการหดตัวของดินเกิดขึ้นเมื่อมีการ ลดความชื้นลงอีก ดังนั้นค่าขีดจำกัดการหดตัวจึงนิยามเป็นความชื้นที่จะไม่มีการหดตัวของดินอีกต่อไปถ้า ความชื้นลดลงต่ำกว่าจุดนี้

C. การหาอินทรีย์สารเจือปนในมวลรวมละเอียด (Standard Test Method For Organic Impurities in Fine Aggregate) ASTM C40

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาอินทรีย์สารเจือปนในมวลละเอียดโดยวิธีเทียบสีแผ่นกับแผ่นสีมาตรฐานกับกระจกสีมาตรฐาน

<u>เครื่องมืออุปกรณ์</u>

1. ขวดแก้วใส ที่มีความจุ 350 ถึง 470 มิลลิลิตร มีฝาปิดชนิดกันน้ำได้

2. ระดับสารละลายสีมาตรฐานที่ 75 มิลลิลิตร
3. ระดับมวลละเอียดที่130 มิลลิลิตร
4. สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 200 มิลลิลิตร
5. กระจกเทียบสีมาตรฐาน

ขั้นตอนการทดลอง

1. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ทำได้โดยละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 3 ส่วนในน้ำสะอาดจำนวน 97 ส่วน
2. เตรียมมวลรวมละเอียดน้ำหนักประมาณ 450 กรัม โดยการทดสอบจะใส่มวลรวมละเอียดใส่ไปในขวดแก้วถึงระดับ 130 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมไว้จนปริมาณสารละลายและมวลรวมละเอียดถึงระดับ 200 มิลลิลิตร
4. ปิดฝาขวดแล้วเขย่าขวดแก้วอย่างแรงแล้วทิ้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. เมื่อครบ 24 ชั่วโมงให้นำแผ่นสีมาตรฐานมาเทียบโดยขั้นตอนการเทียบมีความหมายดังนี้ ถ้าสีของสารละลายเหนือตัวอย่างของมวลรวมละเอียดเข้มกว่าสารละลายสีมาตรฐานหรือเข้มกว่ากระจกสีมาตรฐานเบอร์ 3 แสดงว่า มวลรวมละเอียดที่นำมาทดสอบมีอินทรีย์สารเจือปนที่มีความรุนแรงมาก

3.5 วิธีการทดลองภาคสนาม

A. Field Density

Field Density Test โดยวิธีกรวยทราย (Sand Cone Method) วิธีนี้อาศัยทรายช่วยในการหาปริมาตรของหลุมโดยทรายที่ใช้คือ ทรายอ๊อตตาวา (Ottawa Sand) ซึ่งขนาดของเม็ดทรายจะมีลักษณะกลมและมีขนาดเท่า ๆ กัน หรือจะ ใช้ทรายที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์20 ค้างตะแกรงเบอร์ 30 ก็ได้เพื่อที่จะให้ผลของความหนาแน่นที่ เท่ากันโดยตลอดและไม่เกิดการแยกตัวของเม็ดหยาบและเม็ดเล็กขณะทำการทดสอบ

เครื่องมืออุปกรณ์

1. ขวดแก้วขนาดจุ 1 แกลลอนพร้อมด้วยกรวยและแผ่นรอง
2. แผ่นฐานรองขนาดประมาณ 12 นิ้ว x 12 นิ้ว มีขอบกันดินรอบด้าน
3. ทรายสำหรับหาปริมาตรหลุมคือ ทรายอ๊อตตาวา เป็นทรายที่มีขนาดเท่า ๆ กัน หรือ ทรายที่ร่อน ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 และค้างบนตะแกรงเบอร์ 30
4. เครื่องชั่ง ชนิดอ่านได้ละเอียดถึง 0.10 กรัม ถึง 10 กิโลกรัม
5. สิ่วเจาะดิน ค้อน ช้อนตักดิน แปรงทาสีใช้ปัดดิน กระป๋องใส่ดิน
6. เตาอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ 105 ± 5 องศาเซลเซียส
7. กระป๋องใส่ตัวอย่างดิน
8. ถาดใส่ดิน

ขั้นตอนการทดลอง

1-1 การหาน้ำหนักของทรายในกรวย

1. ชั่งขวดที่มีทรายบรรจุอยู่
2. วางเครื่องมือบนพื้นราบและเปิดลิ้นปล่อยให้ ทรายไหล ระวังอย่าให้เกิดการสั่นสะเทือน
3. ปิดลิ้นทันทีเมื่อทรายหยุดไหล ชั่งน้ำหนักของเครื่องมือและทรายที่เหลือในขวด ก็จะทราบน้ำหนักของทรายที่มีปริมาตรเท่ากรวย
4. ทำการทดลองอย่างน้อย 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ยมาเพื่อใช้ในการทดลองในสนามต่อไป

1-2 การหาความหนาแน่นของทรายที่ใช้ในการทดสอบ

1. นำโมลทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานมาประกอบเข้ากับฐานแล้วชั่ง น้ำหนักซึ่งจะได้น้ำหนักโมล
2. นำขวดใส่ทรายประมาณค่อนขวดพร้อมทั้งกรวยมาวางบนโมลให้ได้ระดับที่สม่ำเสมอ แล้วเปิดวาลว์ ปล่อยให้ ทรายไหล ตกอย่างอิสระโดยพยายามอย่า ให้เกิดการสั่นสะเทือน เมื่อแน่ใจว่า ทรายหยุดไหลแล้วทำการปิดวาล์ว หงายกรวยทราย ขึ้นวางไว้ใช้มีดเหล็ก สันตรงหรือแผ่นเหล็กปาดทรายที่ล้น บนขอบโมลให้เสมอกับขอบโมลและใช้แปรง ขน อ่อนค่อยๆปัดทรายออกจากฐานโมลให้ส ะอาดแล้วนำ ไปชั่ง จะได้น้ำหนัก ทรายรวม กับโมลเมื่อน้ำหนักโมลออกก็จะไดน้ำหนัก ทรายที่อยู่ในโมล
3. ใช้เวอร์เนียร์หรือไม้บรรทัดวัดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงโมลเพื่อหาปริมาตร
4. ทำการทดสอบแบบเดียวกันนั้น 2 – 3 ครั้งเพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยที่ถูกต้องที่สุดแล้วนำ ค่า น้ำหนักทรายในโมลและปริมาตร ของโมลไปหาค่าความหนาแน่นของทราย

1-3 การทดลองหาความหนาแน่นของดินในสนาม

1. ปรับพื้นผิวทดลองให้เรียบและได้ระดับ จากนั้นก็วางแผ่นฐานให้สนิทกับพื้นดิน แล้วตอกตะปู ยึดแผ่นฐานให้แน่น ปัดฝุ่นที่ผิวดินและที่แผ่นฐานออกให้หมด
2. ใช้สกัดเจาะดินบริเวณตรงกลางแผ่นฐานรองให้มีความลึกประมาณ 10 เซนติเมตรและก้นหลุมที่เจาะจะต้องมีขนาดเท่ากับปากหลุมเจาะ ดินที่ขุดจากหลุมจะต้องเก็บให้หมดโดยใช้ช้อนเล็กตักในกรณีเหลือดินน้อยๆให้ใช้แปรงทาสีปัดเศษดินที่อยู่ในหลุมให้เรียบร้อย
3. นำดินที่ได้จากการขุดมาชั่งและจดบันทึกค่าไว้หลังจากนั้น นำดินส่วนหนึ่งที่ขุดได้ไปชั่ง เสร็จแล้วนำไปเข้าเตาอบเพื่อหาค่าปริมาณความชื้น
4. ทำการคว่ำขวดทรายที่เตรียมไว้แล้ว ลงบนปากหลุมโดยให้กรวยทรายพอดีกับแผ่นฐานรองแล้วเปิดวาลว์ ระวังอย่าให้เกิดการกระทบกระเทือนในขณะปล่อยทรายลงหลุม เพราะจะทำให้ค่าที่ได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง
5. สังเกตุว่าเมื่อทรายที่ปล่อยลงหลุมหยุดไหลแล้ว ก็ทำการปิดวาล์วแล้วนำทรายที่เหลืออยู่ในขวดไปชั่งน้ำหนักพร้อมกับกรวยทรายและจดบันทึกค่าไว้
6. นำทรายที่อยู่ในหลุมใส่ลงในขวดตามเดิมโดยพยามอย่าให้มีดินที่อยู่ในก้นหลุมติดทรายขึ้นมาด้วยเพราะว่าทรายที่เก็บขึ้นมาจะต้องทดสอบในหลุมอื่นๆ อีกต่อไป

1.4 การคำนวณที่ได้จากผลการทดลองการหาความหนาแน่นของดิน

1. คำนวณหาค่าความหนาแน่นของทราย

$$\gamma_{Sand} = \frac{W_{Sand}}{V}$$

เมื่อ γ_{Sand} = ความหนาแน่นของทรายที่มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

W_{Sand} = น้ำหนักของทรายเต็มขวดมีหน่วยเป็นกรัม

V = ปริมาตรของขวดมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

2. น้ำหนักของทรายในกรวย

$$W_3 = W_1 - W_2$$

เมื่อ W_3 = น้ำหนักของทรายเต็มกรวยมีหน่วยเป็นกรัม

W_1 = น้ำหนักของทรายในขวด + น้ำหนักกรวยมีหน่วยเป็นกรัม

W_2 = น้ำหนักของทรายในขวดและน้ำหนักกรวยหลังการทดลองมีหน่วยเป็นกรัม

3. น้ำหนักของทรายในกรวยและทรายในหลุม

$$W_4 = W_5 - W_6$$

เมื่อ W_4 = น้ำหนักของทรายในหลุมและในกรวยมีหน่วยเป็นกรัม

W_5 = น้ำหนักของทรายในขวดและน้ำหนักกรวยก่อนการทดลองมีหน่วยเป็นกรัม

W_6 = น้ำหนักของทรายในขวดและน้ำหนักกรวยหลังการทดลองมีหน่วยเป็นกรัม

B. การหาความชื้นโดยให้ความร้อนโดยตรง

อุปกรณ์ที่ใช้มี อุปกรณ์ให้ความร้อนที่ทำให้วัสดุอุณหภูมิสูงกว่า 110 องศาเซลเซียส (Hotplates) เครื่องชั่ง มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 0.1 กรัม ภาชนะทำด้วยวัสดุทนความร้อน ถุงมือกันความร้อน แท่งกวนทำด้วยโลหะหรือแท่งแก้ว โดยขั้นตอนวิธีการทำงานทดสอบหาความชื้นวิธีให้ความร้อนโดยตรงดำเนินการเริ่มต้นจากชั่งตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 1,000 -2,000 กรัม สำหรับกรวดหรือหินย่อยน้ำหนัก 500 – 1,000 กรัม สำหรับทราย และน้ำหนัก 300 – 500 กรัม สำหรับดิน ใส่ลงในภาชนะ ที่มีขนาดเหมาะสม (W1) นำตัวอย่างพร้อมภาชนะไปให้ความร้อนอย่างทั่วถึง โดยคนหรือกวนตัวอย่างด้วยแท่งกวนเป็นระยะเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างไหม้ สังเกตได้จากสีตัวอย่างที่มีความสม่ำเสมอจนกระทั่งเห็นว่าตัวอย่างแห้งสนิท นำตัวอย่างและภาชนะออกจากแหล่งให้ความร้อน ชั่งน้ำหนักขณะร้อน (ควรมีอุปกรณ์ป้องกันเครื่องชั่งที่เสียหายจากความร้อน) นำตัวอย่างพร้อมภาชนะไปให้ความร้อนอีกครั้งจนตัวอย่างแห้งสนิท โดยคนหรือกวนตัวอย่างด้วยแท่งกวนเป็นระยะๆเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างไหม้ ให้ความร้อนจนกระทั้งตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่ (W2) ตรวจสอบเปอร์เซ็นต์การสูญหายของน้ำ ถ้าปริมาณน้ำที่สูญหายแตกต่างมากกว่าร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักตัวอย่างวัสดุก่อนให้ความร้อนครั้งหลังสุดให้ทำซ้ำเช่นเดิม จากนั้นจึงนำน้ำหนักก่อนให้ความร้อนและหลังให้ความร้อนไปคำนวณหาค่าปริมาณน้ำ (ความชื้น)

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลบริเวณฉะเชิงเทรา

การทดลองจะเริ่มจากการแยกขนาดหาเม็ดหินออกเป็น 3 ส่วนโดยใช้การทดลอง sieve analysis ซึ่งแต่ละส่วนจะมีดังนี้

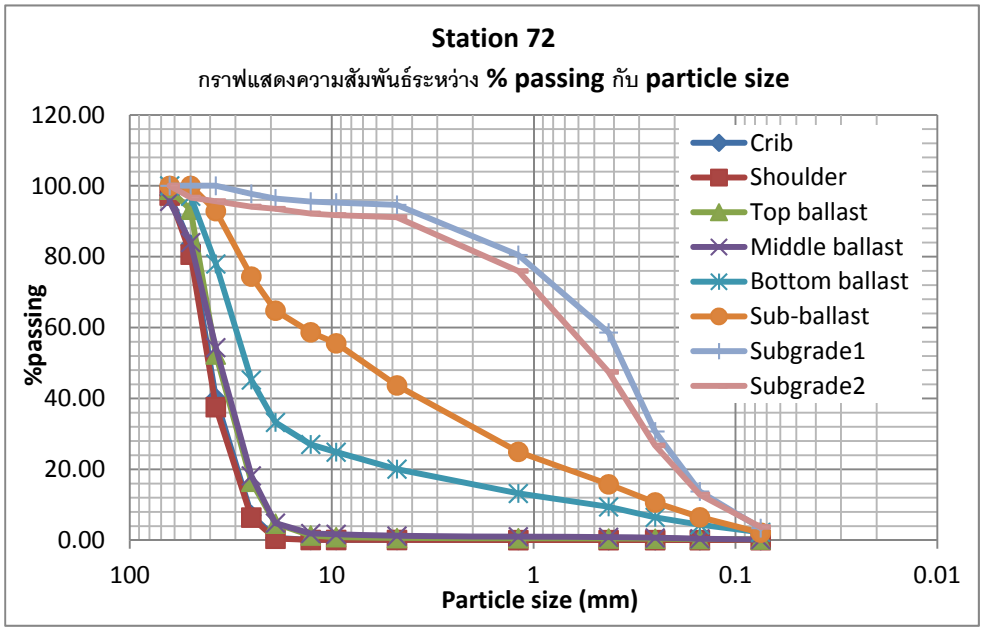
1. Coarse Aggregate (ผ่านตะแกรงขนาด $2\frac{1}{2}$" – ค้างตะแกรงเบอร์ $\frac{3}{8}$")
2. Coarse fouling (ผ่านตะแกรงขนาด $\frac{3}{8}$" – ค้างตะแกรงเบอร์ 200) จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนหยาบและส่วนละเอียดตามขนาดตะแกรง ดังนี้
   - Coarse fouling ส่วนหยาบ (ผ่านตะแกรงขนาด 3/8 "- ค้างตะแกรงเบอร์ 4)
   - Coarse fouling ส่วนละเอียด (ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 – ค้างตะแกรงเบอร์ 200)
3. Fine fouling (เล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200)

4.1 ผลการทดสอบ sieve analysis (ASTM D422, D1140, D6913)

สามารถดูผลการทดลอง sieve analysis ได้จากตารางที่ 4-1 และรูปที่ 4-1 ซึ่งจากการทดสอบสามารถคำนวณค่า C_u , C_c และ D_{50} จากตารางที่ 4-2 วิเคราะห์ได้ว่า ที่ชั้น Bottom Ballast มีค่า C_u มากที่สุดซึ่งบ่งบอกถึงกระจายตัวของเม็ดหินมาก และ ค่า C_u ที่น้อยที่สุดจะอยู่ที่ตำแหน่ง Shoulder ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวของเม็ดหินน้อย และที่ตำแหน่ง Crib กับ Shoulder จะมีขนาดตัวแทนของเม็ดหินเฉลี่ยใหญ่ที่สุด และขนาดตัวแทนของเม็ดหินเฉลี่ยเล็กที่สุดคือ Subgrade 1 ซึ่งจากการทดลองสามารถแบ่งผล sieve analysis ได้เป็น 3 ส่วน ซึ่งดูปริมาณของเม็ดดินได้จากตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบ sieve analysis ของ Station 72

Sieve#	Sieve size (mm)	%passing							
		Crib	Shoulder	Top ballast	Middle ballast	Bottom ballast	Sub-ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
2-1/2"	63.5	97.4	97.2	98.9	95.6	100.0	100.0	100.0	100.0
2"	50	83.4	80.6	93.3	84.0	97.1	100.0	100.0	96.7
1-1/2 "	37.5	40.1	37.6	52.4	54.4	77.9	92.9	100.0	95.7
1"	25	7.1	6.4	16.5	18.2	45.2	74.4	97.7	94.1
3/4 "	19	0.7	0.5	4.7	4.9	33.3	64.8	96.4	93.5
1/2 "	12.7	0.1	0.1	1.3	1.9	27.0	58.7	95.6	92.2
3/8 "	9.5	0.1	0.1	0.9	1.7	24.9	55.6	95.3	91.7
No. 4	4.75	0.1	0.1	0.6	1.2	20.1	43.7	94.6	91.1
No. 16	1.19	0.1	0.04	0.6	1.0	13.2	24.9	80.5	75.9
No. 40	0.425	0.1	0.03	0.5	0.9	9.4	15.8	58.6	47.5
No. 60	0.25	0.1	0.03	0.4	0.7	6.5	10.7	30.7	26.7
No.100	0.15	0.1	0.02	0.3	0.4	4.4	6.5	13.6	12.8
No.200	0.075	0.1	0.02	0.2	0.2	2.2	2.1	3.4	3.7



รูปที่ 4-1 การเปรียบเทียบผล sieve analysis ของ Station 72

ตารางที่ 4-2 ค่า coefficient of uniformity และ coefficient of curvature ของ Station 72

ตำแหน่ง	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	C_c	C_u
Crib	28.0	33.0	40.0	42.0	0.9	1.5
Shoulder	33.0	36.0	40.0	45.0	0.9	1.4
Top ballast	22.0	30.0	39.0	40.0	1.0	1.8
Middle ballast	25.0	30.0	37.0	40.0	0.9	1.6
Bottom ballast	0.5	17.0	28.0	30.0	21.5	66.7
Sub-ballast	0.3	2.0	7.0	17.0	0.9	63
Subgrade 1	0.2	0.3	0.3	0.5	0.9	2.7
Subgrade 2	0.1	0.3	0.4	0.6	0.9	4.7

ตารางที่ 4-3 เปอร์เซ็นต์ชนิดของตัวอย่างแบ่งตามขนาดของอนุภาคของ Station 72

ชนิดของอนุภาค	Crib	Shoulder	Top ballast	Middle ballast	Bottom ballast	Sub-ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
(%)Coarse Aggregate	99.88	99.92	99.1	98.3	75.1	44.4	4.8	8.3
(%)Coarse fouling	0.09	0.07	0.7	1.5	22.6	53.5	91.8	88.0
(%)Fine fouling	0.03	0.01	0.2	0.2	2.2	2.1	3.4	3.7

4.2 Coarse Aggregate

คือ ขนาดของเม็ดหินที่ผ่านตะแกรงขนาด $2\frac{1}{2}$" (63.5 mm) และค้างตะแกรงขนาด $\frac{3}{8}$" (9.5 mm) จะแบ่งออกออกเป็นการทดสอบย่อยดังนี้

A. ผลการทดสอบ Rock type และ Flat & elongated particle (ASTM D4791)

จากการทดสอบ Flat & Elongation ดูได้จากตารางที่ 4-4 พบว่าตำแหน่ง Sub-ballast มีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนามากกว่า 3 เท่ามากที่สุดและตำแหน่ง Ballast มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างมากกว่า 3 เท่ามากที่สุดส่วนตำแหน่ง Shoulder, Subgrade 1, Subgrade 2 พบว่ามีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาและอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างน้อยกว่า 3 เท่า

จากการทดสอบหาปริมาณชนิดของหินเทียบกับจำนวนก้อนซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 4-4 พบว่าหินทั้งหมดมีสามชนิด คือ หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์ โดยพบว่ามีหินแกรนิตมากที่สุดและชนิดที่น้อยสุดคือหินบะซอลต์ โดยตำแหน่ง Shoulder, Ballast และ Subgrade 1 จะพบเฉพาะหินแกรนิต Sub-ballast และ Subgrade 2 จะพบเฉพาะหินแกรนิตและหินปูน ส่วน Crib พบหินทั้งสามชนิด

ตารางที่ 4-4 ผลการทดสอบ Flat & Elongation และชนิดของหินของ Station 72

Station	ตำแหน่ง	% ต่อน้ำหนักของหิน		% ต่อจำนวนของเม็ดหิน		
		%Flat	%Elongation	Granite	Limestone	Basalt
72	Crib	2.45	0.00	94.51	1.10	4.40
	Shoulder	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00
	Ballast	0.36	0.57	100.00	0.00	0.00
	Sub-ballast	3.83	0.35	99.03	0.97	0.00
	Subgrade 1	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00
	Subgrade 2	0.00	0.00	72.73	27.27	0.00

B. ผลการทดสอบ Specific gravity และ Absorption (ASTM C127)

ผลการทดสอบ Specific gravity สามารถดูได้จากตารางที่ 4-5 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของส่วนที่เป็น coarse aggregate จะอยู่ที่ 2.70 ถึง 2.71 และค่าความถ่วงจำเพาะทุกตำแหน่งมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ที่ตำแหน่ง Subgrade 1 และ Subgrade 2 มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

ผลการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ Water Absorption สามารถดูได้จากตารางที่ 4-5 พบว่าแต่ละตำแหน่งจะมีค่าระหว่าง 0.43-0.49 และในทุกๆตำแหน่งจะมีค่าใกล้เคียงกันส่วนที่ตำแหน่ง Subgrade 1 และ Subgrade 2 มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

ตารางที่ 4-5 ผลการทดสอบ Specific gravity และ Water Absorption ของ Coarse Aggregate ของ Station72

Station 72	ตำแหน่ง					
	crib	shoulder	ballast	sub-ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
SG	2.70	2.71	2.71	2.71	NA.	NA.
(%) Absorption	0.43	0.45	0.57	0.49	NA.	NA.

C. ผลการทดสอบ Los Angeles Values (ASTM C131, ASTM C535)

จากการทดสอบ Los Angeles Values สามารถดูได้จากตารางที่ 4-6 พบว่าค่าการขัดสีของตำแหน่งที่เป็น Shoulder เป็นตำแหน่งที่ทนต่อการขัดสีได้น้อยที่สุดแล้วส่วนที่ทนต่อการขัดสีมากที่สุดคือ Crib ส่วนตำแหน่ง Sub-ballast , Subgrade 1 และ Subgrade 2 มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบ Los Angeles Values ของ Station 72

ตำแหน่ง	ค่าการขัดสี (%)
Crib	17.13
Shoulder	21.25
Ballast	18.37
Sub-ballast	NA.
Subgrade 1	NA.
Subgrade 2	NA.

D. ผลการทดสอบ Aggregate Impact value (AIV)(BS 812 Part 112:1990) และ การทดสอบ Aggregate Compression Value (ACV) (BS 812 Part 110:1990)

จากการทดลอง AIV สามารถดูได้จากตารางที่ 4-7 พบว่าส่วนที่ทนต่อแรงกระแทกมากที่สุดคือ Sub-ballast และส่วนที่ทนต่อการกระแทกได้น้อยที่สุดคือ Ballast โดยที่ตำแหน่ง Crib, Shoulder, Subgrade 1 และ Subgrade 2 มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ และการทดสอบ ACV จะทดลองได้เพียงตำแหน่ง Ballast เนื่องจากตำแหน่งอื่นมีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ ซึ่งสามารถดูผลการทดสอบได้จากตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 ผลการทดสอบ AIV และ ACV ของ Station 72

การทดลอง	ตำแหน่ง					
	Shoulder	Crib	Ballast	Sub-ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
AIV (%)	NA.	NA.	5.67	8.55	NA.	NA.
ACV (%)	NA.	NA.	18.83	NA.	NA.	NA.

หมายเหตุ : ใช้ตัวอย่างการทดลองที่ผ่านตะแกรงขนาด $\frac{3}{4}$ ” และค้างตะแกรงขนาด $\frac{3}{8}$ ”

E. ผลการทดสอบ Sulfate Soundness (ASTM C88-99a)

จากการการทดสอบ Sulfate Soundness สามารถดูได้จากตารางที่ 4-8 พบว่าส่วนทีเป็น Coarse Aggregate ตำแหน่งที่ทนต่อการกัดกร่อนของ Sulfate ได้มากที่สุดคือ Ballast และส่วนที่ทนได้น้อยสุดคือ Crib ส่วนตำแหน่ง Subgrade 1 และ Subgrade 2 มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

ตารางที่ 4-8 ผลการทดสอบ Sulfate Soundness ของ Coarse Aggregate ของ Station 72

ส่วน Coarse Aggregate	ตำแหน่ง					
	Crib	Shoulder	Ballast	Sub-Ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
(%) Soundness	0.81	0.44	0.30	0.31	NA.	NA.

4.3 Coarse fouling (ผ่านตะแกรงขนาด $\frac{3}{8}$" – ค้างตะแกรงเบอร์ 200)

A. ผลการทดสอบ Visual inspection

- **Crib และ Shoulder** จะมีส่วนที่เป็น course fouling น้อยมาก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเพียงฝุ่นของหินที่ถูกบดทับ
- **Ballast** จะพบเศษหินที่ตะแกรงเบอร์4 ถึง เบอร์ 16 เป็นหินที่แตกแล้วเม็ดเล็กลง ส่วนที่เป็นส่วนที่ละเอียดจะเป็นฝุ่นสีเทาที่เป็นฝุ่นของหินที่ถูกบดทับจนละเอียดมีสีเทาและมีเศษใบไม้ผสมอยู่ด้วย
- **Sub-ballast** จะพบเศษหินที่ตะแกรงเบอร์ 4 ถึง เบอร์ 16 เป็นหินแกรนิตและมีหินปูนผสมอยู่เล็กน้อย ส่วนที่เป็นส่วนละเอียดจะเป็นฝุ่นหินสีเทาและมีเศษรากไม้ปนอยู่เล็กน้อย
- **Subgrade 1** ส่วนใหญ่จะเป็นหินแกรนิตที่ตะแกรงเบอร์ 4 แล้วที่ตะแกรงเบอร์ 16 จะเป็นหินที่อยู่ชั้นบนแตกล่วงลงมา ส่วนที่เป็นส่วนละเอียดจะเป็นดินเดิมสีน้ำตาลแดง
- **Subgrade 2** ส่วนใหญ่ที่เป็นเม็ดหินที่เบอร์ 4 จะมีน้อย ส่วนที่เบอร์ 16 จะมีปริมาณที่มากและจะเป็นหินที่เป็นหินเดิมที่มีอยู่แล้ว ส่วนที่เป็นส่วนละเอียดจะดินเดิมมีสีน้ำตาลซึ่งมีสีอ่อนกว่า Subgrade 2

รูปที่ 4-2 visual inspection ของ Ballast Station 72

รูปที่ 4-3 visual inspection ของ Sub-ballast Station 72

รูปที่ 4-4 visual inspection ของ Subgrade 1 Station 72

รูปที่ 4-5 visual inspection ของ Subgrade 2 Station 72

B. ผลการทดสอบ Specific gravity และ Absorption (ASTM C127, ASTM D854)

จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นส่วนหยาบ(ค้างตะแกรงเบอร์ 4) และส่วนที่เป็นส่วนละเอียด(ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ถึง ค้างตะแกรงเบอร์ 200)

ผลการทดสอบ Specific gravity (ผ่านตะแกรงขนาด 3/8”- ค้างตะแกรงเบอร์ 4) สามารถดูได้จากตารางที่ 4-9 พบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของส่วนหยาบของส่วนที่เป็น coarse fouling จะอยู่ที่ 2.82 ถึง 2.72

ผลการทดสอบหาค่า Water Absorption (ผ่านตะแกรงขนาด 3/8”- ค้างตะแกรงเบอร์ 4) สามารถดูได้จากตารางที่ 4-9 พบว่าการทดสอบได้จะมีค่าระหว่าง 3.94 ถึง 3.10 %

ผลการทดสอบ Specific gravity (ผ่านตะแกรงขนาด 4 - ค้างตะแกรงเบอร์ 200) สามารถดูได้จากตารางที่ 4-10 พบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของส่วนละเอียดของส่วนที่เป็น coarse fouling จะอยู่ที่ 2.58 ถึง 2.66 และค่าความถ่วงจำเพาะที่มากที่สุดจะอยู่ที่ตำแหน่ง Ballast และน้อยที่สุดจะอยู่ที่ Sub-Ballast

ตารางที่ 4-9 ผลการทดสอบ Specific gravity และค่า Absorption ส่วนที่เป็น Coarse Fouling (ผ่านตะแกรงขนาด $\frac{3}{8}$" ค้างตะแกรงเบอร์ 4) ของ Station 72

Station 72	ตำแหน่ง					
	crib	shoulder	ballast	sub-ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
SG	NA.	NA.	2.82	2.72	NA.	NA.
(%) Absorption	NA.	NA.	3.94	3.10	NA.	NA.

หมายเหตุ : ตำแหน่ง Crib, Shoulder, Subgrade1, และ Subgrade2 มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

ตารางที่ 4-10 ผลการทดสอบ Specific gravity ส่วนทีเป็น Coarse Fouling (ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ค้างตะแกรงเบอร์ 200) ของ Station 72

Station 72	ตำแหน่ง					
	crib	shoulder	ballast	sub-ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
SG	NA.	NA.	2.66	2.58	2.62	2.59

หมายเหตุ : ตำแหน่ง Crib และ Shoulder มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

C. ผลการทดสอบ Organic Impurities (ASTM C40)

สามารถดูได้จากตารางที่ 4-11 พบว่าตำแหน่ง Subgrade 1 มีการเจือปนของสารอินทรีย์ในปริมาณมากโดยที่ตำแหน่ง Crib กับ Shoulder มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

ตารางที่ 4-11 ผลการทดสอบ Organic Impurities ของ Coarse fouling ของ Station 72

ตำแหน่ง	Crib	Shoulder	Ballast	Sub-ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
เบอร์สี	Na.	Na.	2	1	4	3

หมายเหตุ เบอร์สีมากกว่าเบอร์ 3 มีการเจือปนของสารอินทรีย์มาก

D. ผลการทดสอบ Sulfate Soundness (ASTM C88-99a)

การทดสอบ Sulfate Soundness สามารถดูได้จากตารางที่ 4-12 พบว่าส่วนที่ทนต่อการกัดกร่อนของ Sulfate ได้มากที่สุดคือ Ballast และตำแหน่งที่ทนได้น้อยที่สุดคือ Sub-ballast ส่วน Crib, Shoulder , Subgrade 1 และ Subgrade 2 มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

ตารางที่ 4-12 ผลการทดสอบ Sulfate Soundness ของ Coarse fouling ของ Station 72

ส่วน Coarse Fouling	ตำแหน่ง					
	Crib	Shoulder	Ballast	Sub-Ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
(%) Soundness	NA.	NA.	0.40	0.30	NA.	NA.

4.4 Fine fouling (เล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200)

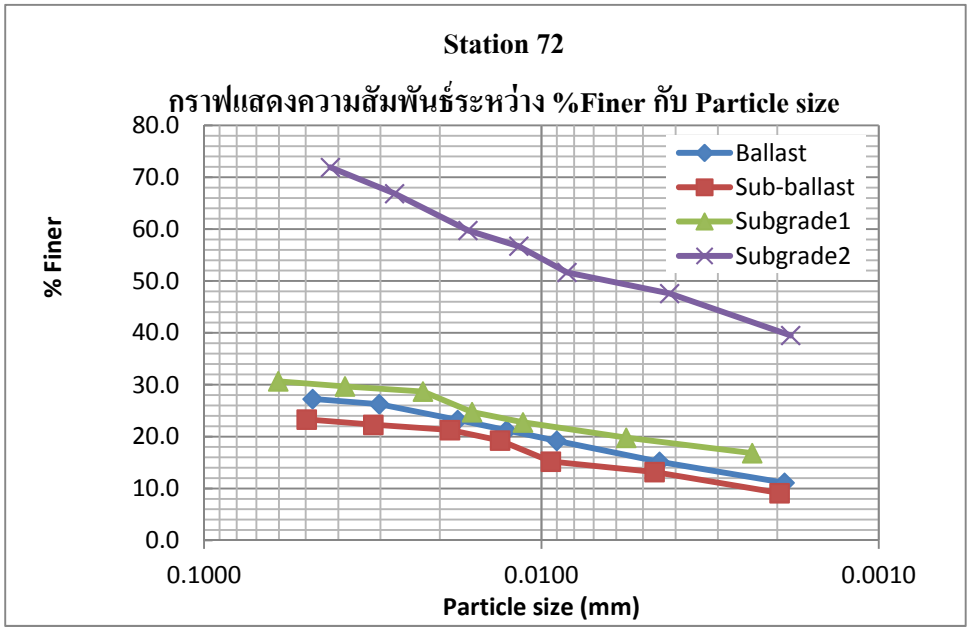
A. ผลการทดสอบ Hydrometer (ASTM D422)

จากการทดสอบ Hydrometer สามารถดูได้จากตารางที่ 4-13 และรูปที่ 4-6 สามารถวิเคราะห์ Clay faction ได้ดังนี้

- Ballast Clay faction มีค่าเท่ากับ 12%
- Sub-ballast Clay faction มีค่าเท่ากับ 9%
- Subgrade1 Clay faction มีค่าเท่ากับ 17%
- Subgrade2 Clay faction มีค่าเท่ากับ 40%

ตารางที่ 4-13 ผลการทดสอบ Hydrometer ของ Station 72

ตำแหน่ง							
Ballast		Sub-Ballast		Subgrade 1		Subgrade 2	
%Finer	D (mm)	%Finer	D (mm)	%Finer	D (mm)	%Finer	D (mm)
27.27	0.0477	23.31	0.0496	30.67	0.0603	71.91	0.0422
26.26	0.0302	22.30	0.0315	29.68	0.0382	66.84	0.0272
23.23	0.0177	21.28	0.0187	28.70	0.0224	59.75	0.0165
21.21	0.0127	19.25	0.0133	24.74	0.0161	56.71	0.0117
19.19	0.0090	15.20	0.0094	22.76	0.0113	51.65	0.0084
15.15	0.0045	13.17	0.0046	19.79	0.0056	47.60	0.0042
11.11	0.0019	9.1205	0.0020	16.82	0.0024	39.50	0.0018



รูปที่ 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Finer กับขนาดของเม็ดดินของ Station 72

B. ผลการทดสอบ Specific gravity (ASTM D854)

จากการทดสอบ Specific gravity พบว่าตำแหน่ง Crib และ Shoulder มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ และตำแหน่งที่ทำการทดสอบได้จะแสดงผลดัง ตารางที่ 4-14 ซึ่งจะมีค่าระหว่าง 2.57 ถึง 2.67 ซึ่งที่ตำแหน่ง Subgrade 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงที่สุด และน้อยที่สุดคือ Subgrade 2

ตารางที่ 4-14 ผลการทดสอบ Specific gravity ของ Fine fouling ของ Station 72

Station 72	ตำแหน่ง					
	crib	shoulder	ballast	sub-ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
SG	NA.	NA.	2.60	2.58	2.67	2.57

C. ผลการทดสอบ Atterberg limit (ASTM D4318)

- Ballast การทดสอบ Atterberg limit แสดงที่ตาราง 4-15 มีค่า LL เท่ากับ 27.5% มีค่า PL เท่ากับ 18.7% มีค่า PI เท่ากับ 8.8% และมีค่า Shrinkage Limit เท่ากับ 9.9% จึงสรุปได้ว่าที่ Station 72 ตำแหน่ง Ballast เป็นดินตะกอนอนินทรีย์ที่มีความเหนียวต่ำถึงปานกลาง ดินเหนียวกรวด ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนตะกอนทราย ดินเหนียวล้วน (CL)
- Sub-ballast การทดสอบ Atterberg limit แสดงที่ตาราง 4-15 มีค่า LL เท่ากับ 29.9% มีค่า PL เท่ากับ 19.3% มีค่า PI เท่ากับ 9.7% และมีค่า Shrinkage Limit เท่ากับ 10.0% จึงสรุปได้ว่าที่ Station 72 ตำแหน่ง Sub-ballast เป็นดินตะกอนอนินทรีย์ที่มีความเหนียวต่ำถึงปานกลาง ดินเหนียวกรวด ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนตะกอนทราย ดินเหนียวล้วน (CL)
- Subgrade1 การทดสอบ Atterberg limit แสดงที่ตาราง 4-15 มีค่า LL เท่ากับ 56.6% มีค่า PL เท่ากับ 23.6% มีค่า PI เท่ากับ 33.0% และมีค่า Shrinkage Limit เท่ากับ 16.9% จึงสรุปได้ว่าที่ Station 75 ตำแหน่ง Subgrade 1 เป็นดินเหนียวอนินทรีย์มีความเหนียวสูง ดินเหนียวมีความหนืดสูง (CH)
- Subgrade2 การทดสอบ Atterberg limit แสดงที่ตาราง 4-15 มีค่า LL เท่ากับ 37.7% มีค่า PL เท่ากับ 20.5% มีค่า PI เท่ากับ 17.3% และมีค่า Shrinkage Limit เท่ากับ 14.2% จึงสรุปได้ว่าที่ Station 72 ตำแหน่ง Subgrade 2 เป็นดินตะกอน๐2นินทรีย์ที่มีความเหนียวต่ำถึงปานกลาง ดินเหนียวกรวด ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนตะกอนทราย ดินเหนียวล้วน (CL)

ตารางที่ 4-15 ผลการทดสอบ Atterberg limit ของ Station 72

ตำแหน่ง	Liquid limit(%)	Plastic limit(%)	Shrinkage limit(%)	Plasticity index(%)
Ballast	27.5	18.7	9.9	8.8
Sub-ballast	29.9	19.3	20.0	9.7
Subgrade 1	56.6	23.6	16.9	33.0
Subgrade 2	37.7	20.5	14.2	17.3

D. ผลการทดสอบ Organic Impurities (ASTM C40)

จากการทดสอบแสดงที่ตาราง 4-16 พบส่วนที่เป็น Subgrade1 มีการเจือปนของสารอินทรีย์ในปริมาณมากโดยที่ตำแหน่ง Crib และ Shoulder มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

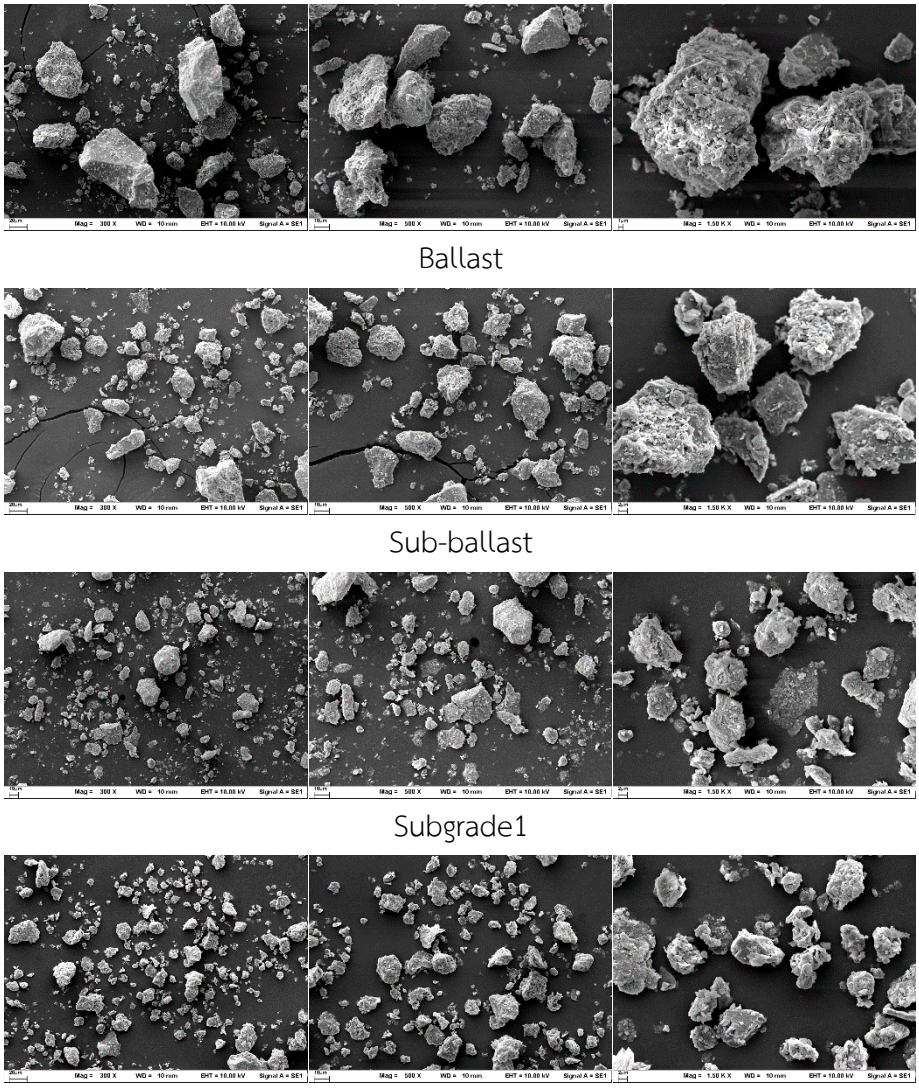
ตารางที่ 4-16 ผลการทดสอบ Organic Impurities ของ Fine fouling ของ Station 72

ตำแหน่ง	Crib	Shoulder	Ballast	Sub-ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
เบอร์สี	Na.	Na.	2	2	4	2

หมายเหตุ : เบอร์สีมากกว่าเบอร์ 3 มีการเจือปนของ Organic มาก

E. ผลการทดสอบ Scanning Electron Microscopy (SEM)

ผลการทดสอบ SEM ขนาดขยาย 300,500 และ 1500 เท่าตามลำดับ จากรูปที่ 4-7 พบว่าขนาดของอนุภาคที่กำลังขยาย 1500 เท่า Ballast มีขนาดที่ใหญ่กว่าตำแหน่งอื่นอย่างเห็นได้ชัดและที่กำลังขยาย 300, 500 เท่านั้นเห็นได้ชัดว่า Ballast และ Sub-ballast มีขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กปนอยู่เล็กน้อยส่วน Subgrade 1 และ Subgrade 2 นั้นส่วนใหญ่เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก



รูปที่ 4-7 ผลการทดสอบ SEM ขนาดขยาย 300,500 และ 1500 เท่าของ Station 72

4.5 การทดสอบหาความหนาแน่นของดินในสนาม

การทดสอบหาความหนาแน่นของดินในสนามโดยใช้วิธี Sand cone ซึ่งได้ทำการทดสอบ 2 ชุดการทดลองในแต่ละตำแหน่งดังตารางที่ 4-17 โดยพบว่าตำแหน่งที่มีความหนาแน่นมากที่สุดคือ Crib ของ Station 72 และและตำแหน่งที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุดคือ Ballast ของ Station 72

ตารางที่ 4-17 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของดินในสนาม

Station	Dry density (KN/m^3)					
	Crib		Shoulder		Ballast	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
72	24.98	13.63	17.96	16.33	16.52	12.57

หมายเหตุ : (1) คือ จากการทดสอบ Sand cone ชุดที่ 1, (2) คือ จากการทดสอบ Sand cone ชุดที่ 2

4.6 การทดสอบหาความชื้นของดิน

การทดสอบหาความชื้นของดินดังแสดงในตารางที่ 4-18 โดยวิธีอบในเตาอบควบคุมอุณหภูมิ 110±5°C

ตารางที่ 4-18 ผลการทดสอบหาค่า Water content

Station	(%) Water content					
	Crib		Shoulder		Ballast	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
72	0.21	0.20	0.14	0.19	0.88	0.11

หมายเหตุ : (1) คือ จากการทดสอบ Sand cone ชุดที่ 1, (2) คือ จากการทดสอบ Sand cone ชุดที่ 2

4.7 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐาน

4.7.1 เปรียบเทียบกับมาตรฐานของหินโรยทางรถไฟในประเทศออสเตรเลียหน่วยงาน Australian Rail Track Corporation (ARTC)

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Crib เปรียบเทียบกับมาตรฐานของหน่วยงาน Australian Rail Track Corporation (ARTC) ในประเทศออสเตรเลียแสดงดังตารางที่ 4-19 พบว่า

- การทดสอบ Flat & Elongation มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Aggregate Crushing Value มีตัวอย่างไม่เพียงพอสำหรับการทดสอบ
- การทดสอบ Sieve analysis มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของหินที่ผ่านแกรงขนาด 63 มิลลิเมตรน้อยกว่า 100 %และผ่านตะแกรงขนาด 53 มิลลิเมตรน้อยกว่า 85 % จึงมีค่าไม่ตรงตามมาตรฐาน

ตารางที่ 4-19 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Crib กับมาตรฐานของหน่วยงาน Australian Rail Track Corporation (ARTC) ในประเทศออสเตรเลีย

การทดลอง	รายละเอียด		Station 72
Flat & Elongation	ไม่ควรเกิน 30 %	Flat	2.45
		Elongation	0.00
Los Angeles Value	ไม่ควรเกิน 25 %		17.13
Aggregate Crushing Value	ไม่ควรเกิน 25 %		NA.
Sieve analysis			
ผ่านตะแกรงขนาด 63 มม.	100%		97.37
ผ่านตะแกรงขนาด 53 มม.	85-100%		83.37
ผ่านตะแกรงขนาด 37.5 มม.	20-65%		40.08
ผ่านตะแกรงขนาด 26.5 มม.	0-20%		7.08
ผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มม.	0-5%		0.72
ผ่านตะแกรงขนาด 13.2 มม.	0-2%		0.12
ผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม.	0-1%		0.11
ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มม.	0-1%		0.06

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Shoulder เปรียบเทียบกับมาตรฐานของหน่วยงาน Australian Rail Track Corporation (ARTC) ในประเทศออสเตรเลียแสดงดังตารางที่ 4-20 พบว่า

- การทดสอบ Flat & Elongation มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Los Angeles Value มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Aggregate Crushing Value มีตัวอย่างไม่เพียงพอสำหรับการทดสอบ
- การทดสอบ Sieve analysis มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของหินที่ผ่านแกรงขนาด 63 มิลลิเมตรน้อยกว่า 100 %และผ่านตะแกรงขนาด 53 มิลลิเมตรน้อยกว่า 85 % จึงมีค่าไม่ตรงตามมาตรฐาน

ตารางที่ 4-20 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Shoulder กับมาตรฐานของหน่วยงาน Australian Rail Track Corporation (ARTC) ในประเทศออสเตรเลีย

การทดลอง	รายละเอียด		Station 72
Flat & Elongation	ไม่ควรเกิน 30 %	Flat	0.00
		Elongation	0.00
Los Angeles Value	ไม่ควรเกิน 25 %		21.25
Aggregate Crushing Value	ไม่ควรเกิน 25 %		NA.
Sieve analysis			
ผ่านตะแกรงขนาด 63 มม.	100%		97.23
ผ่านตะแกรงขนาด 53 มม.	85-100%		80.58
ผ่านตะแกรงขนาด 37.5 มม.	20-65%		37.55
ผ่านตะแกรงขนาด 26.5 มม.	0-20%		6.40
ผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มม.	0-5%		0.45
ผ่านตะแกรงขนาด 13.2 มม.	0-2%		0.09
ผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม.	0-1%		0.06
ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มม.	0-1%		0.02

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Ballast เปรียบเทียบกับมาตรฐานของหน่วยงาน Australian Rail Track Corporation (ARTC) ในประเทศออสเตรเลียแสดงดังตารางที่ 4-21 พบว่า

- การทดสอบ Flat & Elongation มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Los Angeles Value มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Aggregate Crushing Value มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis มีค่าไม่ตรงตามมาตรฐาน

ตารางที่ 4-21 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Ballast กับมาตรฐานของหน่วยงาน Australian Rail Track Corporation (ARTC) ในประเทศออสเตรเลีย

การทดลอง	รายละเอียด		Station 72		
Flat & Elongation	ไม่ควรเกิน 30 %	Flat	0.36		
		Elongation	0.57		
Los Angeles Value	ไม่ควรเกิน 25 %		18.37		
Aggregate Crushing Value	ไม่ควรเกิน 25 %		18.83		
Sieve analysis			T	M	B
ผ่านตะแกรงขนาด 63 มม.	100%		98.89	95.63	100
ผ่านตะแกรงขนาด 53 มม.	85-100%		93.27	84.00	97.07
ผ่านตะแกรงขนาด 37.5 มม.	20-65%		52.39	54.35	77.98
ผ่านตะแกรงขนาด 26.5 มม.	0-20%		16.52	18.18	45.21
ผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มม.	0-5%		4.69	4.85	33.25
ผ่านตะแกรงขนาด 13.2 มม.	0-2%		1.32	1.92	27.03
ผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม.	0-1%		0.63	1.20	20.07
ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มม.	0-1%		0.23	0.20	2.24

หมายเหตุ : T คือ Top Ballast, M คือ Middle Ballast, B คือ Bottom Ballast

4.7.2 เปรียบเทียบกับ Specification for track ballast ในประเทศอินเดีย

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Crib เปรียบเทียบกับมาตรฐาน Specification for track ballast ในประเทศอินเดียแสดงดังตารางที่ 4-22 พบว่า

- การทดสอบ Aggregate Abrasion Value มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Aggregate Impact Value มีตัวอย่างไม่เพียงพอสำหรับการทดสอบ
- การทดสอบ Water absorption มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis มีค่าตรงตามมาตรฐาน

ตารางที่ 4-22 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Crib กับมาตรฐาน Specification for track ballast ในประเทศอินเดีย

การทดลอง	รายละเอียด	Station 72
Aggregate Abrasion Value	ไม่ควรเกิน 30%	17.13
Aggregate Impact Value	ไม่ควรเกิน 20%	NA.
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1%	0.43
Sieve analysis		
ค้างตะแกรงขนาด 65 มม.	ไม่ควรเกิน 5 %	2.63
ค้างตะแกรงขนาด 40 มม.	40-60 %	59.92
ค้างตะแกรงขนาด 20 มม.	ไม่น้อยกว่า 98 %	99.28

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Shoulder เปรียบเทียบกับมาตรฐาน Specification for track ballast ในประเทศอินเดียแสดงดังตารางที่ 4-23 พบว่า

- การทดสอบ Aggregate Abrasion Value ตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Aggregate Impact Value มีตัวอย่างไม่เพียงพอสำหรับการทดสอบ
- การทดสอบ Water absorption ตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis ไม่ตรงตามมาตรฐานเพราะเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของหินที่ค้างบนตะแกรงขนาด 40 มิลลิเมตรมีค่ามากกว่า 60 %และค้างบนตะแกรงขนาด 20 มิลลิเมตรมีค่าน้อยกว่า 98 %

ตารางที่ 4-23 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Shoulder กับมาตรฐาน Specification for track ballast ในประเทศอินเดีย

การทดลอง	รายละเอียด	Station 72
Aggregate Abrasion Value	ไม่ควรเกิน 30%	21.25
Aggregate Impact Value	ไม่ควรเกิน 20 %	NA.
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1%	0.45
Sieve analysis		
ค้างตะแกรงขนาด 65 มม.	ไม่ควรเกิน 5 %	2.77
ค้างตะแกรงขนาด 40 มม.	40-60 %	62.45
ค้างตะแกรงขนาด 20 มม.	ไม่น้อยกว่า 98 %	99.55

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Ballast เปรียบเทียบกับมาตรฐาน Ballast specification for high axle load and high speed ในประเทศญี่ปุ่นแสดงดังตารางที่ 4-24 พบว่า

- การทดสอบ Aggregate Abrasion Value มีค่าตรงตามมาตรฐาน

- การทดสอบ Aggregate Impact Value มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Water absorption มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis ไม่ตรงตามมาตรฐานเพราะส่วนใหญ่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของหินที่ค้างบนตะแกรงขนาด 40 มิลลิเมตรต่ำกว่า 40 % และค้างบนตะแกรงขนาด 20 มิลลิเมตรน้อยกว่า 98 %

ตารางที่ 4-24 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Ballast กับมาตรฐาน Specification for track ballast ในประเทศอินเดีย

การทดลอง	รายละเอียด	Station 72		
Aggregate Abrasion Value	ไม่ควรเกิน 30%	18.37		
Aggregate Impact Value	ไม่ควรเกิน 20%	5.67		
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1%	0.57		
Sieve analysis		T	M	B
ค้างตะแกรงขนาด 65 มม.	ไม่ควรเกิน 5 %	1.11	4.37	0.00
ค้างตะแกรงขนาด 40 มม.	40-60 %	47.61	45.65	22.02
ค้างตะแกรงขนาด 20 มม.	ไม่น้อยกว่า 98 %	95.31	95.15	66.75

หมายเหตุ : T คือ Top Ballast, M คือ Middle Ballast, B คือ Bottom Ballast

4.7.3 เปรียบเทียบกับมาตรฐานหินโรยทางรถไฟของหน่วยงาน American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) ในประเทศอเมริกา

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Crib เปรียบเทียบกับมาตรฐานของหน่วยงาน American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) ในประเทศอเมริกา แสดงดังตารางที่ 4-25 พบว่า

- การทดสอบ Flat & Elongation มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Specific Gravity มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Water Absorption มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Soundness (Sodium sulfate) มีค่าตรงตามาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis มีค่าตรงตามมาตรฐาน

ตารางที่ 4-25 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Crib กับมาตรฐานของหน่วยงาน American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) ในประเทศอเมริกา

การทดลอง	รายละเอียด		Station 72
Flat & Elongation	ไม่ควรเกิน 5%	Flat	2.45
		Elongation	0.00
Specific Gravity	ไม่น้อยกว่า 2.60		2.70
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1 %		0.43
Soundness (Sodium sulfate)	ไม่ควรเกิน 5 %		0.81
Sieve analysis			
ผ่านตะแกรงขนาด 76.10 มม.	100%		100
ผ่านตะแกรงขนาด 63.5 มม.	90-100%		97.37
ผ่านตะแกรงขนาด 37.5 มม.	25-60%		40.08
ผ่านตะแกรงขนาด 19 มม.	0-10%		0.72
ผ่านตะแกรงขนาด 12.7 มม.	0-5%		0.12
ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มม.	1.0%		0.06

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Shoulder เปรียบเทียบกับมาตรฐานของหน่วยงาน American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) ในประเทศอเมริกา แสดงดังตารางที่ 4-26 พบว่า

- การทดสอบ Flat & Elongation มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Specific Gravity มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Water Absorption มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Soundness (Sodium sulfate) มีค่าตรงตามาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis ตรงตามมาตรฐาน

ตารางที่ 4-26 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Shoulder กับมาตรฐานของหน่วยงาน American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) ในประเทศอเมริกา

การทดลอง	รายละเอียด		Station 72
Flat & Elongation	ไม่ควรเกิน 5%	Flat	0.00
		Elongation	0.00
Specific Gravity	ไม่น้อยกว่า 2.60		2.71
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1 %		0.45
Soundness (Sodium sulfate)	ไม่ควรเกิน 5 %		0.44
Sieve analysis			
ผ่านตะแกรงขนาด 76.10 มม.	100%		100
ผ่านตะแกรงขนาด 63.5 มม.	90-100%		97.23
ผ่านตะแกรงขนาด 37.5 มม.	25-60%		37.55
ผ่านตะแกรงขนาด 19 มม.	0-10%		0.45
ผ่านตะแกรงขนาด 12.7 มม.	0-5%		0.09
ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มม.	1.0%		0.02

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Ballast เปรียบเทียบกับมาตรฐานของหน่วยงาน American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) ในประเทศอเมริกา แสดงดังตารางที่ 4-26 พบว่า

- การทดสอบ Flat & Elongation มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Specific Gravity มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Water Absorption มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Soundness (Sodium sulfate) มีค่าตรงตามาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis ส่วน Top ballast และ Middle ballast ของ Station 72 มีค่าตรงตามมาตรฐาน

ตารางที่ 4-26 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Ballast กับมาตรฐานของหน่วยงาน American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) ในประเทศอเมริกา

การทดลอง	รายละเอียด		Station 72		
Flat & Elongation	ไม่ควรเกิน 5%	Flat	0.36		
		Elongation	0.57		
Specific Gravity	ไม่น้อยกว่า 2.60		2.71		
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1 %		0.57		
Soundness (Sodium sulfate)	ไม่ควรเกิน 5 %		0.30		
Sieve analysis			T	M	B
ผ่านตะแกรงขนาด 76.10 มม.	100%		100	100	100
ผ่านตะแกรงขนาด 63.5 มม.	90-100%		98.89	95.63	100
ผ่านตะแกรงขนาด 37.5 มม.	25-60%		52.39	54.35	77.98
ผ่านตะแกรงขนาด 19 มม.	0-10%		4.69	4.85	33.25
ผ่านตะแกรงขนาด 12.7 มม.	0-5%		1.32	1.92	27.03
ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มม.	1.0%		0.23	0.20	2.24

หมายเหตุ : T คือ Top Ballast, M คือ Middle Ballast, B คือ Bottom Ballast

4.8 วิเคราะห์การปนเปื้อน

การคำนวณหาค่าความปนเปื้อนของหินโรยทางรถไฟดังตารางที่ 4-27 โดยใช้ 6 สมการคือ Fouling-index (F_I ,FI_p, FI_D), เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC), ดัชนีการปนเปื้อนในช่องว่าง (VCI), อัตราส่วนความสัมพันธ์การปนเปื้อนของหินโรยทาง (R_{b-f})

การวิเคราะห์ระดับการปนเปื้อนของหินโรยทางรถไฟดังตารางที่ 4-28 จาก 6 สมการคือ Fouling-index (F_I ,FI_p, FI_D), เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC), ดัชนีการปนเปื้อนในช่องว่าง (VCI), อัตราส่วนความสัมพันธ์การปนเปื้อนของหินโรยทาง (R_{b-f}) พบว่าสมการของ PVC และ VCI นั้นบ่งบอกถึงระดับการปนเปื้อนในไปในทิศทางที่สะอาดซึ่งแตกต่างจากสมการอื่นๆจึงสรุปได้ว่าสมการของ PVC และ VCI นั้นไม่สามารถให้ระดับการปนเปื้อนที่ละเอียดพอดังนั้นในการวิเคราะห์ระดับการปนเปื้อนควรพิจารณาที่สมการของ Fouling index (F_I ,FI_p, FI_D) และอัตราส่วนความสัมพันธ์การปนเปื้อนของหินโรยทาง (R_{b-f})

ตารางที่ 4-27 ค่าการปนเปื้อนของหินโรยทางจาก 6 สมการการปนเปื้อน

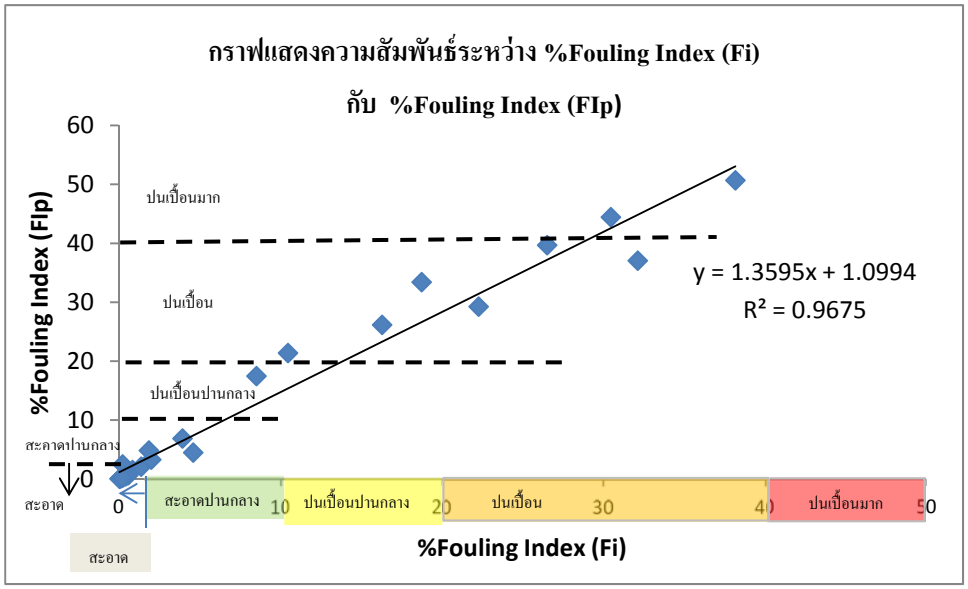
Station	ตำแหน่ง	%Fouling Index			อัตราส่วนความสัมพันธ์การปนเปื้อนของหินโรยทาง (R_{b-f})		%การปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC)		ดัชนีการปนเปื้อนในช่องว่าง (VCI)	
		F_i	FI_P	FI_D	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
72	Crib	0.17	0.18	2.00	0.20	0.20	0.10	0.10	0.08	0.08
	Shoulder	0.08	0.11	1.67	0.31	0.31	0.11	0.12	0.08	0.09
	Top ballast	0.86	1.55	2.27	0.93	0.93	0.35	0.51	0.26	0.38
	Middle ballast	1.4	2.12	2.28	1.76	1.76	0.66	0.96	0.49	0.71
	Bottom ballast	22.31	29.27	94	33.49	33.49	9.07	12.73	6.72	9.43

หมายเหตุ : (1) คือ จากการทดสอบ Field density ชุดที่ 1, (2) คือ จากการทดสอบ Field density ชุดที่ 2

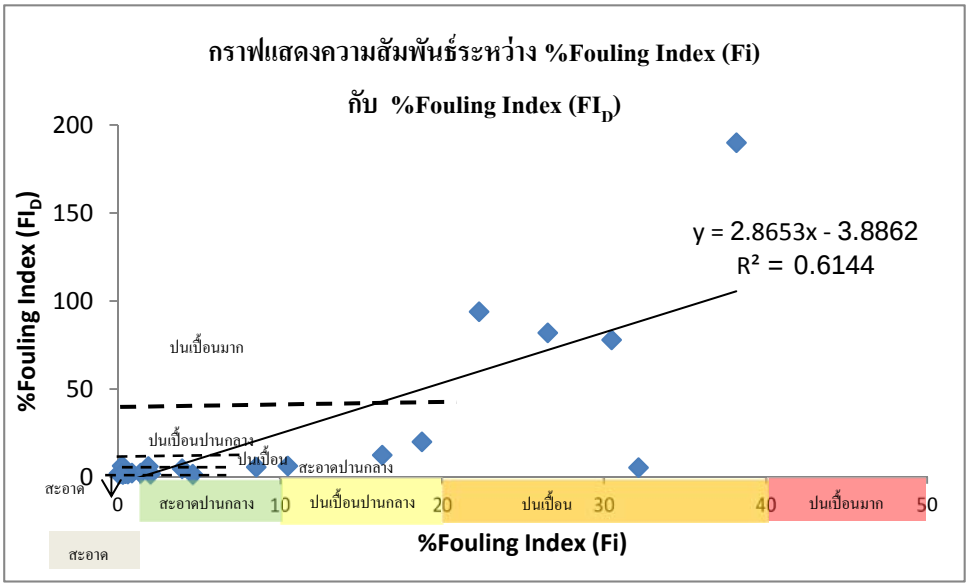
ตารางที่ 4-28 ระดับการปนเปื้อนของหินโรยทาง

Station	ตำแหน่ง	% Fouling Index			อัตราส่วนความสัมพันธ์การปนเปื้อนของหินโรยทาง (R_{b-f})	%การปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC)	ดัชนีการปนเปื้อนในช่องว่าง (VCI)
		F_i	FI_P	FI_D	(1), (2)	(1), (2)	(1), (2)
72	Crib	สะอาด	สะอาด	สะอาด	สะอาด	สะอาด	การระบายน้ำยอมรับได้
	Shoulder	สะอาด	สะอาด	สะอาด	สะอาด	สะอาด	การระบายน้ำยอมรับได้
	Top ballast	สะอาด	สะอาด	สะอาดปานกลาง	สะอาด	สะอาด	การระบายน้ำยอมรับได้
	Middle ballast	สะอาด	สะอาดปานกลาง	สะอาดปานกลาง	สะอาด	สะอาด	การระบายน้ำยอมรับได้
	Bottom ballast	ปนเปื้อน	ปนเปื้อน	ปนเปื้อน	ปนเปื้อน	สะอาด	การระบายน้ำยอมรับได้

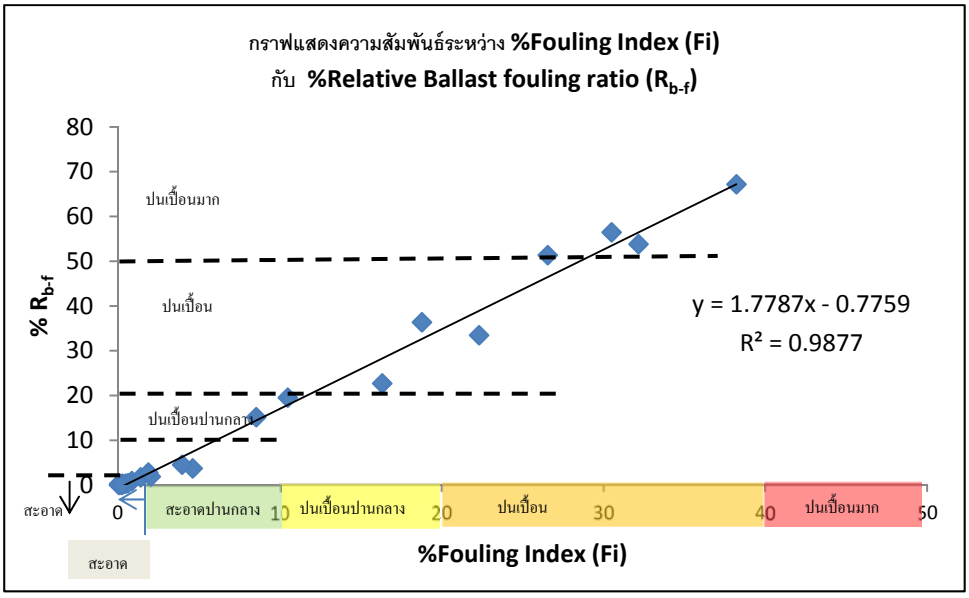
จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปนเปื้อนของสมการ Fouling Index (F_i) กับสมการการปนเปื้อนอีก 5 สมการดังรูปที่ 4-9, 4-10, 4-11, 4-12, และ 4-13 ในการวิเคราะห์นั้นเราใช้เส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงพบว่าเมื่อพิจารณาค่าการปนเปื้อนของสมการอื่นเทียบกับค่าการปนเปื้อนของสมการ Fouling Index (F_i) นั้นเส้นแนวโน้มของชุดข้อมูลซึ่งมีความชัดมากนั้นจะอยู่ในระดับการปนเปื้อนที่น้อยกว่าเส้นแนวโน้มที่มีความชันมากโดยในที่นี้ค่าการปนเปื้อนจากสมการ Fouling Index (F_D) มีความปนเปื้อนน้อยสุดเมื่อเทียบกับระดับการปนเปื้อนของสมการ Fouling Index (F_i) ส่วนค่าการปนเปื้อนของสมการดัชนีการปนเปื้อนในช่องว่าง (VCI) นั้นมีความปนเปื้อนมากสุดเมื่อเทียบกับระดับการปนเปื้อนของสมการ Fouling Index (F_i)



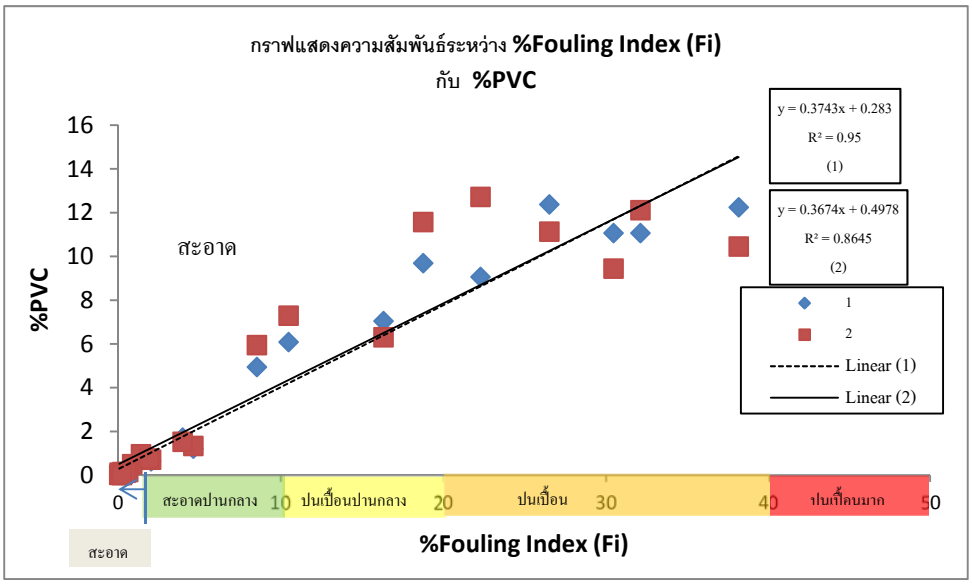
รูปที่ 4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Fouling Index (F_i) กับ %Fouling Index (FI_p)



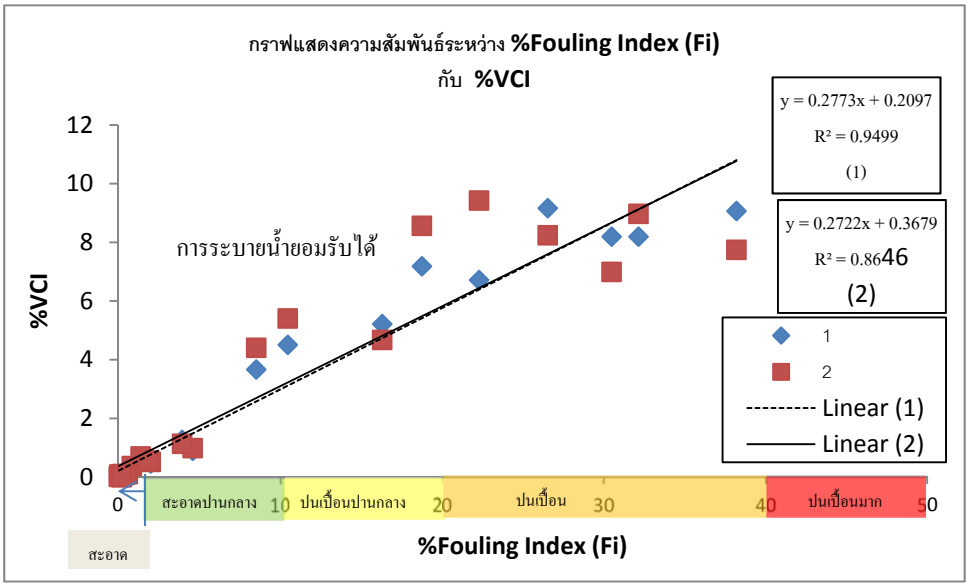
รูปที่ 4-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Fouling Index (F_i) กับ %Fouling Index (FI_D)



รูปที่ 4-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Fouling Index (F_i) กับ %Relative Ballast fouling ratio (R_{b-f})



รูปที่ 4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Fouling Index (F_i) กับ %PVC



รูปที่ 4-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Fouling Index (F_i) กับ %VCI

หมายเหตุ : (1) คือ จากการทดสอบ Field density ชุดที่ 1, (2) คือ จากการทดสอบ Field density ชุดที่ 2

บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลบริเวณชลบุรี

การทดลองจะเริ่มจากการแยกขนาดหาเม็ดหินออกเป็น 3 ส่วนโดยใช้การทดลอง sieve analysis ซึ่งแต่ละส่วนจะมีดังนี้

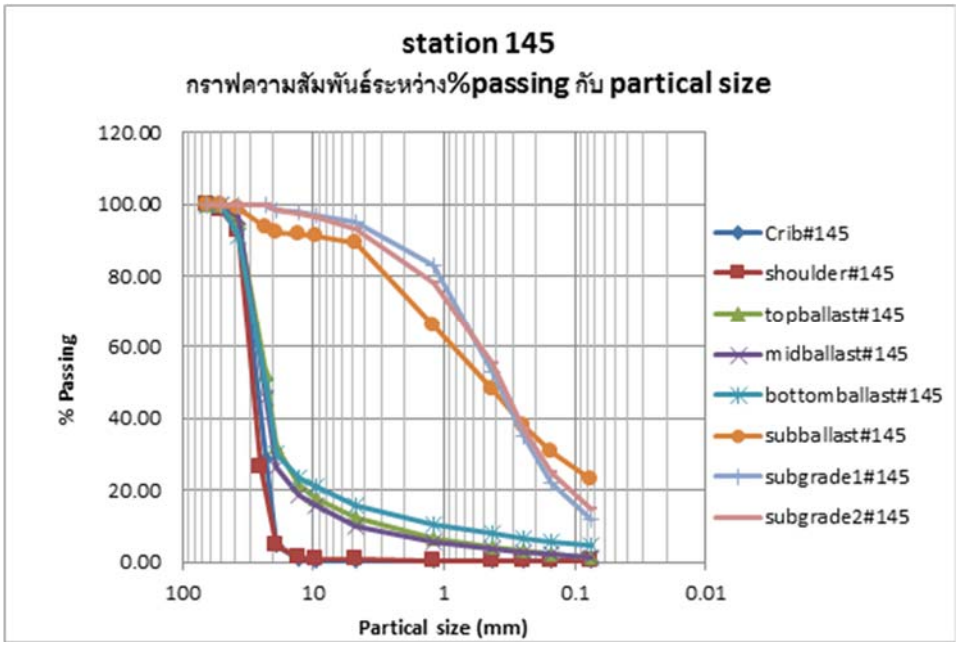
1. Coarse Aggregate (ผ่านตะแกรงขนาด $2\frac{1}{2}$ ” – ค้างตะแกรงเบอร์ $\frac{3}{8}$ ”)
2. Coarse fouling (ผ่านตะแกรงขนาด $\frac{3}{8}$ ” – ค้างตะแกรงเบอร์ 200) จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนหยาบและส่วนละเอียดตามขนาดตะแกรง ดังนี้
   - Coarse fouling ส่วนหยาบ (ผ่านตะแกรงขนาด 3/8 ”- ค้างตะแกรงเบอร์ 4)
   - Coarse fouling ส่วนละเอียด (ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 – ค้างตะแกรงเบอร์ 200)
3. Fine fouling (เล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200)

5.1 ผลการทดสอบ sieve analysis (ASTM D422, D1140, D6913)

สามารถดูผลการทดลอง sieve analysis ได้จากตารางที่ 5-1 และรูปที่ 5-1 ซึ่งจากการทดสอบสามารถคำนวณค่า C_u , C_c และ D_{50} จากตารางที่ 5-2 วิเคราะห์ได้ว่า ที่ชั้น Bottom Ballast มีค่า C_u มากที่สุดซึ่งบ่งบอกถึงกระจายตัวของเม็ดหินมาก และ ค่า C_u ที่น้อยที่สุดจะอยู่ที่ตำแหน่ง Crib ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวของเม็ดหินน้อย และที่ตำแหน่ง Shoulder จะมีขนาดตัวแทนของเม็ดหินเฉลี่ยใหญ่ที่สุด และขนาดตัวแทนของเม็ดหินเฉลี่ยเล็กที่สุดคือ Subgrade 1 และ Subgrade 2 ซึ่งจากการทดลองสามารถแบ่งผล sieve analysis ได้เป็น 3 ส่วน ซึ่งดูปริมาณของเม็ดดินได้จากตารางที่ 5-3

ตารางที่ 5-1 ผลการทดสอบ sieve analysis ของ Station 145

Sieve#	Sieve size (mm)	%passing							
		Crib	Shoulder	Top ballast	Middle ballast	Bottom ballast	Sub-ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
2-1/2"	63.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2"	50	100.0	98.2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1-1/2 "	37.5	94.3	92.4	95.2	96.6	91.1	98.6	100.0	100.0
1"	25	28.9	26.5	52.5	45.7	49.1	93.7	100.0	100.0
3/4 "	19	4.8	4.5	32.1	26.3	30.4	92.3	98.6	98.6
1/2 "	12.7	0.6	1.2	21.6	18.8	23.4	91.5	97.7	97.4
3/8 "	9.5	0.4	0.8	17.6	15.6	20.9	91.1	97.0	96.3
No. 4	4.75	0.4	0.6	12.1	10.1	15.9	89.4	94.9	93.2
No. 16	1.19	0.4	0.5	6.5	5.8	10.3	65.9	82.7	78.1
No. 40	0.425	0.4	0.5	4.4	3.9	7.8	48.2	53.1	55.5
No. 60	0.25	0.4	0.5	3.3	2.7	6.7	38.1	35.1	37.0
No.100	0.15	0.4	0.4	2.3	2.1	5.7	30.8	22.0	24.8
No.200	0.075	0.3	0.4	1.3	1.2	4.4	22.8	11.8	14.9



รูปที่ 5-1 การเปรียบเทียบผล sieve analysis ของ Station 145

ตารางที่ 5-2 ค่า coefficient of uniformity และ coefficient of curvature ของ Station 145

ตำแหน่ง	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	C_c	C_u
Crib	20.0	25.0	29.0	30.0	1.0	1.5
Shoulder	20.0	26.0	30.0	31.0	1.1	1.6
Top ballast	3.0	20.0	25.0	28.0	4.8	9.3
Middle ballast	4.0	20.0	25.0	28.0	3.6	7.0
Bottom ballast	1.2	20.0	25.0	28.0	11.9	23.3
Sub-ballast	NA.	0.1	0.4	0.9	NA.	NA.
Subgrade 1	NA.	0.2	0.3	0.5	NA.	NA.
Subgrade 2	NA.	0.2	0.3	0.5	NA.	NA.

ตารางที่ 5-3 เปอร์เซ็นต์ชนิดของตัวอย่างแบ่งตามขนาดของอนุภาคของ Station 145

ชนิดของอนุภาค	Crib	Shoulder	Top ballast	Middle ballast	Bottom ballast	Sub-ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
(%) Coarse Aggregate	99.60	99.21	82.40	84.37	79.06	8.90	2.98	3.66
(%) Coarse fouling	0.30	0.74	16.60	14.60	17.01	68.45	85.73	82.17
(%)Fine fouling	0.10	0.05	1.00	1.03	3.93	22.65	11.29	14.17

5.2 Coarse Aggregate

คือ ขนาดของเม็ดหินที่ผ่านตะแกรงขนาด $2\frac{1}{2}$ ” (63.5 mm.) และค้างตะแกรงขนาด $\frac{3}{8}$ ” (9.5 mm.) จะแบ่งออกออกเป็นการทดสอบย่อยดังนี้

A. ผลการทดสอบ Rock type และ Flat & elongated particle (ASTM D4791)

จากการทดสอบ Flat & Elongation ดูได้จากตารางที่ 5-4 พบว่าตำแหน่ง Sub-ballast มีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนามากกว่า 3 เท่ามากที่สุด

จากการทดสอบหาปริมาณชนิดของหินเทียบกับจำนวนก้อนซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 5-4 พบว่าหินทั้งหมดมีสามชนิด คือ หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์ โดยพบว่ามีหินแกรนิตมากที่สุดและชนิดที่น้อยสุดคือหินปูน โดยตำแหน่ง Crib, Ballast และ Sub-ballast จะพบเฉพาะหินทั้งสามชนิด ส่วน Subgrade 1 และ Subgrade 2 จะพบเฉพาะหินแกรนิต และตำแหน่ง Shoulder จะพบหินแกรนิตและหินปูน

ตารางที่ 5-4 ผลการทดสอบ Flat & Elongation และชนิดของหินของ Station 145

Station	ตำแหน่ง	% ต่อน้ำหนักของหิน		% ต่อจำนวนของเม็ดหิน		
		%Flat	%Elongation	Granite	Limestone	Basalt
145	Crib	0.40	0.00	92.47	1.08	3.23
	Shoulder	0.34	0.00	97.25	2.75	0.00
	Ballast	0.37	0.00	95.10	1.96	2.94
	Sub-ballast	2.93	0.00	92.86	0.47	6.67
	Subgrade 1	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00
	Subgrade 2	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00

B. ผลการทดสอบ Specific gravity และ Absorption (ASTM C127)

ผลการทดสอบ Specific gravity สามารถดูได้จากตารางที่ 5-5 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของส่วนที่เป็น coarse aggregate จะอยู่ที่ 2.73 ถึง 2.76 และค่าความถ่วงจำเพาะทุกตำแหน่งมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ที่ตำแหน่ง Subgrade 1 และ Subgrade 2 มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

ผลการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ Water Absorption สามารถดูได้จากตารางที่ 5-5 พบว่าแต่ละตำแหน่งจะมีค่าระหว่าง 0.36-0.75 และในทุกๆตำแหน่งจะมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนที่ตำแหน่ง Subgrade 1 และ Subgrade 2 มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

ตารางที่ 5-5 ผลการทดสอบ Specific gravity และ Water Absorption ของ Coarse Aggregate ของ Station 145

Station 145	ตำแหน่ง					
	crib	shoulder	ballast	sub-ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
SG	2.76	2.76	2.76	2.73	NA.	NA.
(%)Absorption	0.37	0.36	0.41	0.75	NA.	NA.

C. ผลการทดสอบ Los Angeles Values (ASTM C131, ASTM C535)

จากการทดสอบ Los Angeles Values สามารถดูได้จากตารางที่ 5-6 พบว่าค่าการขัดสีของตำแหน่งที่เป็น Shoulder เป็นตำแหน่งที่ทนต่อการขัดสีได้น้อยที่สุดแล้วส่วนที่ทนต่อการขัดสีมากที่สุดคือ Crib ส่วนตำแหน่ง Sub-ballast, Subgrade 1 และ Subgrade 2 มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

ตารางที่ 5-6 ผลการทดสอบ Los Angeles Values ของ Station 145

ตำแหน่ง	ค่าการขัดสี (%)
Crib	24.43
Shoulder	20.01
Ballast	22.04
Sub-ballast	NA.
Subgrade 1	NA.
Subgrade 2	NA.

D. ผลการทดสอบ Aggregate Impact value (AIV) (BS 812 Part 112:1990) และ การทดสอบ Aggregate Compression Value (ACV) (BS 812 Part 110:1990)

จากการทดลอง AIV พบว่าส่วน Ballast และ Crib ทนต่อแรงกระแทกได้ 4.51% และ 4.13% ตามลำดับ โดยที่ตำแหน่ง Shoulder, Sub-ballast, Subgrade 1 และ Subgrade 2 มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ และการทดสอบ ACV ไม่สามารถทำการทดลองได้ เนื่องจากมีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

หมายเหตุ : ใช้ตัวอย่างการทดลองที่ผ่านตะแกรงขนาด $\frac{3}{4}$ ” และค้างตะแกรงขนาด $\frac{3}{8}$ ”

E. ผลการทดสอบ Sulfate Soundness (ASTM C88-99a)

จากการการทดสอบ Sulfate Soundness สามารถดูได้จากตารางที่ 5-7 พบว่าส่วนที่เป็น Coarse Aggregate ตำแหน่งที่ทนต่อการกัดกร่อนของ Sulfate ได้มากที่สุดคือ Shoulder และส่วนที่ทนได้น้อยสุดคือ Ballast ส่วนตำแหน่ง Sub-ballast, Subgrade 1 และ Subgrade 2 มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

ตารางที่ 5-7 ผลการทดสอบ Sulfate Soundness ของ Coarse Aggregate ของ Station 145

ส่วน	ตำแหน่ง					
Coarse Aggregate	Crib	Shoulder	Ballast	Sub-Ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
(%) Soundness	1.14	0.94	1.85	NA.	NA.	NA.

5.3 Coarse fouling (ผ่านตะแกรงขนาด $\frac{3}{8}$ ” – ค้างตะแกรงเบอร์ 200)

A. ผลการทดสอบ Visual inspection

- **Crib และ Shoulder** จะมีส่วนที่เป็น coarse fouling น้อยมาก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเพียงฝุ่นของหินที่ถูกบดทับ
- **Ballast** จะพบเศษหินที่ตะแกรงเบอร์4 ถึง เบอร์ 16 เป็นหินที่แตกแล้วเม็ดเล็กลง ส่วนที่เป็นส่วนที่ละเอียดจะเป็นฝุ่นสีเทาที่เป็นฝุ่นของหินที่ถูกบดทับจนละเอียดมีสีเทาและมีเศษใบไม้ผสมอยู่ด้วย

- **Sub-ballast** จะพบเศษหินที่ตะแกรงเบอร์ 4 ถึง เบอร์ 16 เป็นหินแกรนิตและมีหินปูนและหินบะซอลต์ผสมอยู่เล็กน้อย ส่วนที่เป็นส่วนละเอียดจะเป็นฝุ่นหินสีส้มๆ
- **Subgrade 1** ส่วนใหญ่จะเป็นหินแกรนิตและมีหินปูนและหินบะซอลต์ที่ตะแกรงเบอร์ 4,เบอร์ 16 จะเป็นหินที่อยู่ชั้นบนแตกล่วงลงมา ส่วนที่เป็นส่วนละเอียดจะเป็นดินเดิมสีน้ำตาล จะเป็นหินที่อยู่ชั้นบนแตกล่วงลงมา ส่วนที่เป็นส่วนละเอียดจะเป็นดินเดิมสีน้ำตาล และยังพบหินที่ไม่ทราบชนิดที่ตะแกรงเบอร์ 4 (จะแสดงในภาคผนวก)
- **Subgrade 2** ส่วนใหญ่ที่เป็นเม็ดหินที่เบอร์ 4 จะมีน้อย ส่วนที่เบอร์ 16 จะมีปริมาณที่มากและจะเป็นหินที่เป็นหินเดิมที่มีอยู่แล้ว ส่วนที่เป็นส่วนละเอียดจะดินเดิมมีสีน้ำตาลซึ่งมีสีอ่อนกว่า Subgrade1 และยังพบหินที่ไม่ทราบชนิดที่ตะแกรงเบอร์ 4 (จะแสดงในภาคผนวก)

รูปที่ 5-2 Visual inspection ของ Ballast Station 145

รูปที่ 5-3 Visual inspection ของ Sub-ballast Station 145

รูปที่ 5-4 Visual inspection ของ Subgrade 1 Station 145

รูปที่ 5-5 Visual inspection ของ Subgrade 2 Station 145

B. ผลการทดสอบ Specific gravity และ Absorption (ASTM C127, ASTM D854)

จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นส่วนหยาบ (ค้างตะแกรงเบอร์ 4) และส่วนที่เป็นส่วนละเอียด (ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ถึง ค้างตะแกรงเบอร์ 200)

ผลการทดสอบ Specific gravity (ผ่านตะแกรงขนาด 3/8" - ค้างตะแกรงเบอร์ 4) สามารถดูได้จากตารางที่ 5-8 พบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของส่วนหยาบของส่วนที่เป็น coarse fouling จะอยู่ที่ 2.73

ผลการทดสอบหาค่า Water Absorption (ผ่านตะแกรงขนาด 3/8" – ค้างตะแกรงเบอร์ 4) สามารถดูได้จากตารางที่ 5-8 พบว่าการทดสอบได้จะมีค่า 0.50% โดยทำการทดลองที่ Ballast เพียงอย่างเดียว เนื่องจากที่ตำแหน่งอื่นๆมีตัวอย่างไม่เพียงพอ

ผลการทดสอบ Specific gravity (ผ่านตะแกรงขนาด 4 - ค้างตะแกรงเบอร์ 200) สามารถดูได้จากตารางที่ 5-9 พบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของส่วนละเอียดของส่วนที่เป็น coarse fouling มีส่วนที่สามารถทำการทดลองได้คือ Ballast เพียงอย่างเดียว ส่วนตัวอื่นๆนั้นตัวอย่างไม่พอทำการทดลอง

ตารางที่ 5-8 ผลการทดสอบ Specific gravity และค่า Absorption ส่วนที่เป็น Coarse Fouling (ผ่านตะแกรงขนาด $\frac{3}{8}$" ค้างตะแกรงเบอร์ 4) ของ Station 145

Station 145	ตำแหน่ง					
	crib	shoulder	ballast	sub-ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
SG	NA.	NA.	2.79	NA.	NA.	NA.
(%) Absorption	NA.	NA.	1.69	NA.	NA.	NA.

หมายเหตุ : ตำแหน่ง Crib, Shoulder, Subgrade1, และ Subgrade2 มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

ตารางที่ 5-9 ผลการทดสอบ Specific gravity ส่วนทีเป็น Coarse Fouling (ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ค้างตะแกรงเบอร์ 200) ของ Station 145

Station 145	ตำแหน่ง					
	crib	shoulder	ballast	sub-ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
SG	NA.	NA.	2.64	2.59	2.57	2.56

หมายเหตุ : ตำแหน่ง Crib และ Shoulder มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

C. ผลการทดสอบ Organic Impurities (ASTM C40)

สามารถดูได้จากตารางที่ 5-10 พบว่าตำแหน่ง Ballast มีการเจือปนของสารอินทรีย์ในปริมาณมากโดยที่ตำแหน่ง Crib กับ Shoulder มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

ตารางที่ 5-10 ผลการทดสอบ Organic Impurities ของ Coarse fouling ของ Station 145

ตำแหน่ง	Crib	Shoulder	Ballast	Sub-ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
เบอร์สี	NA.	NA.	5	1	1	2

หมายเหตุ เบอร์สีมากกว่าเบอร์ 3 มีการเจือปนของสารอินทรีย์มาก

D. ผลการทดสอบ Sulfate Soundness (ASTM C88-99a)

การทดสอบ Sulfate Soundness สามารถดูได้จากตารางที่ 5-11 พบว่า ส่วนที่ทนต่อการกัดกร่อนของ Sulfate ได้มากที่สุดคือ Ballast และตำแหน่งที่ทนได้น้อยที่สุดคือ Subgrade 2 ส่วน Crib, Shoulder มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

ตารางที่ 5-11 ผลการทดสอบ Sulfate Soundness ของ Coarse fouling ของ Station 145

ส่วน Coarse Fouling	ตำแหน่ง					
	Crib	Shoulder	Ballast	Sub-Ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
(%) Soundness	NA.	NA.	2.60	2.74	3.05	4.71

5.4 Fine fouling (เล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200)

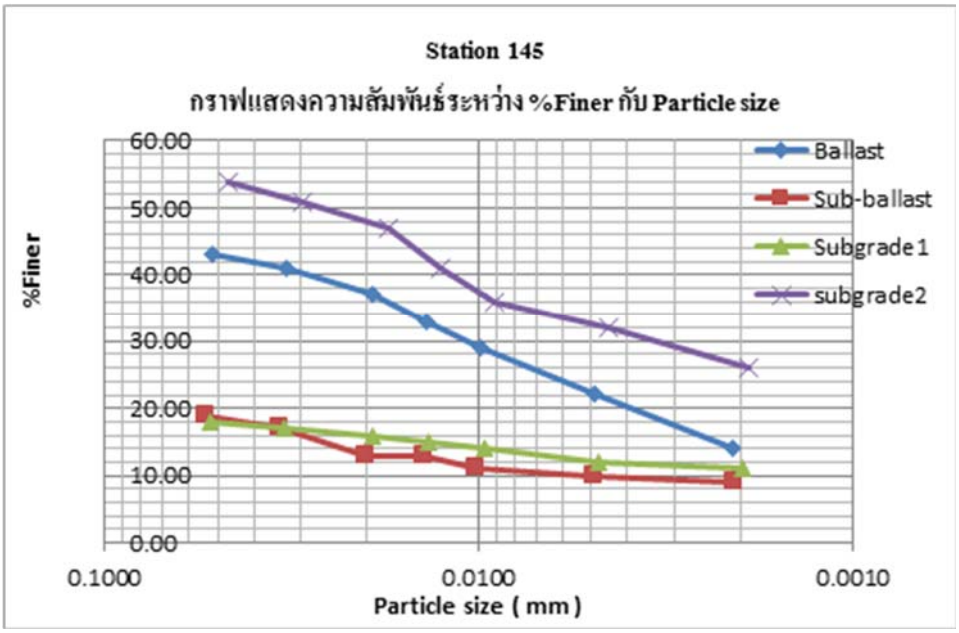
A. ผลการทดสอบ Hydrometer (ASTM D422)

จากการทดสอบ Hydrometer สามารถดูได้จากตารางที่ 5-12 และรูปที่ 5-6 สามารถวิเคราะห์ Clay faction ได้ดังนี้

- Ballast Clay faction มีค่าเท่ากับ 14%
- Sub-ballast Clay faction มีค่าเท่ากับ 9%
- Subgrade1 Clay faction มีค่าเท่ากับ 11%
- Subgrade2 Clay faction มีค่าเท่ากับ 26%

ตารางที่ 5-12 ผลการทดสอบ Hydrometer ของ Station 145

ตำแหน่ง							
Ballast		Sub-Ballast		Subgrade 1		Subgrade 2	
%Finer	D (mm)	%Finer	D (mm)	%Finer	D (mm)	%Finer	D (mm)
43.07	0.0516	18.94	0.0535	18.00	0.0521	53.90	0.0466
41.07	0.0328	16.95	0.0340	17.00	0.0331	50.91	0.0298
37.06	0.0192	12.96	0.0199	16.00	0.0191	46.92	0.0174
33.05	0.0138	12.96	0.0140	15.00	0.0137	40.93	0.0127
29.05	0.0098	10.97	0.0101	14.00	0.0096	35.94	0.0090
22.04	0.0049	9.97	0.0049	12.00	0.0048	31.94	0.0045
14.02	0.0021	8.97	0.0021	11.00	0.0020	25.95	0.0019



รูปที่ 5-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Finer กับขนาดของเม็ดดินของ Station 145

B. ผลการทดสอบ Specific gravity (ASTM D854)

จากการทดสอบ Specific gravity พบว่า ตำแหน่ง Crib และ Shoulder มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ และตำแหน่งที่ทำการทดสอบได้จะแสดงผลดัง ตารางที่ 5-13 ซึ่งจะมีค่าระหว่าง 2.56 ถึง 2.61 ซึ่งที่ตำแหน่ง Sub-ballast มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงที่สุด และน้อยที่สุดคือ Subgrade 2

ตารางที่ 5-13 ผลการทดสอบ Specific gravity ของ Fine fouling ของ Station 145

Station 145	ตำแหน่ง					
	crib	shoulder	ballast	sub-ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
SG	NA.	NA.	2.64	2.65	2.64	2.65

C. ผลการทดสอบ Atterberg limit (ASTM D4318)

จากการทดสอบ Atterberg limit พบว่า ตำแหน่ง Crib และ Shoulder มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ และตำแหน่งที่ทำการทดสอบได้จะแสดงผลดัง ตารางที่ 5-14

ตารางที่ 5-14 ผลการทดสอบ Atterberg limit ของ Station 145

ตำแหน่ง	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Shrinkage limit (%)	Plasticity index (%)
Ballast	51.0	22.4	9.1	28.6
Sub-ballast	27.0	16.7	8.0	10.3
Subgrade 1	36.0	19.7	9.4	16.3
Subgrade 2	35.0	21.2	11.0	13.8

D. ผลการทดสอบ Organic Impurities (ASTM C40)

จากการทดสอบแสดงที่ตาราง 5-15 พบส่วนที่เป็น Ballast มีการเจือปนของสารอินทรีย์ในปริมาณมาก โดยที่ตำแหน่ง Crib และ Shoulder มีตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ

ตารางที่ 5-15 ผลการทดสอบ Organic Impurities ของ Fine fouling ของ Station 145

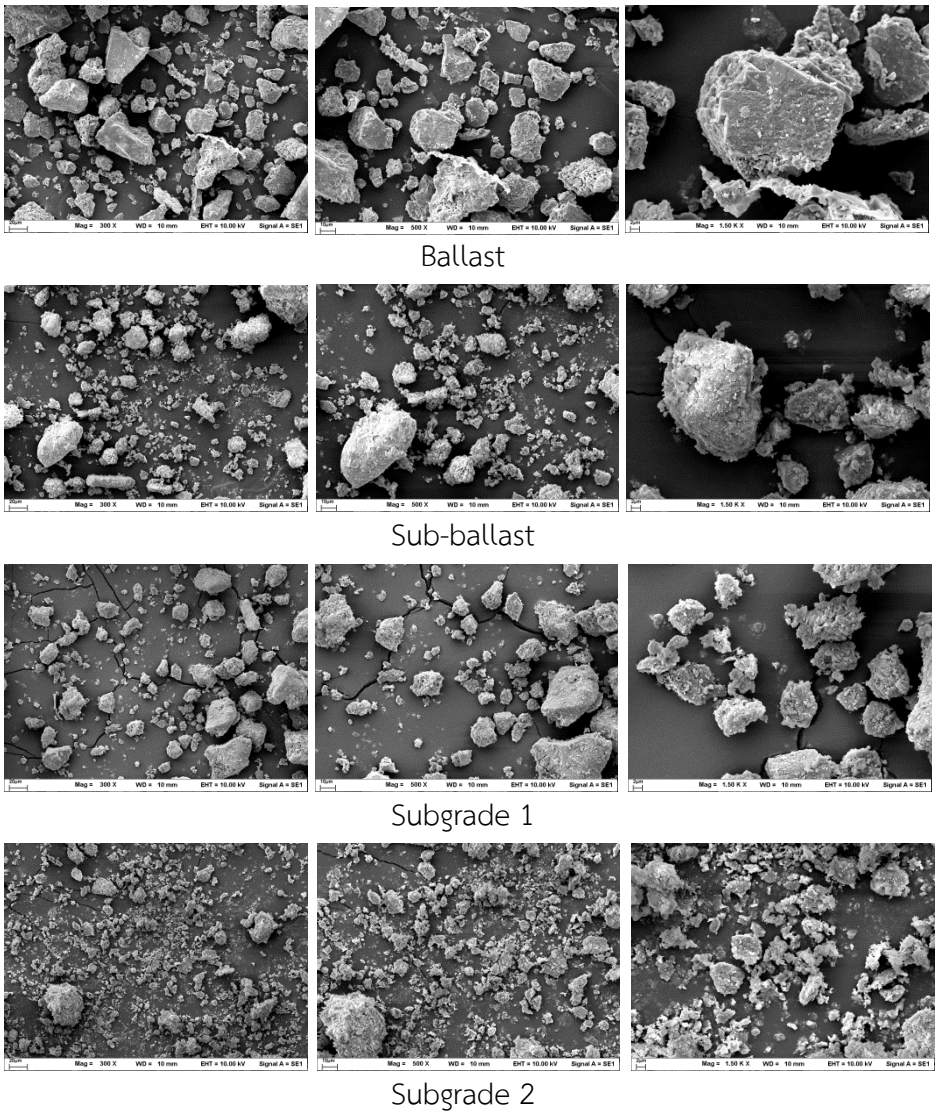
ตำแหน่ง	Crib	Shoulder	Ballast	Sub-ballast	Subgrade 1	Subgrade 2
เบอร์สี	Na.	Na.	5	1	3	3

หมายเหตุ : เบอร์สีมากกว่าเบอร์ 3 มีการเจือปนของ Organic มาก

E. ผลการทดสอบ Scanning Electron Microscopy (SEM)

ผลการทดสอบ SEM ขนาดขยาย 300,500 และ 1500 เท่าตามลำดับ จากรูปที่ 5-7 พบว่าขนาดของอนุภาคที่กำลังขยาย 1500 เท่า Ballast และ Sub-ballast มีขนาดที่ใหญ่กว่าตำแหน่งอื่นอย่างเห็นได้ชัดและ

ที่กำลังขยาย 300, 500 เห็นได้ชัดว่า Ballast ,Sub-ballast และ Subgrade 1 มีขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กปนอยู่เล็กน้อยส่วน Subgrade 2 นั้นส่วนใหญ่เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก



รูปที่ 5-7 ผลการทดสอบ SEM ขนาดขยาย 300, 500 และ 1500 เท่าของ Station 145

5.5 การทดสอบหาความหนาแน่นของดินในสนาม

การทดสอบหาความหนาแน่นของดินในสนามโดยใช้วิธี Sand cone ซึ่งได้ทำการทดสอบ 2 ชุดการทดลองในแต่ละตำแหน่งดังตารางที่ 5-16 โดยพบว่าตำแหน่งที่มีความหนาแน่นมากที่สุดคือ Crib และตำแหน่งที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุดคือ Ballast

ตารางที่ 5-16 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของดินในสนาม

Station	Dry density (kN/m^3)					
	Crib		Shoulder		Ballast	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
145	20.58	20.56	13.37	20.81	16.38	10.38

หมายเหตุ : (1) คือ จากการทดสอบ Sand cone ชุดที่ 1, (2) คือ จากการทดสอบ Sand cone ชุดที่ 2

5.6 การทดสอบหาความชื้นของดิน

การทดสอบหาความชื้นของดินดังแสดงในตารางที่ 5-17 โดยวิธีอบในเตาอบควบคุมอุณหภูมิ 110±5°C

ตารางที่ 5-17 ผลการทดสอบหาค่า Water content

Station	(%) Water content					
	Crib		Shoulder		Ballast	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
145	0.10	0.08	0.19	0.15	0.15	0.16

หมายเหตุ : (1) คือ จากการทดสอบ Sand cone ชุดที่ 1, (2) คือ จากการทดสอบ Sand cone ชุดที่ 2

5.7 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐาน

5.7.1 เปรียบเทียบกับมาตรฐานของหินโรยทางรถไฟในประเทศออสเตรเลียหน่วยงาน Australian Rail Track Corporation (ARTC)

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Crib เปรียบเทียบกับมาตรฐานของหน่วยงาน Australian Rail Track Corporation (ARTC) ในประเทศออสเตรเลียแสดงดังตารางที่ 5-18 พบว่า

- การทดสอบ Flat & Elongation มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Los Angeles Value มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Aggregate Crushing Value มีตัวอย่างไม่เพียงพอสำหรับการทดสอบ
- การทดสอบ Sieve analysis ไม่ตรงตามมาตรฐานเพราะมีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของหินผ่านตะแกรงขนาด 37.5 มม. มากกว่า 65% และมีน้ำหนักของหินผ่านตะแกรงขนาด 26.5 มม. มากกว่า 20%

ตารางที่ 5-18 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Crib กับมาตรฐานของหน่วยงาน Australian Rail Track Corporation (ARTC) ในประเทศออสเตรเลีย

การทดลอง	รายละเอียด		Station 145
Flat & Elongation	ไม่ควรเกิน 30 %	Flat	0.00
		Elongation	0.00
Los Angeles Value	ไม่ควรเกิน 25 %		24
Aggregate Crushing Value	ไม่ควรเกิน 25 %		NA.
Sieve analysis			
ผ่านตะแกรงขนาด 63 มม.	100%		100.0
ผ่านตะแกรงขนาด 53 มม.	85-100%		100.0
ผ่านตะแกรงขนาด 37.5 มม.	20-65%		94.3
ผ่านตะแกรงขนาด 26.5 มม.	0-20%		28.9
ผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มม.	0-5%		4.8
ผ่านตะแกรงขนาด 13.2 มม.	0-2%		0.6
ผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม.	0-1%		0.4
ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มม.	0-1%		0.3

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Shoulder เปรียบเทียบกับมาตรฐานของหน่วยงาน Australian Rail Track Corporation (ARTC) ในประเทศออสเตรเลียแสดงดังตารางที่ 5-19 พบว่า

- การทดสอบ Flat & Elongation มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Los Angeles Value มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Aggregate Crushing Value มีตัวอย่างไม่เพียงพอสำหรับการทดสอบ
- การทดสอบ Sieve analysis ทุก Station ไม่ตรงตามมาตรฐานเพราะมีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของหินผ่านตะแกรงขนาด 37.5 มม. มากกว่า 65% และมีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของหินผ่านตะแกรงขนาด 26.5 มม. มากกว่า 20%

ตารางที่ 5-19 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Shoulder กับมาตรฐานของหน่วยงาน Australian Rail Track Corporation (ARTC) ในประเทศออสเตรเลีย

การทดลอง	รายละเอียด		Station 145
Flat & Elongation	ไม่ควรเกิน 30 %	Flat	0.00
		Elongation	0.00
Los Angeles Value	ไม่ควรเกิน 25 %		20
Aggregate Crushing Value	ไม่ควรเกิน 25 %		NA.
Sieve analysis			
ผ่านตะแกรงขนาด 63 มม.	100%		100.0
ผ่านตะแกรงขนาด 53 มม.	85-100%		98.2
ผ่านตะแกรงขนาด 37.5 มม.	20-65%		92.4
ผ่านตะแกรงขนาด 26.5 มม.	0-20%		26.5
ผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มม.	0-5%		4.5
ผ่านตะแกรงขนาด 13.2 มม.	0-2%		1.2
ผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม.	0-1%		0.6
ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มม.	0-1%		0.4

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Ballast เปรียบเทียบกับมาตรฐานของหน่วยงาน Australian Rail Track Corporation (ARTC) ในประเทศออสเตรเลียแสดงดังตารางที่ 5-20 พบว่า

- การทดสอบ Flat & Elongation มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Los Angeles Value มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Aggregate Crushing Value มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis มีค่าไม่ตรงตามมาตรฐาน

ตารางที่ 5-20 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Ballast กับมาตรฐานของหน่วยงาน Australian Rail Track Corporation (ARTC) ในประเทศออสเตรเลีย

การทดลอง	รายละเอียด		Station 145		
Flat & Elongation	ไม่ควรเกิน 30 %	Flat	0.31		
		Elongation	0.00		
Los Angeles Value	ไม่ควรเกิน 25 %		22		
Aggregate Crushing Value	ไม่ควรเกิน 25 %		NA.		
Sieve analysis			T	M	B
ผ่านตะแกรงขนาด 63 มม.	100%		100	100	100
ผ่านตะแกรงขนาด 53 มม.	85-100%		100	100	100
ผ่านตะแกรงขนาด 37.5 มม.	20-65%		95.2	96.6	91.1
ผ่านตะแกรงขนาด 26.5 มม.	0-20%		52.5	45.7	49.1
ผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มม.	0-5%		32.1	26.3	30.4
ผ่านตะแกรงขนาด 13.2 มม.	0-2%		21.6	18.8	23.4
ผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม.	0-1%		12.1	10.1	15.9
ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มม.	0-1%		1.3	1.2	4.4

หมายเหตุ : T คือ Top Ballast, M คือ Middle Ballast, B คือ Bottom Ballast

5.7.2 เปรียบเทียบกับ Specification for track ballast ในประเทศอินเดีย

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Crib เปรียบเทียบกับมาตรฐาน Specification for track ballast ในประเทศอินเดียแสดงดังตารางที่ 5-21 พบว่า

- การทดสอบ Aggregate Abrasion Value มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Aggregate Impact Value มีตัวอย่างไม่เพียงพอสำหรับการทดสอบ
- การทดสอบ Water absorption มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis ไม่ตรงตามมาตรฐานเพราะมีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของหินค้างบนตะแกรงขนาด 40 มม. น้อยกว่า 40% และมีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของหินค้างบนตะแกรงขนาด 20 มม. น้อยกว่า 98%

ตารางที่ 5-21 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Crib กับมาตรฐาน Specification for track ballast ในประเทศอินเดีย

การทดลอง	รายละเอียด	Station 145
Aggregate Abrasion Value	ไม่ควรเกิน 30%	24
Aggregate Impact Value	ไม่ควรเกิน 20%	NA.
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1%	0.37
Sieve analysis		
ค้างตะแกรงขนาด 65 มม.	ไม่ควรเกิน 5 %	0.00
ค้างตะแกรงขนาด 40 มม.	40-60 %	5.70
ค้างตะแกรงขนาด 20 มม.	ไม่น้อยกว่า 98 %	95.21

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Shoulder เปรียบเทียบกับมาตรฐาน Specification for track ballast ในประเทศอินเดียแสดงดังตารางที่ 5-22 พบว่า

- การทดสอบ Aggregate Abrasion Value ตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Aggregate Impact Value ไม่มีตัวอย่างเพียงพอสำหรับการทดสอบ
- การทดสอบ Water absorption ตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis ไม่ตรงตามมาตรฐานเพราะมีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของหินค้างบนตะแกรงขนาด 40 มม. น้อยกว่า 40% และมีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของหินค้างบนตะแกรงขนาด 20 มม. น้อยกว่า 98%

ตารางที่ 5-22 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Shoulder กับมาตรฐาน Specification for track ballast ในประเทศอินเดีย

การทดลอง	รายละเอียด	Station 145
Aggregate Abrasion Value	ไม่ควรเกิน 30%	20
Aggregate Impact Value	ไม่ควรเกิน 20 %	NA.
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1%	0.23
Sieve analysis		
ค้างตะแกรงขนาด 65 มม.	ไม่ควรเกิน 5 %	0.00
ค้างตะแกรงขนาด 40 มม.	40-60 %	7.61
ค้างตะแกรงขนาด 20 มม.	ไม่น้อยกว่า 98 %	95.54

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Ballast เปรียบเทียบกับมาตรฐาน Ballast specification for high axle load and high speed ในประเทศญี่ปุ่นแสดงดังตารางที่ 5-23 พบว่า

- การทดสอบ Aggregate Abrasion Value มีค่าตรงตามมาตรฐาน

- การทดสอบ Aggregate Impact Value มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Water absorption มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis ไม่ตรงตามมาตรฐานเพราะมีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของหินค้างบนตะแกรงขนาด 40 มม. น้อยกว่า 40% และมีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของหินค้างบนตะแกรงขนาด 20 มม. น้อยกว่า 98%

ตารางที่ 5-23 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Ballast กับมาตรฐาน Specification for track ballast ในประเทศอินเดีย

การทดลอง	รถไฟฟ้า ความเร็ว (150 KMPH)	Station 145		
Aggregate Abrasion Value	ไม่ควรเกิน 30%	22		
Aggregate Impact Value	ไม่ควรเกิน 20%	4.51		
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1%	0.41		
Sieve analysis		T	M	B
ค้างตะแกรงขนาด 65 มม.	ไม่ควรเกิน 5 %	0.00	0.00	0.00
ค้างตะแกรงขนาด 40 มม.	40-60 %	4.82	3.40	8.95
ค้างตะแกรงขนาด 20 มม.	ไม่น้อยกว่า 98 %	67.90	73.75	69.65

หมายเหตุ : T คือ Top Ballast, M คือ Middle Ballast, B คือ Bottom Ballast

5.7.3 เปรียบเทียบกับมาตรฐานหินโรยทางรถไฟของหน่วยงาน American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) ในประเทศอเมริกา

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Crib เปรียบเทียบกับมาตรฐานของหน่วยงาน American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) ในประเทศอเมริกา แสดงดังตารางที่ 5-24 พบว่า

- การทดสอบ Flat & Elongation มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Specific Gravity มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Water Absorption มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Soundness (Sodium sulfate) มีค่าตรงตามมาตรฐาน

- การทดสอบ Sieve analysis ทุก Station ไม่ตรงตามมาตรฐานเพราะมีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของหินผ่านตะแกรงขนาด 37.5 มม. มากกว่า 65%

ตารางที่ 5-24 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Crib กับมาตรฐานของหน่วยงาน American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) ในประเทศอเมริกา

การทดลอง	รายละเอียด		Station 145
Flat & Elongation	ไม่ควรเกิน 5%	Flat	0.00
		Elongation	0.00
Specific Gravity	ไม่น้อยกว่า 2.60		2.76
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1 %		0.37
Soundness (Sodium sulfate)	ไม่ควรเกิน 5 %		1.14
Sieve analysis			
ผ่านตะแกรงขนาด 76.10 มม.	100%		100.0
ผ่านตะแกรงขนาด 63.5 มม.	90-100%		100.0
ผ่านตะแกรงขนาด 37.5 มม.	25-60%		94.3
ผ่านตะแกรงขนาด 19 มม.	0-10%		4.8
ผ่านตะแกรงขนาด 12.7 มม.	0-5%		0.6
ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มม.	1.0%		0.3

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Shoulder เปรียบเทียบกับมาตรฐานของหน่วยงาน American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) ในประเทศอเมริกา แสดงดังตารางที่ 5-25 พบว่า

- การทดสอบ Flat & Elongation มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Specific Gravity มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Water Absorption มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Soundness (Sodium sulfate) มีค่าตรงตามาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis ทุก Station ไม่ตรงตามมาตรฐานเพราะมีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของหินผ่านตะแกรงขนาด 37.5 มม. มากกว่า 65%

ตารางที่ 5-25 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Shoulder กับมาตรฐานของหน่วยงาน American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) ในประเทศอเมริกา

การทดลอง	รายละเอียด		Station 145
Flat & Elongation	ไม่ควรเกิน 5%	Flat	0.00
		Elongation	0.00
Specific Gravity	ไม่น้อยกว่า 2.60		2.75
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1 %		0.23
Soundness (Sodium sulfate)	ไม่ควรเกิน 5 %		0.94
Sieve analysis			
ผ่านตะแกรงขนาด 76.10 มม.	100%		100.0
ผ่านตะแกรงขนาด 63.5 มม.	90-100%		100.0
ผ่านตะแกรงขนาด 37.5 มม.	25-60%		92.4
ผ่านตะแกรงขนาด 19 มม.	0-10%		4.5
ผ่านตะแกรงขนาด 12.7 มม.	0-5%		1.2
ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มม.	1.0%		0.4

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง Ballast เปรียบเทียบกับมาตรฐานของหน่วยงาน American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) ในประเทศอเมริกา แสดงดังตารางที่ 5-26 พบว่า

- การทดสอบ Flat & Elongation มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Specific Gravity มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Water Absorption มีค่าตรงตามมาตรฐาน
- การทดสอบ Soundness (Sodium sulfate) มีค่าตรงตามาตรฐาน
- การทดสอบ Sieve analysis มีค่าไม่ตรงตามมาตรฐาน

ตารางที่ 5-26 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Ballast กับมาตรฐานของหน่วยงาน American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) ในประเทศอเมริกา

การทดลอง	รายละเอียด		Station 145		
Flat & Elongation	ไม่ควรเกิน 5%	Flat	0.31		
		Elongation	0.00		
Specific Gravity	ไม่น้อยกว่า 2.60		2.76		
Water Absorption	ไม่ควรเกิน 1 %		0.41		
Soundness (Sodium sulfate)	ไม่ควรเกิน 5 %		1.85		
Sieve analysis			T	M	B
ผ่านตะแกรงขนาด 76.10 มม.	100%		100	100	100
ผ่านตะแกรงขนาด 63.5 มม.	90-100%		100	100	100
ผ่านตะแกรงขนาด 37.5 มม.	25-60%		95.2	96.6	91.1
ผ่านตะแกรงขนาด 19 มม.	0-10%		32.1	26.3	30.4
ผ่านตะแกรงขนาด 12.7 มม.	0-5%		21.6	18.8	23.4
ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มม.	1.0%		1.3	1.2	4.4

หมายเหตุ : T คือ Top Ballast, M คือ Middle Ballast, B คือ Bottom Ballast

จากผลการเปรียบเทียบกับมาตรฐานประเทศต่างๆพบว่า ในส่วนของการทดลองการขัดสี , การกัดกร่อน , การดูดซึม , ความถ่วงจำเพาะ และ การทนแรงกระแทก มีอยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐานทั้งหมด แต่ในส่วนของขนาดคละพบว่า มีค่าไม่อยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานของประเทศใดเลย

5.8 วิเคราะห์การปนเปื้อน

การคำนวณหาค่าความปนเปื้อนของหินโรยทางรถไฟดังตารางที่ 5-27 โดยใช้ 6 สมการคือ Fouling-index (F_I ,FI_p, FI_D), เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC), ดัชนีการปนเปื้อนในช่องว่าง (VCI), อัตราส่วนความสัมพันธ์การปนเปื้อนของหินโรยทาง (R_{b-f})

การวิเคราะห์ระดับการปนเปื้อนของหินโรยทางรถไฟดังตารางที่ 5-28 จาก 6 สมการคือ Fouling-index (F_I ,FI_p, FI_D), เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC), ดัชนีการปนเปื้อนในช่องว่าง (VCI), อัตราส่วนความสัมพันธ์การปนเปื้อนของหินโรยทาง (R_{b-f}) พบว่าสมการของ PVC และ VCI นั้นบ่งบอกถึงระดับการปนเปื้อนในไปในทิศทางที่สะอาดซึ่งแตกต่างจากสมการอื่นๆจึงสรุปได้ว่าสมการของ PVC และ VCI

นั้นไม่สามารถให้ระดับการปนเปื้อนที่ละเอียดพอดังนั้นในการวิเคราะห์ระดับการปนเปื้อนควรพิจารณาที่สมการของ Fouling- index (F_I ,FI_p, FI_D) และอัตราส่วนความสัมพันธ์การปนเปื้อนของหินโรยทาง (R_{b-f})

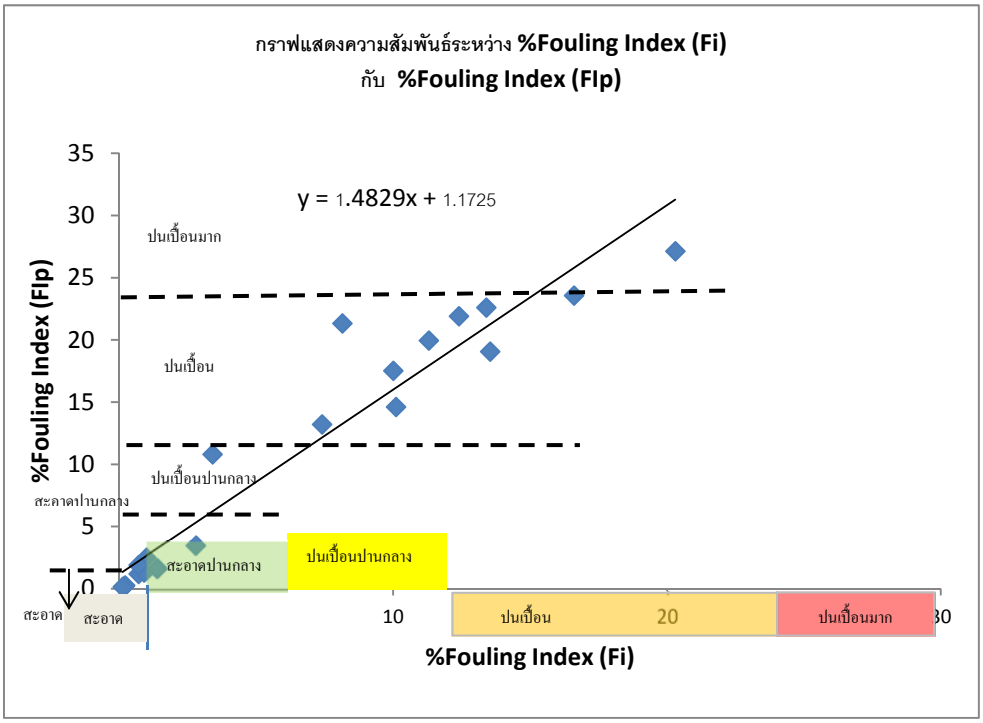
ตารางที่ 5-27 ค่าการปนเปื้อนของหินโรยทางจาก 6 สมการการปนเปื้อน

Station	ตำแหน่ง	%Fouling Index			อัตราส่วนความสัมพันธ์การปนเปื้อนของหินโรยทาง (R_{b-f})		%การปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC)		ดัชนีการปนเปื้อนในช่องว่าง (VCI)	
		F_i	FI_P	FI_D	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
145	Crib	0.70	1.19	1.85	0.41	0.41	1.19	1.18	1.60	1.60
	Shoulder	1.00	2.51	1.85	0.81	0.81	0.75	2.41	1.01	3.25
	Top ballast	13.40	22.60	11.67	21.75	21.75	20.81	9.77	28.09	13.18
	Middle ballast	11.30	19.94	8.50	18.87	18.87	18.92	8.77	25.54	11.83
	Bottom ballast	20.30	27.13	29.17	27.07	27.07	23.93	11.45	32.30	15.46

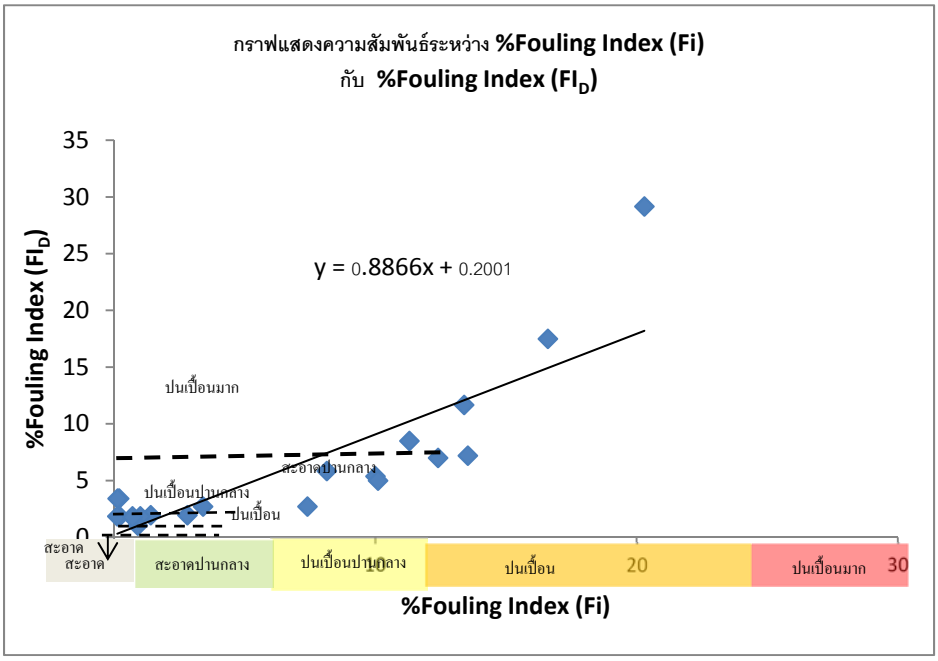
ตารางที่ 5-28 ระดับการปนเปื้อนของหินโรยทาง

Station	ตำแหน่ง	% Fouling Index			อัตราส่วนความสัมพันธ์การปนเปื้อนของหินโรยทาง (R_{b-f})	%การปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC)	ดัชนีการปนเปื้อนในช่องว่าง (VCI)
		F_i	FI_P	FI_D	(1), (2)	(1), (2)	(1), (2)
145	Crib	สะอาด	สะอาด	สะอาด	สะอาด	สะอาด	การระบายน้ำยอมรับได้
	Shoulder	สะอาดปานกลาง	สะอาดปานกลาง	สะอาด	สะอาด	สะอาด	การระบายน้ำยอมรับได้
	Top ballast	ปนเปื้อนปานกลาง	ปนเปื้อน	ปนเปื้อน	ปนเปื้อน	ปนเปื้อนปานกลาง, สะอาด	การระบายน้ำยอมรับได้
	Middle ballast	ปนเปื้อนปานกลาง	ปนเปื้อนปานกลาง	ปนเปื้อนปานกลาง	ปนเปื้อน	สะอาด	การระบายน้ำยอมรับได้
	Bottom ballast	ปนเปื้อนปานกลาง	ปนเปื้อน	ปนเปื้อน	ปนเปื้อน	ปนเปื้อนปานกลาง, สะอาด	การระบายน้ำยอมรับได้

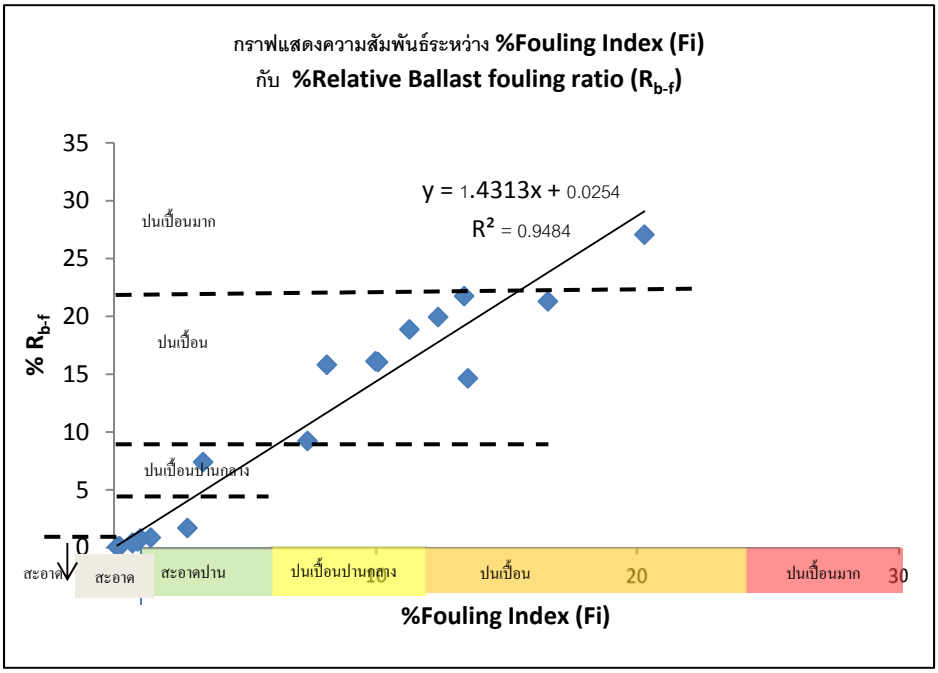
จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปนเปื้อนของสมการ Fouling Index (F_i) กับสมการการปนเปื้อนอีก 5 สมการดังรูปที่ 5-8, 5-9, 5-10, 5-11, และ 5-12 ในการวิเคราะห์นั้นเราใช้เส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงพบว่าเมื่อพิจารณาค่าการปนเปื้อนของสมการอื่นเทียบกับค่าการปนเปื้อนของสมการ Fouling Index (F_i) นั้นเส้นแนวโน้มของชุดข้อมูลซึ่งมีความชันน้อยนั้นจะอยู่ในระดับการปนเปื้อนที่น้อยกว่าเส้นแนวโน้มที่มีความชันมากโดยในที่นี้ค่าการปนเปื้อนจากสมการ Fouling Index (F_D) มีความปนเปื้อนน้อยสุดเมื่อเทียบกับระดับการปนเปื้อนของสมการ Fouling Index (F_i) ส่วนค่าการปนเปื้อนของสมการดัชนีการปนเปื้อนในช่องว่าง (VCI) นั้นมีความปนเปื้อนมากสุดเมื่อเทียบกับระดับการปนเปื้อนของสมการ Fouling Index (F_i)



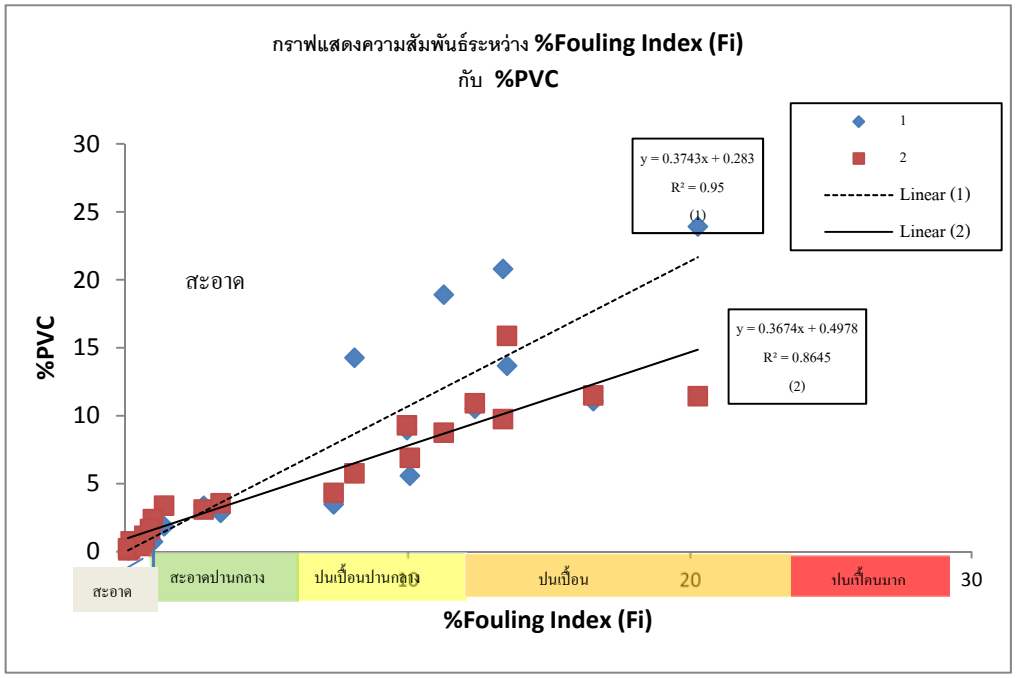
รูปที่ 5-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Fouling Index (F_i) กับ %Fouling Index (FI_p)



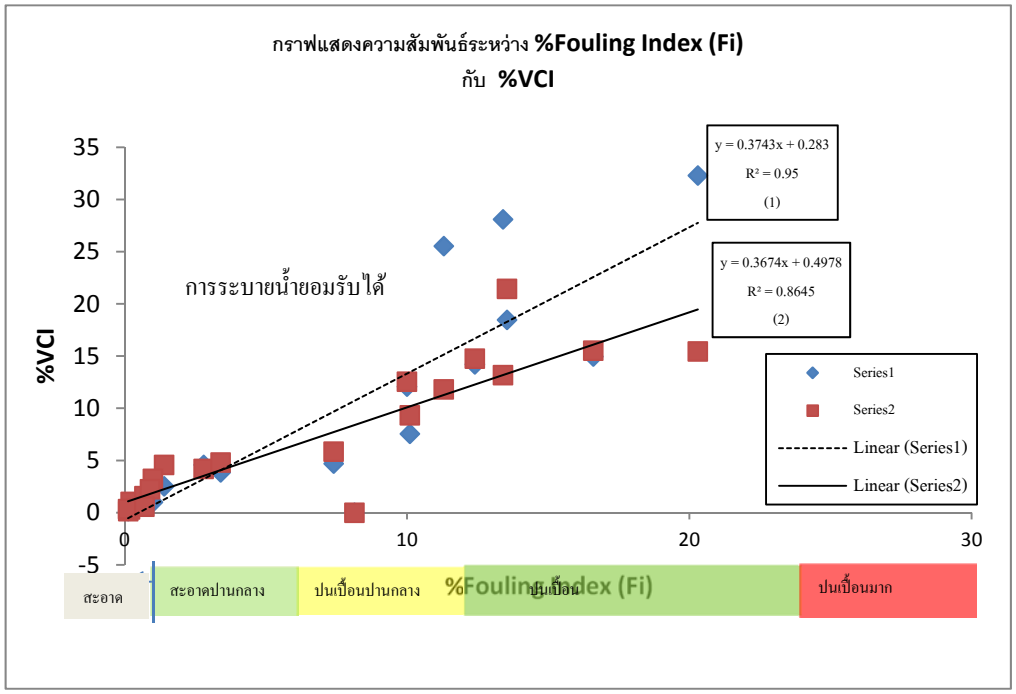
รูปที่ 5-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Fouling Index (F_i) กับ %Fouling Index (FI_D)



รูปที่ 5-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Fouling Index (F_i) กับ %Relative Ballast fouling ratio (R_{b-f})



รูปที่ 5-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Fouling Index (F_i) กับ %PVC



รูปที่ 5-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Fouling Index (F_i) กับ %VCI

หมายเหตุ : (1) คือ จากการทดสอบ Field density ชุดที่ 1, (2) คือ จากการทดสอบ Field density ชุดที่ 2

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง

การวิจัยเรื่องการประเมินการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางรถไฟ มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาหาสาเหตุของการเสื่อมสภาพของฐานรากทางรถไฟว่าสาเหตุหลักในการเสื่อมสภาพเกิดจากสาเหตุใด การวิจัยนี้จะเป็นส่วนช่วยในการออกแบบโครงสร้างทางรถไฟและช่วยกำหนดคุณสมบัติของวัสดุต่างๆเพื่อให้การก่อสร้างและการบำรุงรักษาทางรถไฟมีความประหยัดขึ้นและเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการเดินทาง

ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาสาเหตุการเสื่อมสภาพของทางรถไฟโดยทำการเก็บตัวอย่างจากเสาโทรเลขที่ 72/15 จ.ฉะเชิงเทรา และ 145/9 จ.ชลบุรี ซึ่งทำการเก็บตัวอย่าง 8 ส่วน ได้แก่ ส่วน Crib, Shoulder, Top ballast, Middle ballast, Bottom ballast, Sub-ballast, Subgrade 1, และSubgrade 2 ทำการเก็บตัวอย่างละ 50 กิโลกรัม ซึ่งก่อนการเก็บตัวอย่างผู้วิจัยได้ทำการทดลองหาความหนาแน่นของดินในภาคสนามโดยเก็บตัวอย่างเพื่อนำกลับมาหาค่าความชื้นในห้องปฏิบัติการ และการสำรวจสภาพทางรถไฟโดยการวัดหน้าตัดทางรถไฟ ตัวอย่างที่เก็บมาจะทำการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยการแยกตัวอย่างด้วยการ Sieve เป็น 3 กลุ่มดังนี้

1. Coarse Aggregate (ผ่านตะแกรงขนาด $2\frac{1}{2}$" - ค้างบนตะแกรงขนาด $\frac{3}{8}$")
   ทำการทดสอบดังนี้ Rock type, Los Angeles Values, Aggregate Compression Value, Aggregate Impact Value, Flat & Elongated particles, Specific gravity, Absorption, และ Sulfate soundness
2. Coarse fouling (ผ่านตะแกรงขนาด $\frac{3}{8}$" - ค้างบนตะแกรงเบอร์ 200)
   ทำการทดสอบดังนี้ Visual inspection, Specific gravity, Absorption, Sulfate soundness, และ Organic impurities
3. Fine fouling (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200)
   ทำการทดสอบดังนี้ Atterberg limit, Specific gravity, Hydrometer, และ Scanning Electron Microscopy

ค่าที่ได้จากการทดสอบจะนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานของหินโรยทางในแต่ละประเทศดังนี้ มาตรฐานของหินโรยทางรถไฟในประเทศออสเตรเลียหน่วยงาน Australian Rail Track Corporation (ARTC), Specification for track ballast ในประเทศอินเดีย และมาตรฐานหินโรยทางรถไฟของหน่วยงาน American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) ในประเทศอเมริกา โดยจากการเปรียบเทียบกับมาตรฐานในแต่ละประเทศนั้นพบว่าผลการทดสอบ Sieve Analysis ไม่ตรงตามมาตรฐานของแต่ละประเทศซึ่งเป็นเพราะหินโรยทางนั้นมีขนาดเล็กมากเกินไปเป็นเพราะว่าหินโรยทางผ่านการใช้งานมานานโดยไม่ได้มีการเปลี่ยนหินโรยทางจึงทำให้หินมีขนาดเล็กกว่ามาตรฐานในแต่ละประเทศต่างๆ และการทดสอบ Specific gravity นั้นไม่ตรงตามมาตรฐานของประเทศอเมริกาประเทศเดียวซึ่งมีค่ามากกว่ามาตรฐาน ส่วนในการทดสอบอื่นๆตรงตามมาตรฐานของแต่ละประเทศทั้งหมด

การหาค่าการปนเปื้อนในการวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการหาค่าการปนเปื้อนเปรียบเทียบกัน 6 สมการได้แก่ สมการ Fouling- index (F_I ,FI_p, FI_D), เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC), ดัชนีการปนเปื้อนในช่องว่าง (VCI), อัตราส่วนความสัมพันธ์การปนเปื้อนของหินโรยทาง (R_{b-f}) พบ;jkสมการของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนในช่องว่าง (PVC) และดัชนีการปนเปื้อนในช่องว่าง (VCI) ระบุความปนเปื้อนของหินโรยทางว่าสะอาดทั้งหมดซึ่งเป็นเพราะว่า 2 สมการนี้จำแนกค่าการปนเปื้อนที่มีช่วงที่กว้างกว่าสมการอื่นๆ ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลจึงใช้ 4 สมการที่เหลือ

การวิเคราะห์หาสาเหตุการเสื่อมสภาพโดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบและจากสมการการปนเปื้อน พบว่าที่ Station 72 การปนเปื้อนมีสาเหตุมาจากชั้นด้านล่างของ Bottom ballast ซึ่งจากการทดสอบ Atterberg limit พบว่าส่วน Fine fouling ของ Ballast เป็นดินตะกอนอนินทรีย์ที่มีความเหนียวต่ำถึงปานกลาง ดินเหนียวกรวด ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนตะกอนทราย ดินเหนียวล้วน (CL) ซึ่งเป็นชนิดเดียวกับชั้น Sub-ballast ส่วนชั้น Subgrade 1 เป็นดินดินเหนียวอนินทรีย์มีความเหนียวสูง ดินเหนียวมีความหนืดสูง (CH) สาเหตุหลักของการปนเปื้อนจึงเกิดการแทรกซึมจากชั้นล่างของบัลลาสต์ (Infiltration from underlying granular layers)

การวิเคราะห์หาสาเหตุการเสื่อมสภาพโดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบและจากสมการการปนเปื้อน พบว่าที่ Station 145 ส่วนละเอียดของ Ballast, Sub-ballast, Subgrade1 และ Subgrade2 ส่วนละเอียดเป็นดินตะกอนอนินทรีย์ที่มีความเหนียวต่ำถึงปานกลาง ดินเหนียวกรวด ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนตะกอนทราย ดินเหนียวล้วน (CL) และพบว่า Bottom Ballast นั้นมีการปนเปื้อนที่มากที่สุด เมื่อดูค่า Specific gravity ของ Ballast พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันกับ Subgrade จึงสรุปได้ว่าหลักนั้นมาจากการแทรกซึมของดินชั้นฐานราก (Subgrade Infiltration)

เอกสารอ้างอิง

นคร จันทศร, เยาวลักษณ์ สุนทรนนท์. (2554). ปฐมเหตุรถไฟ: พิมพลักษณ์ : กรุงเทพฯ

นคร จันทศร. (2555). ช่างรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ: โรงพิมพ์เดือนตุลา: กรุงเทพฯ.

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 Services Ltd, 1994.

Nand Kishore. Specification of Track Ballast, IRS-GE-1, June, 2004

Feldman, Frank and Nissan, Darryl. Alternative Testing Method for the Measurement of Ballast Fouling Percentage Void Contamination. In proceeding of Conference on Railway Engineering, Wonllongong, Australai, 10-13 November 2002. Railway technical Society of Australia, Canberra, Australia. pp. 101-109