



การประเมินค่าดัชนีความสกปรกของหินโรยทางรถไฟโดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือเรดาร์หยั่งลึก



พิษณุ พลกายนุวัต

ดุษฎีนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

การประเมินค่าดัชนีความสกปรกของหินโรยทางรถไฟโดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือเรดาร์หยั่งลึก



พิษณุ พลกายนุวัตร

ดุษฎีนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

AN EVALUATION OF RAILWAY BALLAST FOULING INDEX BY THE APPLICATION OF  
GROUND PENETRATING RADAR



PHITSANU PHOLKAINUWATRA

A DISSERTATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR DOCTOR DEGREE OF PHILOSOPHY

IN CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
BURAPHA UNIVERSITY

2025

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY

คณะกรรมการควบคุมคุณิพนธ์และคณะกรรมการสอบคุณิพนธ์ได้พิจารณา  
คุณิพนธ์ของ พิชณุ พลกายนุวัตร ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรปริญญาคุณิพนธ์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมคุณิพนธ์

คณะกรรมการสอบคุณิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

.....

..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวัชร)

(รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งโรจน์ อัจฉริยะ)

..... กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวัชร)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สยาม ยิ้มศิริ)

(รองศาสตราจารย์ ดร.สยาม ยิ้มศิริ)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.เที่ยง ชีวะเกตุ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุริยาจตุ ประอ้าย)

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณยศ คุรุกิจโกศล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับคุณิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาคุณิพนธ์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทวัส แจ่มเยี่ยม)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

62810084: สาขาวิชา: วิศวกรรมโยธา; ปร.ด. (วิศวกรรมโยธา)

คำสำคัญ: ทางรถไฟ, ดัชนีหินสกปรก, หินโรยทาง, เครื่องมือเรดาร์หยั่งลึก, เทคนิค  
Machine Learning

พิษณุ พลกายนุวัตร : การประเมินค่าดัชนีความสกปรกของหินโรยทางรถไฟโดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือเรดาร์หยั่งลึก. (AN EVALUATION OF RAILWAY BALLAST FOULING INDEX BY THE APPLICATION OF GROUND PENETRATING RADAR) คณะกรรมการควบคุมคดียุติพันธุ์: สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวัชร, สยาม ยิ้มศิริ ปี พ.ศ. 2568.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายระดับความสกปรกของหินโรยทางรถไฟ (Ballast Fouling) โดยการผสมผสานการใช้เทคโนโลยี Ground Penetrating Radar (GPR) เข้ากับเทคนิค Machine Learning ซึ่งเป็นแนวทางการตรวจสอบแบบไม่ทำลายที่มีศักยภาพสูง ผลการศึกษาแบ่งออกเป็นหลายส่วนสำคัญ

จากการทดสอบศักยภาพการเกิดซีเมนต์ (Cementing Potential) ของหินชนิดต่าง ๆ พบว่าหินแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หินปูน (Limestone) มีค่า Cementing Value สูงสุดถึง 2.5 MPa เนื่องจากมีแคลไซต์ (Calcite) เป็นองค์ประกอบหลัก 100% ซึ่งสามารถละลายและตกผลึกใหม่ได้ง่ายในสภาวะเปียก-แห้งสลับ ก่อให้เกิดเมทริกซ์แข็งที่อุดตันช่องว่างของหินได้ ในขณะที่หินอัคนี (Andesite, Dacite, Basalt) มีค่า Cementing Value ปานกลางที่ 0.4 MPa และหินแปร Gneiss มีค่าต่ำสุดที่ 0.2 MPa การค้นพบนี้ชี้ให้เห็นว่าชนิดของหินมีบทบาทสำคัญในการเร่งหรือชะลอกระบวนการเกิด fouling ผ่านกลไกการเกิดซีเมนต์สี่ขั้นตอน ได้แก่ การสึกหรอของหิน การสะสมอนุภาค การเกิดซีเมนต์ และการก่อตัวของเมทริกซ์แข็ง

ในการประเมินความสกปรกในสนาม จากตัวอย่างหินโรยทาง 52 จุด บนเส้นทางรถไฟสายตะวันออก พบค่า Ballast Fouling Index อยู่ในช่วง 0.10% ถึง 30.47% โดยมีค่าเฉลี่ย 7.98% หิน Rhyolite มีค่าความสกปรกเฉลี่ย 10.04% ซึ่งสูงกว่าหิน Granite ที่มีค่าเฉลี่ย 6.79% อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) การกระจายตัวของความสกปรกในสนามยังแสดงรูปแบบที่สัมพันธ์กับลักษณะทางภูมิศาสตร์และการใช้งาน โดยพื้นที่ที่มีการระบายน้ำไม่ดีหรืออยู่ใกล้แหล่งกำเนิดฝุ่นละอองมักมีค่าความสกปรกสูง

สำหรับการวิเคราะห์ Radargram จากข้อมูล GPR ความถี่ 400 MHz พบความสัมพันธ์เชิงลบที่แข็งแกร่งระหว่างลักษณะของสัญญาณกับระดับความสกปรก (สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ระหว่าง -0.78 ถึง -0.85) สัญญาณ GPR ในหินรอยทางสะอาด ( $FI < 5\%$ ) แสดงแอมพลิจูดสูง คมชัด และทะลุทะลวงได้ดี (1.8-2.2 เมตร) แต่เมื่อความสกปรกเพิ่มขึ้น แอมพลิจูดจะลดลงอย่างชัดเจน และความลึกการทะลุทะลวงลดลงเหลือ 0.8-1.2 เมตรในสภาพที่สกปรกมาก

แบบจำลอง Machine Learning ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้เทคนิค Histogram-based feature extraction แสดงประสิทธิภาพโดยรวม 90.9% ในการจำแนกคุณภาพข้อมูล Radargram โดยมีประสิทธิภาพดีเยี่ยมในการจำแนกข้อมูลประเภท Clean (Precision, Recall, F1-Score = 100%) และดีในประเภท Severe (Recall = 100%, Precision = 66.7%) อย่างไรก็ตามแบบจำลองมีข้อจำกัดในการจำแนกประเภท Moderate ซึ่งมีข้อมูลตัวอย่างน้อยและมีความคล้ายคลึงกับประเภท Severe ผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของ GPR และ Machine Learning ในการยกระดับการบำรุงรักษาทางรถไฟสู่แนวทางเชิงป้องกันที่แม่นยำและยั่งยืน

62810084: MAJOR: CIVIL ENGINEERING; Ph.D. (CIVIL ENGINEERING)

KEYWORDS: Railway, Ballast Fouling Index, Ballast, Ground Penetrating Radar,  
Machine Learning

PHITSANU PHOLKAINUWATRA : AN EVALUATION OF RAILWAY BALLAST  
FOULING INDEX BY THE APPLICATION OF GROUND PENETRATING RADAR.

ADVISORY COMMITTEE: SITTHIPHAT EUAAPIWATCH, SIAM YIMSIRI 2025.

This research focuses on developing a model to predict the level of railway ballast fouling by integrating Ground Penetrating Radar (GPR) technology with Machine Learning techniques, offering a highly potential non-destructive inspection approach. The study's findings are categorized into several key areas.

Testing the cementing potential of various rock types revealed significant differences in their properties. Limestone exhibited the highest Cementing Value at 2.5 MPa due to its 100% calcite composition, which readily dissolves and recrystallizes under wet-dry cycling, forming a rigid matrix that obstructs the ballast voids. Conversely, igneous rocks (Andesite, Dacite, Basalt) showed a moderate Cementing Value of 0.4 MPa, while metamorphic Gneiss had the lowest at 0.2 MPa. This finding suggests that rock type plays a crucial role in accelerating or decelerating the fouling process through a four-stage cementation mechanism: rock degradation, particle accumulation, cementation, and hard matrix formation.

For field fouling assessment, 52 ballast samples collected along the Eastern railway line showed Ballast Fouling Index values ranging from 0.10% to 30.47%, with an average of 7.98%. Rhyolite ballast exhibited an average fouling of 10.04%, significantly higher than Granite at 6.79% ( $p < 0.05$ ). The spatial distribution of fouling also correlated with geographical features and usage patterns, with poor drainage areas or those near dust sources typically showing higher fouling levels.

Radargram analysis using 400 MHz GPR data revealed a strong negative correlation between signal characteristics and fouling level (correlation coefficient between -0.78 and -0.85). GPR signals in clean ballast (FI < 5%) showed high amplitude, clear distinction, and deep penetration (1.8-2.2 meters). However, as fouling increased, the amplitude significantly decreased, and penetration depth was reduced to 0.8-1.2 meters in highly fouled conditions.

The developed Machine Learning model, utilizing Histogram-based feature extraction, demonstrated an overall accuracy of 90.9% in classifying Radargram data quality. It performed exceptionally well in classifying 'Clean' data (Precision, Recall, F1-Score = 100%) and adequately for 'Severe' data (Recall = 100%, Precision = 66.7%). Nevertheless, the model faced limitations in classifying 'Moderate' data due to insufficient samples and its similarity to 'Severe' data. This research highlights the potential of GPR and Machine Learning to enhance railway maintenance towards a precise and sustainable predictive approach

## กิตติกรรมประกาศ

ดุชฎินิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวัชร อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่ได้ให้คำแนะนำ ปรึกษา ให้ความรู้ และข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำดุชฎินิพนธ์ ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสำเร็จลุล่วงด้วยดี ทำให้ข้าพเจ้าสามารถก้าวผ่านอุปสรรคและพัฒนาศักยภาพของตนเองได้อย่างแท้จริง คำชี้แนะและแนวทางที่ท่านมอบให้เปรียบเสมือนแสงสว่างนำทางในทุกขั้นตอนของการศึกษา ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูงสำหรับความทุ่มเทและเมตตาที่มีให้ศิษย์เสมอมา ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สยาม ยิ้มศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้สละเวลาอันมีค่า ให้คำแนะนำเชิงลึก ให้ข้อเสนอแนะที่สร้างสรรค์ และคอยดูแลเอาใจใส่ในทุกรายละเอียดของดุชฎินิพนธ์ ช่วยเติมเต็มให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์และรอบด้านมากยิ่งขึ้น ความเชี่ยวชาญและวิสัยทัศน์ของท่านเป็นแรงบันดาลใจให้ข้าพเจ้ามุ่งมั่นพัฒนางานอย่างไม่หยุดยั้ง นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สำหรับการสนับสนุนด้านทรัพยากร สิ่งอำนวยความสะดวก และบรรยากาศทางวิชาการที่เอื้อต่อการเรียนรู้และการทำดุชฎินิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี การศึกษาระดับปริญญาเอกนี้ ถือเป็นช่วงเวลาสำคัญที่ต้องอาศัยทั้งกำลังกาย กำลังใจ และสติปัญญา ข้าพเจ้าตระหนักดีว่าความสำเร็จในวันนี้จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้หากปราศจากความรัก ความเข้าใจ และการสนับสนุนจากบิดาและมารดา ผู้เป็นที่รักยิ่ง ท่านทั้งสองคือแรงผลักดันที่ยิ่งใหญ่ที่สุดในชีวิต ขอขอบคุณสำหรับทุกการเสียสละ ทุกคำอวยพร และทุกกำลังใจที่มอบให้เสมอมา ความรักของท่านคือพลังที่ทำให้ข้าพเจ้าก้าวต่อไปได้เสมอ สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ นางกรรณิกา พลกายนุวัตร ภรรยาผู้เป็นที่รักยิ่ง ที่คอยอยู่เคียงข้าง ให้กำลังใจ ให้ความเข้าใจ และเป็นกำลังสำคัญในการสนับสนุนทั้งทางด้านจิตใจและทุก ๆ ด้านตลอดระยะเวลาของการศึกษา ความอดทน ความเสียสละ และความเชื่อมั่นที่เธอมีให้ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถมุ่งมั่นกับการทำดุชฎินิพนธ์ได้อย่างเต็มที่ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากดุชฎินิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอน้อมอุทิศแด่คุณอาจารย์ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน บิดามารดาผู้ให้กำเนิดและเลี้ยงดู และภรรยาผู้เป็นที่รัก ผู้ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อความสำเร็จในครั้งนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ .....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ถ
สารบัญภาพ .....	ด
บทที่ 1 .....	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	4
1.4 วิธีดำเนินการวิจัยโดยสังเขป.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2.....	9
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	9
2.1 โครงสร้างทางรถไฟและบทบาทของหินโรยทาง.....	9
2.1.1 องค์ประกอบของโครงสร้างทางรถไฟแบบหินโรยทาง.....	10
2.1.2 ราง (Rails).....	11
2.1.2 หมอนรองราง (Sleepers/Ties).....	11
2.1.3 หินโรยทาง (Ballast).....	12
2.1.3.1 หน้าที่ของหินโรยทาง .....	12

2.1.3.2 คุณสมบัติของหินโรยทาง .....	13
2.1.3.2.1 ลักษณะทางกายภาพ (Particle Characteristics) .....	13
2.1.3.2.2 ความแข็งแรงและความทนทาน (Strength and Durability) ..	14
2.1.3.2.3 การจัดเรียงขนาด (Particle Size Distribution).....	14
2.1.3.2.4 ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับหินโรยทาง .....	15
2.1.3.3 การปนเปื้อน (Fouling) .....	15
2.1.3.3.1 การเสื่อมสภาพของหินโรยทาง (Degradation) .....	16
2.1.3.3.2 การเคลื่อนตัวด้านข้างและตามยาว (Lateral and Longitudinal Movement) .....	16
2.1.3.3.3 ปัญหาการระบายน้ำ (Poor Drainage) .....	16
2.1.4 ชั้นรองหินโรยทาง (Sub-ballast/Capping Layer) .....	17
2.1.4.1 หน้าทีของชั้นรองหินโรยทาง .....	17
2.1.4.2 ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับชั้นรองหินโรยทาง.....	17
2.1.5 ชั้นพื้นคั่นทาง (Subgrade/Formation) .....	18
2.1.5.1 หน้าทีของชั้นพื้นคั่นทาง .....	18
2.1.5.2 ปัญหาที่พบบ่อยในชั้นพื้นคั่นทาง .....	19
2.2 กลไกการถ่ายแรงในโครงสร้างทางรถไฟ .....	20
2.2.1 ลักษณะของแรงที่กระทำ .....	20
2.2.2 การคำนวณแรงพลวัตและโมเมนต์ของทาง .....	21
2.3 กลไกของหินสปรก (Ballast Fouling) และการเกิดโคลนทะเล็ก (Mud Pumping) .....	22
2.3.1 กลไกการเกิดหินสปรก (Ballast Fouling).....	22
2.3.2 กลไกการเกิดโคลนทะเล็ก (Mud Pumping) .....	25
2.3.3 วงจรการเกิดโคลนทะเล็ก.....	26

2.4 การเกิด Cementation ในวัสดุเม็ดหยาบแนวคิดการยึดเกาะของฝุ่นกับหิน .....	27
2.4.1 การเกิด Cementation ในวัสดุเม็ดหยาบ.....	27
2.4.2 การยึดเกาะของฝุ่นกับหิน.....	28
2.4.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิด Cementation.....	29
2.4.3.1 ปัจจัยทางเคมี.....	29
2.4.3.2 ปัจจัยทางกายภาพ .....	30
2.4.3.3 ปัจจัยทางชีวภาพ.....	31
2.4.4 การเกิด Cementation ในชั้นหินรอยทางรถไฟ.....	31
2.4.4.1 ผลกระทบเชิงบวกของ Cementation .....	31
2.4.4.2 ผลกระทบเชิงลบของ Cementation.....	32
2.4.4.3 การจัดการ Cementation ในหินรอยทางรถไฟ.....	33
2.4.5 การประยุกต์ใช้ในวัสดุก่อสร้าง.....	33
2.4.5.1 การปรับปรุงดิน (Soil Improvement).....	33
2.4.5.2 การพัฒนาวัสดุใหม่.....	33
2.4.5.3 การควบคุมคุณภาพ.....	34
2.4.6 ผลกระทบต่อสมบัติทางวิศวกรรม .....	34
2.4.6.1 ความแข็งแรงเชิงกล .....	34
2.4.6.2 ความเปลี่ยนแปลงรูปร่าง .....	35
2.4.6.3 การซึมผ่านของน้ำ .....	36
2.4.7 การติดตามและการประเมินผล.....	36
2.4.7.1 เทคนิคการตรวจสอบแบบทำลาย.....	37
2.4.7.2 เทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย.....	38
2.4.7.3 การติดตามระยะยาว.....	38

2.4.8 ความเสียหายและแนวทางการแก้ไขปัญหา.....	39
2.4.8.1 ความไม่สม่ำเสมอของการเกิด Cementation .....	40
2.4.8.2 การควบคุมอัตราการเกิด Cementation .....	40
2.4.8.3 ความทนทานต่อสภาพแวดล้อม.....	41
2.5 หลักการของ GPR ในงานด้านวิศวกรรมทางรถไฟ.....	41
2.5.1 หลักการทำงานของ GPR.....	42
2.5.2 ความถี่และการเจาะทะลุของ GPR.....	43
2.5.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่ส่งผลต่อ GPR .....	44
2.5.4 การประยุกต์ใช้ GPR ในการตรวจสอบโครงสร้างรองรับรางรถไฟ.....	45
2.5.4.1 การตรวจสอบปนเปื้อนของหินโรยทางด้วย GPR.....	46
2.5.4.2 หลักการตรวจสอบการปนเปื้อน .....	47
2.5.4.3 ตัวชี้วัดการปนเปื้อน .....	48
2.5.5 การตรวจสอบสภาพดินเดิม (Subgrade) ด้วย GPR.....	49
2.5.7 ระบบ GPR แบบเคลื่อนที่สำหรับรถไฟ.....	50
2.5.8 ข้อจำกัดและความเสียหายในการใช้ GPR.....	50
2.5.9 แนวโน้มและการพัฒนาในอนาคตของ GPR.....	51
2.6 การแปลผล Radargram และการแปลผลคุณลักษณะ .....	51
2.6.1 คุณลักษณะพื้นฐานของเรดาร์แกรมในโครงสร้างทางรถไฟ .....	51
2.6.2 การตรวจสอบสภาพชั้นหินโรยทาง (Ballast Layer Assessment) .....	53
2.6.3 การประเมินการปนเปื้อนของหินโรยทาง (Ballast Fouling Assessment) .....	54
2.6.4 เทคนิคการประมวลผลสัญญาณขั้นสูง .....	55
2.6.4.1 การประมวลผลในโดเมนเวลา-ความถี่.....	55
2.6.4.2 การใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการแปลผล .....	55

2.6.5	การเลือกใช้ความถี่และเสาอากาศที่เหมาะสม .....	56
2.6.6	ข้อจำกัดและความท้าทายในการแปรผล .....	57
2.7	การประยุกต์ Machine Learning กับ Radargram .....	57
2.7.1	บทนำสู่การประยุกต์ Machine Learning กับ Radargram .....	58
2.7.1.1	ลักษณะและคุณสมบัติของ Radargram .....	59
2.7.2	การประยุกต์ในงานวิศวกรรมทางรถไฟ .....	59
2.7.2.1	ประโยชน์ทางเศรษฐกิจ .....	60
2.7.2.2	ความท้าทายในการประยุกต์ใช้ .....	60
2.7.3	เทคนิค Machine Learning สำหรับการวิเคราะห์ Radargram .....	60
2.7.3.1	การประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing) .....	61
2.7.3.2	Neural Networks และ Deep Learning .....	62
2.7.3.3	Support Vector Machines และ Ensemble Methods .....	62
2.7.3.4	การประมวลผลสัญญาณแบบขั้นสูง .....	63
2.7.4	การประยุกต์เฉพาะทางในงานรถไฟ .....	64
2.7.4.1	การตรวจสอบชั้นหินโรยทาง (Ballast Assessment) .....	65
2.7.4.2	การตรวจจับโครงสร้างใต้ดิน .....	65
2.7.4.3	การตรวจสอบความสมบูรณ์ของรางรถไฟ .....	66
2.7.5	ความท้าทายและข้อจำกัด .....	67
2.7.5.1	คุณภาพและปริมาณข้อมูล .....	67
2.7.5.2	การตีความผลลัพธ์ (Interpretability) .....	68
2.7.5.3	ปัญหาทางเทคนิค .....	68
2.7.6	แนวโน้มและทิศทางการพัฒนาในอนาคต .....	69
2.7.6.1	การผสานผสานข้อมูลหลายแหล่ง (Multi-modal Data Fusion) .....	69

2.7.6.2 การประมวลผลแบบเรียลไทม์.....	70
2.7.6.3 การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning).....	71
2.7.6.4 การใช้ Artificial Intelligence แบบองค์รวม.....	72
2.7.7 การประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม.....	72
2.7.7.1 ระบบการจัดการข้อมูลแบบครบวงจร.....	73
2.7.7.2 มาตรฐานและการรับรอง.....	73
2.7.7.3 ความท้าทายในการประยุกต์เชิงพาณิชย์.....	74
บทที่ 3.....	76
วิธีดำเนินงานวิจัย.....	76
3.1 ภาพรวมงานวิจัย.....	76
3.2 การทดลอง Cementation.....	76
3.2.1 หลักการและความสำคัญ.....	77
3.2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ.....	77
3.2.3 ขั้นตอนการทดสอบ.....	78
3.3 การเก็บข้อมูลสนาม.....	80
3.3.1 พื้นที่ศึกษาและการเลือกจุดสำรวจ.....	80
3.3.2 การสำรวจด้วย Ground Penetrating Radar.....	81
3.3.3 การเก็บตัวอย่างโรยทาง.....	83
3.3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ.....	85
3.4 การประมวลผลข้อมูล GPR.....	88
3.4.1 การประมวลผลเบื้องต้น.....	88
3.4.2 การแบ่งส่วนข้อมูลตามความลึก.....	89
3.5 การสกัดคุณลักษณะด้วยเทคนิค Histogram.....	89

3.5.1	หลักการ Histogram-based Feature Extraction.....	89
3.5.2	ขั้นตอนการสกัดคุณลักษณะ.....	90
3.5.3	การจำแนกประเภทความสกปรกตามเกณฑ์ Ballast Fouling Index.....	90
3.5.4	การเชื่อมโยงข้อมูล Radargram กับตัวอย่างสนาม .....	91
3.5.5	การเตรียมข้อมูลสำหรับ Machine Learning Classification .....	92
3.5.5.1	การสร้าง Feature Matrix.....	92
3.5.5.2	การกำหนด Class Labels .....	92
3.5.5.3	การแบ่งข้อมูล Training และ Testing .....	92
3.6	การพัฒนา Machine Learning Model สำหรับจำแนกประเภท Ballast Fouling.....	93
3.6.1	ภาพรวมของระบบ Classification .....	93
บทที่ 4:	.....	95
ผลการทดลองและการวิเคราะห์	.....	95
4.1	บทนำ .....	95
4.2	ผลการทดลอง Cementing Potential.....	95
4.2.1	วิธีการทดสอบ Ballast Cementing Value.....	95
4.2.2	ผลการวิเคราะห์ Petrographic.....	95
4.2.3	ผลการทดสอบ Ballast Cementing Value .....	97
4.2.4	การเปรียบเทียบกับมาตรฐานสากล .....	97
4.2.5	ผลกระทบของ Cementing Value ต่อการใช้งาน.....	98
4.2.6	กลไกการเกิด Cementation ในสภาพสนาม .....	99
4.2.7	การวิเคราะห์สนับสนุนสมมุติฐานเรื่องหินมีผลต่อการเกิด Fouling .....	101
4.3	ผลการทดสอบความสกปรกจากสนาม .....	103
4.3.1	ผลการทดสอบดัชนีหินสกปรก .....	104

4.3.2 การวิเคราะห์ตามชนิดหิน .....	106
4.3.2.1 ผลการวิเคราะห์หิน Rhyolite .....	107
4.3.2.2 ผลการวิเคราะห์หิน Granite .....	107
4.3.2.3 การเปรียบเทียบเชิงสถิติ .....	108
4.3.2.4 การกระจายตัวตามระยะทางและตำแหน่งภูมิศาสตร์ .....	108
4.3.2.5 การกระจายตามประเภทหิน .....	108
4.3.2.6 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง .....	109
4.4 ลักษณะของ Radargram .....	110
4.4.1 ภาพตัวอย่าง Radargram ที่สะอาดเปรียบเทียบกับสกปรก .....	110
4.3.2 รูปแบบคลื่น ความต่อเนื่อง และความเข้มของสัญญาณ .....	111
4.4.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างประเภทหิน .....	112
4.4.3 ความสัมพันธ์เบื้องต้นระหว่าง Radargram กับค่าความสกปรก .....	113
4.5 ผลของแบบจำลอง Machine Learning สำหรับการจำแนกประเภทคุณภาพข้อมูล Radargram .....	114
4.5.1 ผลการทดสอบและประเมินสมรรถนะแบบจำลอง .....	115
4.5.2 กรณีทำนายถูกต้องและผิดพลาด .....	115
4.5.2.1 การทำนายที่ถูกต้อง .....	116
4.5.2.2 การทำนายที่ผิดพลาด .....	116
4.5.3 ประเมินสมรรถนะของแต่ละโมเดล .....	116
4.5.3.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพรายประเภท .....	117
4.5.3.2 การเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	117
4.6 การอภิปรายผล .....	118
4.6.1 ศักยภาพของเทคนิค Ground Penetrating Radar ในการประเมินความสกปรกของ หินรอยทาง .....	118

4.6.2 บทบาทของ Cementation ในการอธิบายกลไกการเกิด Fouling.....	119
4.6.3 ประสิทธิภาพของแบบจำลอง Machine Learning ในการทำนายความสกปรก..	120
บทที่ 5.....	122
สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ .....	122
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	122
5.1.1 ผลการทดสอบ Cementing Potential ของหินชนิดต่างๆ.....	122
5.1.2 ผลการประเมินความสกปรกในสนาม .....	122
5.1.3 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ Radargram.....	123
5.1.4 ประสิทธิภาพของแบบจำลอง Machine Learning .....	123
5.2 การอภิปรายผล .....	124
5.2.1 ความสำคัญของบทบาท Cementation ในการเกิด Fouling.....	124
5.2.3 การบูรณาการข้อมูลห้องปฏิบัติการและสนาม.....	125
5.2.4 เปรียบเทียบกับการวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	126
5.2.5 ความท้าทายในการพัฒนาแบบจำลอง Multi-class Classification .....	127
5.2.6 ผลกระทบของปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่อประสิทธิภาพของระบบ .....	127
5.3 ข้อจำกัดของการวิจัย.....	128
5.3.1 ข้อจำกัดด้านข้อมูล .....	128
5.3.2 ข้อจำกัดด้านเทคนิค GPR.....	129
5.3.3 ข้อจำกัดของการทดสอบ Cementation.....	130
5.3.4 ข้อจำกัดของแบบจำลอง Machine Learning.....	130
5.3.5 ข้อจำกัดด้านการประยุกต์ใช้งาน.....	131
5.4 ข้อเสนอแนะ .....	132
5.4.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อเนื่อง .....	132

5.4.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการประยุกต์ใช้งาน.....	132
5.4.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยี.....	134
5.4.4 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยระดับนานาชาติ.....	135
5.4.5 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย.....	135
5.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	136
5.5.1 ประโยชน์ทางวิชาการ.....	136
5.5.2 ประโยชน์ด้านการประยุกต์ใช้งาน.....	137
5.5.3 ประโยชน์ด้านเศรษฐกิจและสังคม.....	138
5.5.4 ประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม.....	138
5.5.5 ประโยชน์ด้านการพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรม.....	139
5.6 อนาคตของการวิจัยและการพัฒนา.....	140
5.6.1 แนวโน้มเทคโนโลยี GPR ในอนาคต.....	140
5.6.2 การพัฒนา Artificial Intelligence สำหรับข้อมูล Geophysical.....	140
5.6.3 การบูรณาการกับเทคโนโลยีอื่นๆ.....	141
5.7 บทสรุป.....	141
ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์ การสกัด Radargram ไปยัง Histograms.....	144
บรรณานุกรม.....	178
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	193

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ดัชนีการปนเปื้อน (Fouling index) .....	24
ตารางที่ 2 แหล่งปนเปื้อนในชั้นหินโรยทางของ British Railways (Selig and Waters, 1994) ...	24
ตารางที่ 3 รูปแบบกลไกการเกิด Cementation ประเภทต่าง ๆ Mitchell & Soga (2005); DeJong et al. (2013); Consoli et al. (2007) .....	28
ตารางที่ 4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิด Cementation.....	29
ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลกระทบของ Cementation ต่อหินโรยทางรถไฟ Indraratna et al. (2011), Feldman & Nissen (2002), Lim & McDowell (2005) .....	32
ตารางที่ 6 ผลกระทบของ Cementation ต่อสมบัติทางเชิงกลของวัสดุเม็ดหยาบ Clough et al. (1981), Schnaid et al. (2001), Tatsuoka et al. (1997), Kenney et al. (1985).....	35
ตารางที่ 7 เปรียบเทียบเทคนิคการตรวจสอบ Cementation Santamarina & Fam (1997), Cascante et al. (2003), Desrues et al. (2006), Rocco et al. (2001) .....	39
ตารางที่ 8 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและความเร็วคลื่นของวัสดุต่างๆ ในระบบรถไฟ.....	44
ตารางที่ 9 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของหินโรยทางในสภาพต่าง ๆ Sussmann et al. (2003); Plati & Loizos (2013).....	48
ตารางที่ 10 ความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างทางรถไฟ Al-Qadi et al. (2010); Roberts et al. (2006); Anbazhagan et al. (2016).....	56
ตารางที่ 11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิค Machine Learning ต่างๆ Liu et al. (2020) และ Chen et al. (2023).....	64
ตารางที่ 12 ผลการตรวจจับโครงสร้างใต้ดินด้วยเทคนิคต่างๆ.....	66
ตารางที่ 13 เปรียบเทียบระบบการประมวลผลแบบต่าง ๆ Gao et al. (2022); Warren et al. (2016) .....	71
ตารางที่ 14 เปรียบเทียบระบบ ML สำหรับ Radargram ในระดับอุตสาหกรรม Kilic & Miller (2021) .....	74

ตารางที่ 15	แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐาน ballast ระหว่างประเทศต่างๆ .....	78
ตารางที่ 16	การตั้งค่าพารามิเตอร์ GPR ในการสำรวจ .....	83
ตารางที่ 17	ช่วงความสกปรกของหินโรยทางตามมาตรฐานการทดสอบ (Selig & Waters, 1994) .....	88
ตารางที่ 18	การจำแนกตัวอย่างหินโรยทางตามเกณฑ์ Ballast Fouling Index.....	91
ตารางที่ 19	ผลการวิเคราะห์ Petrographic ของหินโรยแต่ละชนิด .....	96
ตารางที่ 20	ผลการทดสอบ Ballast Cementing Value .....	97
ตารางที่ 21	ผลการทดสอบ Ballast Fouling Index ในสนาม .....	104
ตารางที่ 22	ผลการประเมินสมรรถนะแบบจำลองการจำแนกประเภทคุณภาพข้อมูล Radargram .....	115
ตารางที่ 23	เมทริกซ์ความสับสน (Confusion Matrix) ของแบบจำลอง .....	115

## สารบัญภาพ

### หน้า

ภาพที่ 1 องค์ประกอบโครงสร้างทางรถไฟ (Li et al., 2015; Chandra & Agarwal, 2013) .....	10
ภาพที่ 2 ขนาดคละของหินโรยทางตามมาตรฐาน AREMA 3 (ซ้าย) และ AREMA 4 (ขวา) (Li et al., 2015).....	15
ภาพที่ 3 ลักษณะของชั้นต่าง ๆ ของทางรถไฟ (Li et al., 2015) .....	18
ภาพที่ 4 การเสถียรของชั้นพื้นคั่นทางแบบก้าวหน้า (Progressive Shear Failure) .....	19
ภาพที่ 5 แหล่งปนเปื้อนในชั้นหินโรยทางของอเมริกาเหนือ (Selig and Waters, 1994).....	24
ภาพที่ 6 ปัจจัยสำคัญของการเกิดโคลนทะเล็ก (Mud pumping) (Nguyen et al., 2019).....	26
ภาพที่ 7 กลไกการดูดขึ้นของโคลนทะเล็ก (Takatoshi, 1997; Nguyen et al., 2019) .....	27
ภาพที่ 8 กลไกการเกิด Cementation ในวัสดุเม็ดหยาบ Boggs, S. (2022); Tucker, M. E. (2021); Pettijohn, F. J. et. al. (2020) .....	30
ภาพที่ 9 หลักการทำงานของ GPR เมื่อสะท้อนลงในพื้น (JP Hyslip, Olhoeft, Smith, & Selig, 2005; Li, Hyslip, Sussmann, & Chrismer, 2015) .....	43
ภาพที่ 10 โครงสร้างรองรับรางรถไฟและการตรวจสอบด้วย GPR (Li et al., 2015).....	46
ภาพที่ 11 หลักการทำงานของ GPR ในการตรวจสอบโครงสร้างทางรถไฟ (Leng & Al-Qadi, 2010).....	52
ภาพที่ 12 ลักษณะ Radargram แสดงการปนเปื้อนของหินโรยทางในระดับต่าง ๆ (Al-Qadi et al., 2008).....	55
ภาพที่ 13 ผังแนวทางดำเนินงานวิจัย.....	76
ภาพที่ 14 การให้แรงกดเพื่อเตรียมตัวอย่าง (ซ้าย) ลักษณะของตัวอย่างทดสอบ Cementing value (ขวา).....	78
ภาพที่ 15 การทดสอบ Unconfined compressive strength ของตัวอย่าง.....	79
ภาพที่ 16 เส้นทางรถไฟที่ทำการสำรวจและเก็บตัวอย่างหิน .....	80

ภาพที่ 17 ระบบ SRS รุ่น DPA HD ของ IDS GeoRadar.....	81
ภาพที่ 18 ตัวอย่างผลการสำรวจและใช้งานเครื่องมือ GPR ผ่าน ระบบ SRS.....	81
ภาพที่ 19 รถอเนกประสงค์ของการรถไฟแห่งประเทศไทย (อป.01) สำหรับติดตั้งเครื่องมือ .....	82
ภาพที่ 20 การติดตั้งเครื่องมือ GPR สำหรับการสำรวจสภาพทาง .....	82
ภาพที่ 21 การเก็บตัวอย่างหินโรยทางในสนาม.....	84
ภาพที่ 22 ลักษณะหินโรยทางที่มีการปนเปื้อนของวัสดุละเอียด.....	84
ภาพที่ 23 ลักษณะการเก็บตัวอย่างหินโรยทางในจุดที่มีการปนเปื้อนสูง .....	85
ภาพที่ 24 เครื่องมือทดสอบการร่อนผ่านตะแกรง .....	86
ภาพที่ 25 ภาพตัวอย่างการกระจายตัวของขนาดคละเม็ดหิน (Grain Size Distribution).....	88
ภาพที่ 26 การพัฒนา Machine Learning Model ในการ Classification ผ่าน MATLAB.....	94
ภาพที่ 27 ตัวอย่างการสกัด Radargram และ Histograms ผ่าน MATLAB .....	94
ภาพที่ 28 ภาพ Radargram ตัวอย่างที่ 41 (ซ้าย) และตัวอย่างที่ 48 (ขวา) .....	111
ภาพที่ 29 ภาพ Radargram ตัวอย่างที่ 1 (ซ้าย) และตัวอย่างที่ 10 (ขวา) .....	112

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างทางรถไฟมีองค์ประกอบสำคัญหลายส่วนที่ทำงานร่วมกันเพื่อรองรับและกระจายแรงจากขบวนรถไฟ หนึ่งในวัสดุหลักที่มีบทบาทอย่างยิ่งคือ "หินโรยทาง" หรือ ballast ซึ่งช่วยกระจายแรงจากหมอนรางสู่ชั้นโครงสร้างด้านล่าง รองรับภาระเคลื่อนตัวของหมอน ป้องกันการเคลื่อนตัวของราง และช่วยในการระบายน้ำ (Indraratna et al., 2011; Li et al., 2015) อย่างไรก็ตาม เมื่อระบบรางถูกใช้งานในระยะยาว หินโรยทางมักสะสมฝุ่นละอองและสิ่งแปลกปลอมภายนอกจนทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการปนเปื้อนของหินโรยทาง (Ballast fouling) หรือความสกปรกของหิน ซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของโครงสร้างและสมรรถนะโดยรวมของทางรถไฟ ปรากฏการณ์ fouling ของหินโรยทางอาจเกิดขึ้นจากกลไกต่างๆ ได้แก่ การแตกหักของหินโรยทาง การเคลื่อนย้ายของวัสดุชั้นรองพื้น การแทรกซึมของอนุภาคจากพื้นผิว และการเคลื่อนขึ้นของอนุภาคละเอียดจากชั้นดินรองพื้น (Selig & Waters, 1994; Han & Selig, 1997) เมื่อเกิด Fouling ระดับรุนแรง จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการระบายน้ำลดลง กำลังรับแรงเปลี่ยนแปลง และอาจเกิดปรากฏการณ์ Mud pumping ที่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในการเดินรถ (Budiono et al., 2004)

การประเมินสภาพความสกปรกของหินโรยทางเป็นปัจจัยสำคัญในการบำรุงรักษาทางรถไฟ วิธีการดั้งเดิมในการตรวจสอบหินโรยทางต้องใช้อุปกรณ์เจาะเพื่อเก็บตัวอย่างหิน ซึ่งมีข้อจำกัดคือเป็นการตรวจสอบแบบทำลาย ใช้เวลานาน และมีต้นทุนสูง (Bold, 2011) นอกจากนี้ การตรวจสอบเพียงจุดเดียวยังไม่สามารถสะท้อนสภาพของทางรถไฟในพื้นที่กว้างได้อย่างครอบคลุม

เทคโนโลยี Ground Penetrating Radar (GPR) ได้รับการพัฒนาเป็นวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายที่มีศักยภาพสูงในการประเมินสภาพของโครงสร้างใต้ดิน GPR ทำงานโดยการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงลงสู่ใต้ผิวดิน และวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมาเพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติไฟฟ้าของวัสดุใต้ดิน (Davis & Annan, 1989; Huisman et al.,

2003) สำหรับงานทางรถไฟ GPR สามารถตรวจสอบความหนาของชั้นหินโรยทาง สภาพการแยกตัวของชั้นต่างๆ และระดับความสกปรกของหิน (Zhao & Al-Qadi, 2019)

อย่างไรก็ตาม การแปลผลข้อมูล GPR เพื่อประเมินค่าความสกปรกของหินโรยทางยังคงต้องอาศัยความเชี่ยวชาญและประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งอาจทำให้เกิดความไม่แน่นอนและความผิดพลาดในการตีความ จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาระบบการวิเคราะห์อัตโนมัติที่สามารถประเมินค่าความสกปรกได้อย่างแม่นยำและสม่ำเสมอ

การประยุกต์ใช้ machine learning ในการวิเคราะห์ข้อมูล GPR ได้รับความสนใจมากขึ้นในช่วงหลายปีที่ผ่านมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัลกอริทึมแบบ Tree-based ที่แสดงผลการทำงานที่ดีในงานวิศวกรรมธรณี (Chen et al., 2021; Uthayakumar et al., 2022) อย่างไรก็ตาม การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมต่างๆ อย่างเป็นระบบยังมีจำกัด โดยเฉพาะในการประเมินความสกปรกของหินโรยทาง

แม้จะมีการศึกษาเกี่ยวกับ fouling อย่างต่อเนื่อง แต่งานวิจัยส่วนใหญ่มักมองว่าหินเป็นเพียง "วัสดุรองรับ" และมุ่งวิเคราะห์เฉพาะลักษณะของฝุ่นที่สะสม โดยยังไม่มีการตั้งสมมุติฐานย้อนกลับไปถึงบทบาทของหินเองว่าอาจมีส่วนเร่งให้เกิด Fouling ได้หรือไม่ โดยเฉพาะในกรณีที่ฝุ่นสามารถยึดเกาะกับหินด้วยปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีในสภาวะเปียก-แห้งสลับซึ่งเกิดขึ้นเป็นประจำในสภาพแวดล้อมภาคสนาม (Pholkainuwatra et al., 2023)

ประเทศไทยมีระบบรางรถไฟกว่า 4,000 กิโลเมตร แบ่งเป็น 4 เส้นทางหลักจากกรุงเทพฯ ได้แก่ เส้นทางเหนือ ตะวันออกเฉียงเหนือ ตะวันออก และใต้ (Chantasorn, 2016) ปัจจุบันการตรวจสอบสภาพหินโรยทางของการรถไฟแห่งประเทศไทยยังคงใช้วิธีการดั้งเดิมที่มีข้อจำกัดหลายประการ การพัฒนาระบบการตรวจสอบแบบไม่ทำลายที่มีประสิทธิภาพสูงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการบำรุงรักษาทางรถไฟของประเทศ ดังนั้นสิ่งที่สำคัญของงานวิจัยนี้ได้แก่

1. พัฒนาการใช้ Radargram จาก GPR ในการพิจารณาความสกปรกของหิน
2. พัฒนาแบบจำลอง Machine Learning ทำนายค่าความสกปรกจาก Radargram ได้และประเมินความแม่นยำ

3. อัลกอริทึมใดให้ผลการทำงานที่ดีที่สุดในการทำนายค่าความสกปรก("ASTM D5821: Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate," 2017; "Standard test method for density of soil and rock in place by the sand replacement method in a test pit," 2021)ปรกของหินโรยทาง

#### 4. พิจารณาบทบาทกลไกของของหินโรยทางในการเร่งกระบวนการ Fouling

เพื่องานวิจัยนี้ได้เริ่มต้นจากเก็บข้อมูลภาคสนามในเส้นทางรถไฟสายตะวันออกทุก ระยะ 2 กิโลเมตร โดยเก็บทั้งตัวอย่างหินเพื่อวิเคราะห์ค่าความสกปรก และข้อมูล radargram จาก GPR เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง Machine Learning โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ระหว่างอัลกอริทึม Regression tree และ boosted tree ensemble จากนั้นทำการทดลอง Cementation ในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาการยึดเกาะของฝุ่นกับพื้นผิวหิน จากหินต่าง ๆ ที่นำมาใช้เป็นหินโรยทาง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการทำนายค่าความสกปรกของหินโรยทางรถไฟโดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Ground Penetrating Radar ร่วมกับเทคนิค machine learning เพื่อสร้างเครื่องมือการตรวจสอบแบบไม่ทำลายที่มีประสิทธิภาพสูง วัตถุประสงค์หลักของการวิจัยแบ่งออกเป็นด้านการศึกษาพื้นฐานและการประยุกต์ใช้

ในด้านการศึกษาพื้นฐาน การวิจัยนี้ตั้งเป้าหมายเพื่อศึกษากลไกการยึดเกาะของฝุ่นกับหินโรยทางในสภาวะเปียก-แห้งสลับผ่านการทดลอง cementation ที่ออกแบบเฉพาะ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเข้าใจบทบาทของหินเองในการเร่งกระบวนการ Fouling ซึ่งเป็นมุมมองใหม่ที่แตกต่างจากการศึกษาในอดีต นอกจากนี้ ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างความเชื่อมโยงระหว่างลักษณะเฉพาะของข้อมูล Radargram จาก GPR กับค่าความสกปรกของหินที่วัดได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

ในด้านการประยุกต์ใช้ การวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อพัฒนาและเปรียบเทียบแบบจำลอง Machine learning สองประเภทหลัก ได้แก่ regression tree และ boosted tree ensemble

สำหรับการทำนายค่าความสกปรกของหิน โดยมุ่งเน้นการประเมินทั้งความแม่นยำในการทำนาย และความสามารถในการ generalize ของแต่ละอัลกอริทึม รวมถึงการวิเคราะห์ trade-off ระหว่าง ประสิทธิภาพการทำงานและความสามารถในการตีความผลลัพธ์

ท้ายสุดของการวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนารอบการทำงาน (framework) ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบสภาพทางรถไฟในเชิงปฏิบัติ โดยเฉพาะสำหรับการรถไฟแห่งประเทศไทย เพื่อยกระดับขีดความสามารถในการบำรุงรักษาเชิงรุกและเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการโครงสร้างพื้นฐานทางรถไฟ

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การกำหนดขอบเขตของการวิจัยครั้งนี้อยู่บนพื้นฐานของความเป็นไปได้ในการดำเนินงาน ความพร้อมของทรัพยากร และความเหมาะสมของพื้นที่ศึกษาสำหรับการตอบคำถามวิจัยที่ตั้งไว้ การกำหนดขอบเขตนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้การศึกษามีความชัดเจนและสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในด้านพื้นที่และขอบเขตทางภูมิศาสตร์ การวิจัยนี้เลือกใช้เส้นทางรถไฟสายตะวันออก ตั้งแต่สถานีมักกะสันจนถึงสถานีปราชญ์บุรี เป็นพื้นที่ศึกษาหลัก โดยจุดเก็บข้อมูลกำหนดให้มีระยะห่างทุก 2 กิโลเมตร ซึ่งให้จำนวนจุดศึกษารวม 52 จุด การเลือกเส้นทางนี้มีเหตุผลหลายประการ ได้แก่ เป็นเส้นทางที่มีการใช้งานหนาแน่น มีความหลากหลายของสภาพธรณีวิทยา และมีความสะดวกในการเข้าถึงเพื่อเก็บข้อมูล นอกจากนี้ เส้นทางดังกล่าวยังเป็นตัวแทนที่ดีของเส้นทางรถไฟในภูมิภาคตะวันออกของประเทศ ซึ่งมีลักษณะการใช้งานและสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันไปตามพื้นที่

ในด้านเทคนิคและวิธีการศึกษา การวิจัยกำหนดให้ใช้ GPR ความถี่ 400 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างทางรถไฟในช่วงความลึกที่สนใจ คือ ประมาณ 0.45 เมตรตั้งแต่ผิวหินโรยทางบนสุด จนถึงชั้นหินโรยทางซึ่งเป็นความลึกที่สำคัญสำหรับการประเมิน fouling สำหรับการวิเคราะห์ค่าความสกปรก จะใช้วิธีการร่อนผ่านตะแกรงตามมาตรฐาน

เพื่อกำหนด ballast Fouling Index ที่เป็นตัวแทนของระดับการปนเปื้อนของหินโรยทาง การศึกษานี้จะทำการศึกษเกี่ยวกับ cementing potential ของหินโรยทางมาประยุกต์ใช้ เพื่อเข้าใจบทบาทของหินเองในการเร่งกระบวนการ fouling ซึ่งเป็นมุมมองใหม่ที่แตกต่างจากการศึกษาในอดีต

ขอบเขตด้านอัลกอริทึมและการวิเคราะห์ข้อมูลถูกกำหนดให้เน้นการเปรียบเทียบระหว่าง regression tree และ boosted tree ensemble เป็นหลัก โดยใช้ histogram-based feature extraction จาก Radargram เป็นวิธีการสกัดคุณลักษณะ การเลือกอัลกอริทึมทั้งสองนี้มีพื้นฐานจากงานวิจัยในอดีตที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ tree-based methods ในงานด้านการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิศาสตร์และธรณีฟิสิกส์ การประเมินประสิทธิภาพจะใช้ 5-fold cross-validation เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้และสามารถเปรียบเทียบได้อย่างเป็นธรรม

การวิจัยนี้มีข้อจำกัดสำคัญหลายประการที่ควรระบุไว้อย่างชัดเจน ประการแรก การศึกษาจำกัดเฉพาะเส้นทางรถไฟสายตะวันออกเท่านั้น ซึ่งอาจไม่สามารถเป็นตัวแทนของเส้นทางรถไฟอื่นๆ ในประเทศที่มีสภาพธรณีวิทยาหรือการใช้งานที่แตกต่างกัน ประการที่สอง การใช้ GPR ความถี่เดียวอาจจำกัดความสามารถในการตรวจจับลักษณะเฉพาะบางประการของโครงสร้างใต้ดิน ประการที่สาม การศึกษาดำเนินการในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น จึงไม่สามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลหรือสภาพอากาศได้ สุดท้าย การเปรียบเทียบอัลกอริทึมจำกัดเฉพาะ tree-based methods เท่านั้น ซึ่งอาจมีอัลกอริทึมประเภทอื่นที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า

#### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัยโดยสังเขป

วิธีการดำเนินการวิจัยได้รับการออกแบบให้เป็นกระบวนการที่เป็นระบบและครอบคลุม โดยแบ่งออกเป็นสี่ขั้นตอนหลักที่เชื่อมโยงกันอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถตอบคำถามวิจัยและบรรลุวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาพื้นฐานในห้องปฏิบัติการเพื่อทำความเข้าใจกลไกการเกิด cementation ระหว่างฝุ่นและหินโรยทาง การทดลองจะดำเนินการโดยการจำลองสภาวะเปียก-แห้งสลับที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมจริงของทางรถไฟ โดยจะทดสอบกับหินประเภทต่างๆ ที่ใช้เป็น

หินโรยทางในประเทศไทย เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดหินต่อการเกิด fouling การประเมิน cementing value จะดำเนินการตามวิธีการมาตรฐานที่พัฒนาโดย Raymond (1979)

ขั้นตอนที่สองเป็นการเก็บข้อมูลภาคสนามที่ครอบคลุมทั้งข้อมูล GPR และตัวอย่างหินจริง การสำรวจ GPR จะใช้ระบบ SafeRailSystem (SRS) ความถี่ 400 MHz ของการรถไฟแห่งประเทศไทย (ร.ฟ.ท.) สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างทางรถไฟในช่วงความลึกที่สนใจ การเก็บข้อมูลจะดำเนินการอย่างเป็นระบบในแต่ละจุดศึกษา โดยจะบันทึกทั้ง Radargram และข้อมูลตำแหน่ง GPS ที่แม่นยำ การเก็บตัวอย่างหินจะทำโดยการขุดในช่วงความลึกต่างๆ ที่สอดคล้องกับการแบ่งชั้นใน Radargram ตัวอย่างหินที่เก็บได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเพื่อหา Ballast Fouling Index ที่จะใช้เป็นข้อมูลเป้าหมายสำหรับการฝึกแบบจำลอง machine learning

ขั้นตอนที่สามเป็นการประมวลผลข้อมูลและการพัฒนาแบบจำลอง การประมวลผล radargram จะเริ่มจากการปรับปรุงคุณภาพของข้อมูลด้วยเทคนิคการกรองสัญญาณรบกวนและการปรับปรุงคอนทราสต์ จากนั้นจะดำเนินการสกัดคุณลักษณะด้วยวิธี histogram-based feature extraction ซึ่งจะแปลงข้อมูล radargram ให้เป็นตัวเลขที่แบบจำลอง machine learning สามารถประมวลผลได้ การพัฒนาแบบจำลองจะดำเนินการแยกกันสำหรับ regression tree และ boosted tree ensemble โดยจะมีการปรับแต่งพารามิเตอร์อย่างเป็นระบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดจากแต่ละอัลกอริทึม

ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองต่างๆ การประเมินจะใช้เทคนิค cross-validation เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้และไม่เกิด overfitting การเปรียบเทียบจะครอบคลุมทั้งความแม่นยำในการทำนาย ความเร็วในการประมวลผล และความสามารถในการตีความผลลัพธ์ นอกจากนี้ จะมีการวิเคราะห์ feature importance เพื่อเข้าใจว่าลักษณะใดของ radargram มีความสำคัญมากที่สุดต่อการทำนายค่าความสกปรก ผลลัพธ์จากการศึกษานี้จะถูกนำมาประเมินความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานตรวจสอบทางรถไฟจริง รวมถึงการเสนอแนะแนวทางสำหรับการพัฒนาต่อไปในอนาคต

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การวิจัยนี้มีนัยสำคัญทั้งในด้านทฤษฎีและการปฏิบัติที่คาดว่าจะจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวิทยาการด้านวิศวกรรมทางรถไฟและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในการตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับสามารถจำแนกได้ดังนี้

ในด้านการพัฒนาองค์ความรู้ทางวิชาการ การวิจัยนี้จะช่วยเพิ่มความเข้าใจเชิงกลไกเกี่ยวกับการเกิด fouling ของหินโรยทาง โดยเฉพาะการศึกษาบทบาทของหินเองในการเร่งกระบวนการ fouling ผ่านการทดลอง cementation ซึ่งเป็นมุมมองใหม่ที่แตกต่างจากการศึกษาในอดีตที่มุ่งเน้นเฉพาะลักษณะของอนุภาคปนเปื้อน การพัฒนาความรู้ในด้านนี้จะเป็นรากฐานสำคัญสำหรับการศึกษาวิจัยด้านวิศวกรรมทางรถไฟในระดับที่ลึกซึ้งยิ่งขึ้น นอกจากนี้ การสร้างความเชื่อมโยงระหว่างข้อมูล GPR และค่าความสกปรกของหินจะเป็นการขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี GPR ในงานโครงสร้างพื้นฐานให้กว้างขวางมากขึ้น

ในด้านการพัฒนาเทคโนโลยีและระเบียบวิธี การวิจัยนี้จะได้แนวทางการตรวจสอบระดับ fouling แบบไม่ทำลายที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งเป็นการก้าวข้ามข้อจำกัดของวิธีการตรวจสอบแบบดั้งเดิมที่ต้องขุดเจาะและใช้เวลานาน การพัฒนาระบบการวิเคราะห์อัตโนมัติด้วย Machine learning จะช่วยลดการพึ่งพาความเชี่ยวชาญของผู้เชี่ยวชาญ ทำให้การตรวจสอบมีความสม่ำเสมอและแม่นยำมากขึ้น ระบบที่พัฒนาขึ้นจะเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการพัฒนาระบบตรวจวัดอัตโนมัติแบบ real-time ในอนาคต ซึ่งสามารถติดตั้งบนรถไฟตรวจสอบเพื่อทำการสำรวจอย่างต่อเนื่อง

ในด้านการปฏิบัติและการประยุกต์ใช้ การวิจัยนี้จะช่วยเสริมความสามารถในการวางแผนบำรุงรักษาทางรถไฟเชิงรุก (Preventive maintenance) แทนการบำรุงรักษาแบบตามกำหนดเวลา (Scheduled maintenance) หรือการซ่อมแซมหลังเกิดปัญหา (Corrective maintenance) การสามารถทำนายสภาพของหินโรยทางล่วงหน้าจะช่วยลดต้นทุนการบำรุงรักษาและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานทางรถไฟ นอกจากนี้ ความสามารถในการตรวจสอบพื้นที่กว้างได้อย่างรวดเร็วและต่อเนื่องจะช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการเดินรถไฟและลดความเสี่ยงจากอุบัติเหตุที่อาจเกิดจากสภาพทางเสื่อมโทรม

สำหรับการรถไฟแห่งประเทศไทยโดยเฉพาะ การวิจัยนี้จะช่วยพัฒนาขีดความสามารถในการตรวจสอบโครงสร้างทางรถไฟด้วยเทคโนโลยีทันสมัย ลดการพึ่งพาผู้เชี่ยวชาญต่างประเทศ

ในการตรวจสอบและประเมินสภาพทางรถไฟ การมีระบบการตรวจสอบที่พัฒนาเองจะช่วยสนับสนุนการพัฒนาระบบขนส่งทางรางของประเทศ โดยเฉพาะในยุคที่มีการขยายเครือข่ายรถไฟความเร็วสูงและรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ความรู้และเทคโนโลยีที่ได้จากการวิจัยนี้จะเป็นแนวทางสำคัญสำหรับการพัฒนามาตรฐานการตรวจสอบทางรถไฟของประเทศให้สอดคล้องกับเทคโนโลยีสมัยใหม่

ในระดับการศึกษาและการถ่ายทอดความรู้ ผลการวิจัยนี้จะเป็นแหล่งข้อมูลสำคัญสำหรับการพัฒนาหลักสูตรด้านวิศวกรรมทางรถไฟและการประยุกต์ใช้ machine learning ในงานวิศวกรรม การมีกรณีศึกษาที่เป็นรูปธรรมจากประเทศไทยจะช่วยให้นักศึกษาและผู้ปฏิบัติงานเข้าใจการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในบริบทท้องถิ่นได้ดีขึ้น นอกจากนี้ วิธีการวิจัยและผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นต้นแบบสำหรับการวิจัยต่อยอดในด้านการประยุกต์ใช้ machine learning กับข้อมูลจากเครื่องมือตรวจสอบแบบไม่ทำลายชนิดอื่นๆ

ในมิติของการพัฒนาที่ยั่งยืน การมีระบบการตรวจสอบที่มีประสิทธิภาพจะช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างทางรถไฟ ลดการใช้ทรัพยากรในการก่อสร้างใหม่ และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การบำรุงรักษาเชิงรุกจะช่วยป้องกันความเสียหายขนาดใหญ่ที่อาจต้องใช้ในการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการพัฒนาอย่างยั่งยืนและการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ

สุดท้าย การวิจัยนี้จะช่วยสร้างเครือข่ายความรู้และความร่วมมือระหว่างสถาบันการศึกษา หน่วยงานรัฐ และภาคเอกชนในการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการขนส่งทางราง การมีผลงานวิจัยที่มีคุณภาพจะช่วยยกระดับความน่าเชื่อถือของประเทศไทยในด้านการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการขนส่ง และอาจนำไปสู่การร่วมมือกับนานาชาติในการพัฒนาเทคโนโลยีขั้นสูงต่อไป

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 โครงสร้างทางรถไฟและบทบาทของหินโรยทาง

โครงสร้างทางรถไฟเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญที่สุดของโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งทางราง ซึ่งทำหน้าที่รองรับน้ำหนักบรรทุกจากขบวนรถไฟและกระจายแรงดังกล่าวลงสู่ชั้นรองรับด้านล่าง (Li et al., 2015; Selig & Waters, 1994) จากในอดีตโครงสร้างทางรถไฟได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองความต้องการในการขนส่งที่เพิ่มขึ้น ทั้งในด้านความเร็วที่สูงขึ้นและน้ำหนักบรรทุกที่มากขึ้นของขบวนรถไฟ โดยมีเป้าหมายหลักคือการเพิ่มความปลอดภัย ลดต้นทุนการก่อสร้างและการบำรุงรักษาและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน (Chandra & Agarwal, 2013; Li et al., 2015)

โครงสร้างทางรถไฟมีหลายประเภท โครงสร้างทางรถไฟแบบหินโรยทาง (Ballasted Track) เป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากที่สุดในโลก (Indraratna et al., 2023) โครงสร้างนี้ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ราง หมอนรองราง ระบบยึดเหนี่ยว หินโรยทาง ชั้นรองรับหินโรยทางและชั้นพื้นคันทาง ซึ่งแต่ละองค์ประกอบมีบทบาทสำคัญในการรับและกระจายแรงจากขบวนรถไฟอย่างมีประสิทธิภาพ (Li et al., 2015) แม้ว่าในปัจจุบันจะมีโครงสร้างทางรถไฟแบบไร้หินโรยทาง (Slab Track หรือ Ballastless Track) ที่มีจุดเด่นด้านการควบคุมการเคลื่อนตัวและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาในระยะยาวโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับรถไฟความเร็วสูง (Esveld, 2001; Indraratna et al., 2011; Chandra & Agarwal, 2013) แต่โครงสร้างแบบหินโรยทางยังคงเป็นตัวเลือกที่คุ้มค่าและยืดหยุ่นสูงสำหรับการใช้งานส่วนใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการขนส่งสินค้าหนัก (heavy haul freight) และยังสามารถรองรับรถไฟความเร็วสูงได้เกิน 250 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หากมีการก่อสร้างและบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม (Li et al., 2015; Chandra & Agarwal, 2013)

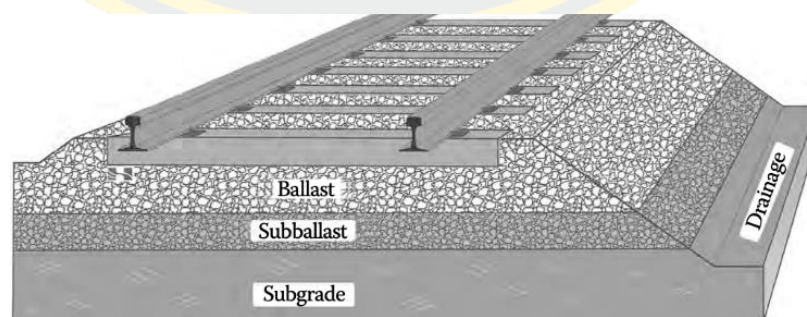
อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักเพลาและความถี่ในการเดินรถไฟเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างทางรถไฟแบบหินโรยทางเสื่อมสภาพและต้องมีการบำรุงรักษาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผล

ให้มีค่าใช้จ่ายสูง (Indraratna et al., 2023) ปัญหาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างทาง ส่วนล่าง (substructure) โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นหินโรยทาง ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่รับแรง โดยตรงจากหมอนรองราง (Li et al., 2015) การทำความเข้าใจอย่างลึกซึ้งเกี่ยวกับคุณสมบัติและ พฤติกรรมของหินโรยทางภายใต้สภาวะการรับแรงแบบต่าง ๆ จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการ ออกแบบและบำรุงรักษาทางรถไฟให้มีประสิทธิภาพและยั่งยืน

บทนี้จะนำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างทางรถไฟแบบหินโรยทางอย่าง ครอบคลุม โดยเริ่มต้นจากองค์ประกอบแต่ละส่วนและการหน้าที่ของแต่ละชั้น จากนั้นจะกล่าวถึง กลไกการถ่ายแรง ปัญหาความเสียหายที่พบบ่อยรวมถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของหินโรย ทางและแนวทางการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของโครงสร้างทางรถไฟแบบ หินโรยทาง

### 2.1.1 องค์ประกอบของโครงสร้างทางรถไฟแบบหินโรยทาง

โครงสร้างทางรถไฟแบบหินโรยทางเป็นระบบที่ซับซ้อนประกอบด้วยหลายชั้นที่ ทำงานร่วมกันเพื่อรับและกระจายแรงจากขบวนรถไฟลงสู่พื้นดินอย่างปลอดภัยและมี ประสิทธิภาพ องค์ประกอบหลักของโครงสร้างนี้ได้แก่ราง หมอนรองรางระบบยึดเหนี่ยว หินโรย ทาง ชั้นรองรับหินโรยทางและชั้นพื้นคันทาง (Li et al., 2015; Chandra & Agarwal, 2013) ดัง แสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 องค์ประกอบโครงสร้างทางรถไฟ (Li et al., 2015; Chandra & Agarwal, 2013)

### 2.1.2 ราง (Rails)

รางเป็นองค์ประกอบที่เห็นได้ชัดเจนที่สุดของโครงสร้างทางรถไฟ ทำหน้าที่โดยตรงในการรองรับล้อของขบวนรถไฟและนำทางรถไฟให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนด (Li et al., 2015; Chandra & Agarwal, 2013) รางได้มีการพัฒนาอย่างมากตลอดหลายปีที่ผ่านมา จากรางขนาดเล็กที่ติดตั้งเป็นท่อน ๆ ไปจนถึงรางขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกันเป็นสายยาวต่อเนื่อง (Continuous Welded Rail, CWR) ซึ่งเป็นที่นิยมในปัจจุบัน การใช้เหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูง และกระบวนการชุบแข็งหัวราง (head hardening) ได้ส่งผลให้รางมีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าในด้านความทนทานต่อการสึกหรอและอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น (Li et al., 2015; Chandra & Agarwal, 2013)

แม้ว่ารางที่แข็งแรงขึ้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของทางรถไฟในส่วนที่ได้รับการรองรับอย่างดีแต่ก็ไม่สามารถแก้ไขปัญหารองรับทางที่อ่อนแอได้หากการรองรับได้รางมีปัญหาการใช้รางที่หนักและแข็งแรงขึ้นก็จะมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และจำเป็นต้องปรับปรุงการรองรับใต้ทางเป็นหลัก (Li et al., 2015) นอกจากนี้รางยังอาจเกิดข้อบกพร่องอื่น ๆ เช่น การเกิดรอยคด (Corrugation) ซึ่งทำให้เกิดเสียงดังและเร่งการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยว (Chandra & Agarwal, 2013)

### 2.1.2 หมอนรองราง (Sleepers/Ties)

- หมอนรองราง หรือที่เรียกว่าไม้หมอน (ในกรณีที่เป็นไม้) เป็นองค์ประกอบที่วางอยู่ใต้ราง ทำหน้าที่รองรับรางและถ่ายน้ำหนักจากรางลงสู่ชั้นหินโรยทางด้านล่าง (Chandra & Agarwal, 2013) หมอนรองรางที่ใช้กันทั่วไปมีทั้งไม้และคอนกรีต แม้ว่าจะมีหมอนประเภทวัสดุผสม/พลาสติกและเหล็กกล้าที่พัฒนาขึ้นสำหรับการใช้งานเฉพาะทางแต่ก็ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายเท่าหมอนไม้และหมอนคอนกรีต (Li et al., 2015; Chandra & Agarwal, 2013)

- หมอนไม้: ยังคงเป็นที่นิยมในบางภูมิภาค เช่น สหรัฐอเมริกา เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและมีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งช่วยลดแรงกระแทกจากการเคลื่อนที่ของรถไฟได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม หมอนไม้มีความอ่อนไหวต่อปัญหาการระบายน้ำและการผุพังได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับความชื้น ทำให้มีอายุการใช้งานจำกัดและต้องการการบำรุงรักษาบ่อยครั้ง (Li et al., 2015; Chandra & Agarwal, 2013)

- **หมอนคอนกรีต:** มีความสามารถในการรับน้ำหนักและรองรับความเร็วที่สูงขึ้นได้ดีกว่า และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าหมอนไม้ อย่างไรก็ตาม หมอนคอนกรีตก็มีปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น การเสื่อมสภาพเนื่องจากการรองรับทางที่ไม่ดีและคุณภาพของคอนกรีตที่ไม่เหมาะสม การใช้แผ่นรองใต้หมอน (under-tie pads) ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าช่วยปรับปรุงการสัมผัสระหว่างหมอนกับหินโรยทาง ลดการสึกกร่อน และเพิ่มความยืดหยุ่นของหมอนคอนกรีต ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานของหินโรยทางได้ (Li et al., 2015; Chandra & Agarwal, 2013)

- **เครื่องยึดเหนี่ยว (Fastening system)** ทำหน้าที่ยึดรางให้อยู่กับที่ โดยจำกัดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในแนวราบ แนวตามยาว และแนวตั้งระหว่างรางกับหมอนรองราง ระบบยึดเหนี่ยวแบบยืดหยุ่น (elastic fasteners) ซึ่งให้ความยืดหยุ่นในการจำกัดการเคลื่อนที่ของราง ได้รับการใช้งานอย่างแพร่หลายกับหมอนคอนกรีต และบางครั้งก็ใช้กับหมอนไม้ด้วย (Li et al., 2015; Chandra & Agarwal, 2013)

### 2.1.3 หินโรยทาง (Ballast)

หินโรยทางเป็นวัสดุมวลรวมที่บดละเอียดและมีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม วางเป็นชั้นบนสุดของโครงสร้างรองรับใต้ทางและเป็นชั้นที่สัมผัสโดยตรงกับหมอนรองราง (Li et al., 2015; Indraratna et al., 2023) โดยทั่วไปหินโรยทางจะผลิตจากหินแข็งและแข็งแรง เช่น หินแกรนิต หินบะซอลต์หรือหินควอร์ตไซต์ (Li et al., 2015; Chandra & Agarwal, 2013) และมักจะมีขนาดคละที่สม่ำเสมอ (Uniformly graded) ซึ่งหมายถึงอนุภาคมีขนาดใกล้เคียงกัน (Li et al., 2015)

#### 2.1.3.1 หน้าที่ของหินโรยทาง

หินโรยทางมีบทบาทสำคัญหลายประการในการทำงานของโครงสร้างทางรถไฟที่ดีและได้รับการรองรับอย่างเหมาะสม ดังนี้

- **การรับและกระจายแรง (Load Support and Distribution)** หินโรยทางทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกจากหมอนรองรางและกระจายแรงดังกล่าวออกไปในพื้นที่ที่กว้างขึ้น เพื่อลดความเค้นที่กระทำต่อชั้นรองหินโรยทางและชั้นพื้นคั่นทางด้านล่าง แรงที่กระทำต่อหินโรยทางจะถูกกระจายออกไปในลักษณะคล้ายกรวย ทำให้ความเค้นลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความลึกกลงไปในชั้นหินโรยทางเพิ่มขึ้น

- การคงสภาพทาง (Track Geometry Retention) ด้วยคุณสมบัติการยึดเกาะกันของอนุภาค (particle interlocking) และความต้านทานด้านข้าง (Lateral resistance) หินโรยทางช่วยยึดรางและหมอนรองรางให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง ทั้งในแนวตั้ง แนวราบ และแนวตามยาว ซึ่งมีความสำคัญต่อการรักษาความสม่ำเสมอของรูปทรงทาง (Track geometry) และความปลอดภัยในการเดินรถ

- การระบายน้ำ (Drainage) หินโรยทางถูกออกแบบให้มีช่องว่างระหว่างอนุภาคสูง (Open-graded structure) เพื่ออำนวยความสะดวกในการระบายน้ำฝนและน้ำผิวดินออกจากโครงสร้างทางรถไฟอย่างรวดเร็ว ป้องกันการสะสมของน้ำที่อาจทำให้ชั้นรองรับอ่อนตัวลง และเกิดปัญหาโคลนทะเล็ก (Mud pumping)

- ความยืดหยุ่นและการหน่วงแรง (Resilience and Damping) หินโรยทางช่วยดูดซับและหน่วงแรงกระแทกพลวัต (Dynamic impact forces) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟ ทำให้แรงที่ถ่ายเทลงสู่ชั้นพื้นคันทางลดลง และลดการสั่นสะเทือนที่ส่งผลกระทบต่อความสบายของผู้โดยสาร รวมถึงยืดอายุการใช้งานขององค์ประกอบอื่น ๆ ในโครงสร้างทางรถไฟ

- อำนวยความสะดวกในการบำรุงรักษา (Facilitates maintenance) โครงสร้างแบบหินโรยทางช่วยให้การปรับระดับและจัดแนวทาง (Surfacing and Lining operations) ทำได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการบำรุงรักษาตามปกติ การตอกอัดหินโรยทาง (Tamping) เป็นวิธีการบำรุงรักษาที่สำคัญในการแก้ไขการทรุดตัวของทาง

### 2.1.3.2 คุณสมบัติของหินโรยทาง

คุณสมบัติของหินโรยทางมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพและความทนทานของโครงสร้างทางรถไฟ โดยปัจจัยสำคัญที่พิจารณา ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ ความแข็งแรง และการจัดเรียงขนาด

#### 2.1.3.2.1 ลักษณะทางกายภาพ (Particle Characteristics)

- ขนาดอนุภาค (Particle Size) โดยทั่วไปหินโรยทางจะมีขนาดใหญ่และมีช่วงขนาดที่กำหนดตามมาตรฐาน เช่น AREMA 3 และ AREMA 25 ซึ่งเป็นขนาดคละที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอเมริกาเหนือ ขนาดที่เหมาะสมช่วยให้เกิดการยึดเกาะกันและมีช่องว่างสำหรับการระบายน้ำ

- รูปร่างอนุภาค (Particle Shape) หินโรยทางที่ดีควรมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมคม (Angular) เพื่อให้เกิดการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคได้ดี ซึ่งช่วยเพิ่มความต้านทานด้านข้างและตามยาวของทางรถไฟ และลดการเคลื่อนตัวของหินโรยทาง

- ความขรุขระผิว (Surface Roughness) ผิวที่ขรุขระช่วยเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค ทำให้การยึดเกาะกันดีขึ้นและลดการเคลื่อนตัวของหินโรยทาง

#### 2.1.3.2.2 ความแข็งแรงและความทนทาน (Strength and Durability)

- ความแข็งแรงของหินต้นกำเนิด (Parent Rock Strength) หินโรยทางควรมาจากหินที่มีความแข็งแรงสูงและทนทานต่อการผุพัง เช่น หินแกรนิต หินบะซอลต์ หรือหินควอร์ตไซต์

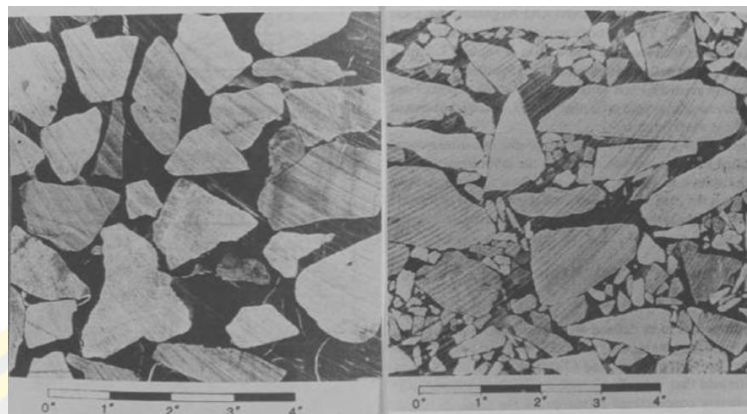
- ความต้านทานการแตกหักและการสึกกร่อน (Crushing and Abrasion Resistance): หินโรยทางต้องสามารถทนทานต่อแรงกดและแรงเฉือนซ้ำ ๆ จากขบวนรถไฟได้ดี เพื่อลดการแตกหักของอนุภาคที่อาจนำไปสู่การปนเปื้อน โดยการทดสอบค่า Aggregate Impact Value (AIV) ใช้เพื่อวัดความต้านทานการกระแทกของหินโรยทาง

#### 2.1.3.2.3 การจัดเรียงขนาด (Particle Size Distribution)

การจัดเรียงขนาดของหินโรยทางมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณสมบัติการระบายน้ำและความสามารถในการรองรับแรง การมีขนาดคละที่เหมาะสมจะช่วยให้มีช่องว่างเพียงพอสำหรับการระบายน้ำและเก็บกักวัสดุปนเปื้อน

- มวลรวมขนาดคละดี (Well-Graded) มีอนุภาคหลากหลายขนาด ซึ่งช่วยให้มวลรวมขนาดเล็กสามารถเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างมวลรวมขนาดใหญ่ได้ดี ทำให้ส่วนผสมมีความหนาแน่นสูงขึ้น

- มวลรวมขนาดคละไม่ดี (Poorly-Graded หรือ Uniformly Graded) อนุภาคมีขนาดใกล้เคียงกันมาก ทำให้มีช่องว่างสูง ซึ่งเหมาะสำหรับการระบายน้ำ แต่ก็อาจมีปัญหาในการยึดเกาะกันและอาจมีการเคลื่อนตัวได้ง่ายกว่า



ภาพที่ 2 ขนาดคละของหินโรยทางตามมาตรฐาน AREMA 3 (ซ้าย) และ AREMA 4 (ขวา) (Li et al., 2015)

#### 2.1.3.2.4 ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับหินโรยทาง

แม้ว่าหินโรยทางจะมีบทบาทสำคัญ แต่ก็มีปัญหาหลายประการที่เกิดขึ้นจากการใช้งานและสภาพแวดล้อม ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพของทางรถไฟและเพิ่มความต้องการในการบำรุงรักษา

#### 2.1.3.3 การปนเปื้อน (Fouling)

การปนเปื้อนของหินโรยทางด้วยอนุภาคละเอียด (fines) เป็นสาเหตุหลักประการหนึ่งที่ทำให้รูปทรงทางรถไฟเสื่อมสภาพลง อนุภาคละเอียดเหล่านี้สามารถมาจากหลายแหล่ง

- การแตกหักของหินโรยทาง (Ballast Breakdown/Degradation) เกิดจากการที่ขอบและมุมที่คมของอนุภาคหินโรยทางแตกหักเนื่องจากความเค้นสูง ณ จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคที่อยู่ติดกันภายใต้แรงกดซ้ำ ๆ จากขบวนรถไฟ ซึ่งลดความเป็นเหลี่ยมคมและมุมเสียดทานภายในของหินโรยทาง
- การแทรกซึมจากชั้นพื้นคั่นทาง (Upward Intrusion from Subgrade) อนุภาคดินละเอียดจากชั้นพื้นคั่นทางที่อ่อนตัวลงและกลายเป็นโคลนเหลว (slurries subgrade) สามารถถูกสูบขึ้นมาปนเปื้อนชั้นหินโรยทางได้ภายใต้แรงกดซ้ำ ๆ จากขบวนรถไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีน้ำขัง

- เศษซากจากภายนอก (External Debris) วัสดุที่ปลิวมากับลมหรือน้ำ หรือการหกหล่นจากขบวนรถไฟขนส่งสินค้า เช่น ถ่านหิน หรือฝุ่นละอองจากสภาพแวดล้อม ก็สามารถปนเปื้อนหินโรยทางได้

#### 2.1.3.3.1 การเสื่อมสภาพของหินโรยทาง (Degradation)

หินโรยทางจะเกิดการเสื่อมสภาพและแตกหักอย่างต่อเนื่องภายใต้การรับแรงแบบเป็นวัฏจักรที่หนักและต่อเนื่องจากขบวนรถไฟ ปัญหานี้มักถูกละเลยในการออกแบบทางรถไฟแบบดั้งเดิมเนื่องจากขาดความเข้าใจในกลไกการแตกหักที่ซับซ้อนและการไม่มีแบบจำลองความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดที่สมจริงซึ่งรวมถึงการเสีรูปพลาสติกและการแตกหักของอนุภาคภายใต้จำนวนรอบการรับแรงจำนวนมาก การเสื่อมสภาพนี้ส่งผลให้ขนาดอนุภาคลดลง เกิดอนุภาคละเอียดเพิ่มขึ้น ซึ่งนำไปสู่การปนเปื้อนและการลดลงของคุณสมบัติทางวิศวกรรมของหินโรยทาง

#### 2.1.3.3.2 การเคลื่อนตัวด้านข้างและตามยาว (Lateral and Longitudinal Movement)

หินโรยทางต้องมีความสามารถในการต้านทานการเคลื่อนตัวด้านข้างและตามยาวของรางและหมอนรองราง การขาดการจำกัดการเคลื่อนที่ด้านข้างที่เพียงพอจากหินโรยทางไหล่ทาง (shoulder ballast) อาจทำให้ทางรถไฟเกิดการโก่งตัวด้านข้าง (Lateral buckling) โดยเฉพาะในสภาพอากาศร้อนที่มีแรงจากอุณหภูมิสูงในรางเชื่อมต่อเนื่อง (CWR)

#### 2.1.3.3.3 ปัญหาการระบายน้ำ (Poor Drainage)

เมื่อช่องว่างในหินโรยทางถูกเติมเต็มด้วยอนุภาคละเอียด ความสามารถในการระบายน้ำของชั้นหินโรยทางจะลดลงอย่างมาก น้ำที่ขังอยู่ในโครงสร้างใต้ทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดการอิมตัวของน้ำ จะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำในช่องว่างและการสูญเสียความแข็งแรงเฉือนและความแข็งแกร่งของหินโรยทาง ซึ่งลดความมั่นคงของทางและเร่งการเสื่อมสภาพขององค์ประกอบทาง ปัญหาการสูบโคลน (mud pumping) ซึ่งเกิดจากการที่ดินละเอียดจากชั้นพื้นคันทางที่อิมตัวด้วยน้ำถูกดันขึ้นมาปนเปื้อนชั้นหินโรยทาง ทำให้เกิดปัญหาการระบายน้ำที่รุนแรงในทาง

### 2.1.4 ชั้นรองหินโรยทาง (Sub-ballast/Capping Layer)

ชั้นรองหินโรยทาง หรือที่เรียกว่าชั้นรองพื้น (Blanket) เป็นชั้นวัสดุรวมรวมที่อยู่ระหว่างหินโรยทางกับชั้นพื้นคั่นทาง โดยทั่วไปประกอบด้วยกรวดและทรายที่มีขนาดคละกว้าง (Broadly graded) ชั้นนี้มีบทบาทสำคัญในการเสริมประสิทธิภาพของหินโรยทางและป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับชั้นพื้นคั่นทาง

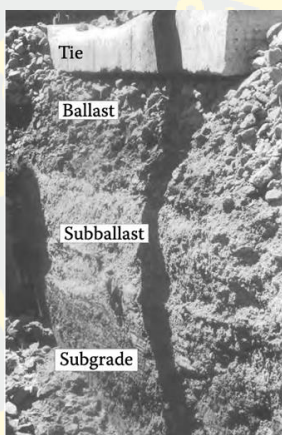
#### 2.1.4.1 หน้าที่ของชั้นรองหินโรยทาง

- การกระจายแรง (Load Distribution) ชั้นรองหินโรยทางช่วยกระจายแรงที่ถ่ายทอดมาจากชั้นหินโรยทางให้กว้างขึ้น เพื่อลดความเค้นที่กระทำต่อชั้นพื้นคั่นทางด้านล่างให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้
- การป้องกันการปนเปื้อนและการผสม (Prevention of Fouling and Mixing) เป็นชั้นแยก (Separator) ที่สำคัญที่ช่วยป้องกันไม่ให้อนุภาคดินละเอียดจากชั้นพื้นคั่นทางแทรกซึมขึ้นมาปนเปื้อนชั้นหินโรยทาง และป้องกันไม่ให้หินโรยทางขนาดใหญ่ตกลงไปในชั้นพื้นคั่นทางโดยตรง
- การป้องกันการกระทำของน้ำแข็ง (Protection from Frost Action) ในพื้นที่ที่มีอากาศหนาวเย็น ชั้นรองหินโรยทางสามารถช่วยป้องกันปัญหาการบวมตัวของน้ำแข็ง (Frost heave) ที่อาจเกิดขึ้นในชั้นพื้นคั่นทางได้ โดยการป้องกันการสะสมของน้ำในชั้นดินที่ไวต่อการเยือกแข็ง
- การระบายน้ำ (Drainage) ชั้นรองหินโรยทางควรมีความสามารถในการระบายน้ำได้ดี เพื่อระบายน้ำที่ไหลลงมาจากชั้นหินโรยทาง และระบายน้ำใต้ดินที่อาจไหลขึ้นมาจากชั้นพื้นคั่นทาง

#### 2.1.4.2 ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับชั้นรองหินโรยทาง

ปัญหาที่พบบ่อยคือการอิมตัวของน้ำในชั้นรองหินโรยทาง ซึ่งเกิดจากการระบายน้ำที่ไม่เพียงพอ เช่น การเกิดแอ่งทุดตัวในชั้นพื้นคั่นทางที่กักเก็บน้ำ หรือการจัดเรียงขนาดของวัสดุในชั้นรองหินโรยทางที่ทำให้การซึมผ่านของน้ำไม่ดี (Li et al., 2015) ภายใต้อิทธิพลของแรงลัทธิไฟฟ้ากระทำซ้ำ ๆ การอิมตัวของน้ำจะนำไปสู่การเสียรูปที่สำคัญและอาจเกิดความเสียหายอย่างรวดเร็ว

ในชั้นรองหินโรยทางได้ น้ำที่สะสมไม่เพียงแต่อ่อนตัวดินละเอียดในชั้นพื้นคั่นทางเท่านั้น แต่ยังลดความแข็งแรงของชั้นรองหินโรยทางอย่างมาก และลดความสามารถในการกระจายแรงที่กระทำลงไป (Read & Li, 1995)



ภาพที่ 3 ลักษณะของชั้นต่าง ๆ ของทางรถไฟ (Li et al., 2015)

### 2.1.5 ชั้นพื้นคั่นทาง (Subgrade/Formation)

ชั้นพื้นคั่นทางคือชั้นดินธรรมชาติหรือชั้นดินถมที่บดอัดแน่น ซึ่งเป็นฐานรากที่โครงสร้างทางรถไฟทั้งหมดตั้งแต่ชั้นรองหินโรยทางขึ้นไปถูกสร้างขึ้น หน้าที่หลักของชั้นพื้นคั่นทางคือการเป็นฐานรากของทางรถไฟ โดยให้การรองรับที่สม่ำเสมอและเพียงพอต่อการรับน้ำหนักของรถไฟ

#### 2.1.5.1 หน้าที่ของชั้นพื้นคั่นทาง

- การรองรับโครงสร้าง (Structural Support) ชั้นพื้นคั่นทางต้องสามารถรองรับน้ำหนักของโครงสร้างทางรถไฟทั้งหมดและน้ำหนักบรรทุกจากขบวนรถไฟที่ถูกกระจายลงมาได้โดยไม่เกิดการวิบัติหรือการเสียรูปที่มากเกินไป
- ความมั่นคงในระยะยาว (Long-term Stability) ชั้นพื้นคั่นทางควรได้รับการออกแบบให้มีความมั่นคงตลอดเวลา และไม่ได้รับผลกระทบมากเกินไปจากสภาพแวดล้อม เช่น วัฏจักรเปียก-แห้ง และการเยือกแข็ง-ละลาย

- การระบายน้ำ (Drainage) ควรได้รับการออกแบบให้สามารถระบายน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินออกจากโครงสร้างทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อป้องกันการอ่อนตัวของดิน

### 2.1.5.2 ปัญหาที่พบบ่อยในชั้นพื้นคั่นทาง

แรงล้อยอดไฟจะลดลงอย่างมากเมื่อถ่ายเทมาถึงชั้นพื้นคั่นทาง แต่ผลกระทบของแรงเหล่านี้สามารถแผ่ขยายลงไปได้หลายเมตรใต้หมอนรองราง หากชั้นพื้นคั่นทางรับแรงเกินกำลังที่ออกแบบไว้ อาจเกิดปัญหาดังต่อไปนี้

- การบิดเบี้ยวแบบสะสม (Cumulative Plastic Deformation) หรือที่เรียกว่า "Ballast pocket" ซึ่งเป็นการเสียรูปถาวรที่สะสมเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ภายใต้แรงล้อยอดไฟที่กระทำซ้ำ ๆ การเสียรูปนี้อาจเกิดจากการอิมตัวของน้ำในดินละเอียดและแรงกดซ้ำ ๆ จากการเดินรถ
- การวิบัติเฉือนแบบก้าวหน้า (Progressive Shear Failure) หรือ การบีบตัวของชั้นพื้นคั่นทาง (Subgrade squeezing) ซึ่งเป็นรูปแบบการวิบัติที่รุนแรงกว่า โดยดินในชั้นพื้นคั่นทางจะถูกดันขึ้นมาด้านข้างหรือด้านบน (Li et al., 2015) ดังแสดงในภาพที่ 4
- โคลนทะลัก (Mud Pumping/Soil Fluidization): ในพื้นที่ที่มีดินละเอียดและอิมตัวด้วยน้ำ แรงกดจากการเดินรถไฟสามารถทำให้ดินกลายเป็นโคลนเหลวและถูกดันขึ้นมาปนเปื้อนชั้นหินโรยทางได้ ซึ่งเป็นปัญหาที่รุนแรงและแก้ไขได้ยาก เนื่องจากลดความสามารถในการระบายน้ำและทำให้ทางทรุดตัวอย่างรวดเร็ว (Indraratna et al., 2023) ปัญหาเหล่านี้จะนำไปสู่การเสื่อมสภาพของรูปทรงทางรถไฟ ซึ่งจะเร่งให้เกิดแรงพลวัตจากล้อยอดไฟเพิ่มขึ้น และทำให้การเสื่อมสภาพของทางรุนแรงขึ้น



ภาพที่ 4 การเสียรูปของชั้นพื้นคั่นทางแบบก้าวหน้า (Progressive Shear Failure)

(Li et al., 2015)

## 2.2 กลไกการถ่ายแรงในโครงสร้างทางรถไฟ

กลไกการถ่ายแรงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบและบำรุงรักษาโครงสร้างทางรถไฟแบบหินโรยทาง แรงจากล้อรถไฟจะถูกถ่ายเทและกระจายผ่านองค์ประกอบต่าง ๆ ของโครงสร้างทาง ตั้งแต่ส่วนบนสุดลงไปจนถึงชั้นพื้นคันทาง (Li et al., 2015; Indraratna et al., 2023; Selig & Waters, 1994) โดยมีลำดับการถ่ายแรงดังนี้

- จากล้อสู่ราง: ล้อรถไฟจะถ่ายเทน้ำหนักบรรทุกโดยตรงไปยังราง
- จากรางสู่หมอนรองราง: รางจะถ่ายเทแรงลงสู่หมอนรองรางผ่านระบบยึดเหนี่ยว
- จากหมอนรองรางสู่หินโรยทาง: หมอนรองรางจะกระจายแรงลงสู่ชั้นหินโรยทาง ซึ่งเป็นชั้นรับแรงหลักและกระจายแรงออกไปในพื้นที่ที่กว้างขึ้น (Indraratna et al., 2023)
- จากหินโรยทางสู่ชั้นรองหินโรยทาง: หินโรยทางจะกระจายแรงออกไปในพื้นที่ที่กว้างขึ้นและถ่ายเทลงสู่ชั้นรองหินโรยทาง
- จากชั้นรองหินโรยทางสู่ชั้นพื้นคันทาง: ชั้นรองหินโรยทางจะกระจายแรงต่อไปยังชั้นพื้นคันทาง ซึ่งเป็นฐานรากสุดท้ายที่รับแรง (Li et al., 2015)

### 2.2.1 ลักษณะของแรงที่กระทำ

โครงสร้างทางรถไฟต้องเผชิญกับแรงหลายประเภท (Li et al., 2015, 2016; Agarwal & Chandra, 2013)

- แรงสถิต (Static Loading) คือน้ำหนักบรรทุกของขบวนรถไฟที่หยุดนิ่ง แรงนี้จะถูกกระจายอย่างสม่ำเสมอผ่านโครงสร้างทาง
- แรงเป็นวัฏจักร (Cyclic Loading) คือแรงที่กระทำซ้ำ ๆ จากการเคลื่อนที่ของล้อรถไฟ แรงนี้เป็นสาเหตุหลักของการเสียรูปพลาสติกสะสม (cumulative plastic deformation) และการเสื่อมสภาพของวัสดุในระยะยาว (Indraratna et al., 2023)
- แรงพลวัต/แรงกระแทก (Dynamic/Impact Loading) เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของรถไฟด้วยความเร็วสูง ความไม่สม่ำเสมอของราง (เช่น รอยต่อราง, การโก่งตัว) หรือความบกพร่องของล้อรถไฟ (เช่น ล้อแบน) แรงกระแทกเหล่านี้สามารถสูงกว่าแรงสถิตได้หลายเท่าและเป็นสาเหตุสำคัญของการแตกหักของหินโรยทางและการเสื่อมสภาพขององค์ประกอบทาง ค่า

Impact Factor ( $\phi$ ) เป็นตัวบ่งชี้ถึงผลกระทบของแรงพลวัต ซึ่งสามารถคำนวณได้จากหลายวิธี เช่น ORE method หรือ Eisenmann's curve ซึ่งพิจารณาจากความเร็วรถไฟและสภาพทาง (Indraratna et al., 2023)

### 2.2.2 การคำนวณแรงพลวัตและโมดูลัสของทาง

ในการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างทางรถไฟ การประเมินแรงพลวัตที่เกิดขึ้นจากขบวนรถไฟเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากแรงเหล่านี้มีผลโดยตรงต่อการเสื่อมสภาพของวัสดุและประสิทธิภาพของทางรถไฟ แรงพลวัตมักแสดงในรูปของ Impact Factor ( $\phi$ ) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของแรงพลวัตสูงสุดต่อแรงสถิต (Chandra & Agarwal, 2013) หนึ่งในสมการที่นิยมใช้ในการประมาณค่า Impact Factor มักได้จากข้อเสนอแนะของ American Railway Engineering Association (AREA) ดังแสดงในสมการที่ (1) และ (2) (Indraratna et al., 2023,)

$$P_d = \phi P_s \quad (1)$$

$$\phi = 1 + \frac{0.0052V}{D_w} \quad (2)$$

เมื่อ  $P_d$  คือน้ำหนักกดล้อสำหรับล้อออกแบบ (กิโลนิวตัน)  $P_s$  คือน้ำหนักกดล้อแบบสถิต (กิโลนิวตัน)  $V$  คือ ความเร็วของรถไฟ (กม./ชั่วโมง) และ  $D_w$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อรถไฟ (เมตร) สมการนี้แสดงให้เห็นถึงความเร็วของรถไฟที่สูงขึ้นส่งผลถึงแรงพลวัตที่กระทำต่อทางรถไฟสูงขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงความสำคัญของการออกแบบและการบำรุงรักษาทางรถไฟสำหรับรถไฟความเร็วสูง

นอกจากนี้ คุณสมบัติทางกลของทางรถไฟโดยรวมสามารถอธิบายได้ด้วย โมดูลัสของทาง (Track Modulus,  $U$ ) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแกร่งหรือความอ่อนตัวของทางรถไฟในการรองรับแรงในแนวดิ่ง (Li et al., 2015) โมดูลัสทางสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำ การทรุดตัวของทาง และความยาวของหมอนรองรางที่รองรับแรงดังแสดงในสมการที่ (3)

$$U = \frac{P_s}{yL} \quad (3)$$

เมื่อ  $U$  คือโมดูลัสของทาง (แรง/พื้นที่/ความยาว)  $P_s$  คือน้ำหนักกดล้อแบบสถิต (นิวตัน)  $y$  คือการทรุดตัวในแนวดิ่งของราง (มิลลิเมตร) และ  $L$  คือ ความยาวประสิทธิผลของหมอนรองรางที่รองรับแรง (มิลลิเมตร)

## 2.3 กลไกของหินสปรก (Ballast Fouling) และการเกิดโคลนทะเล็ก (Mud Pumping)

### 2.3.1 กลไกการเกิดหินสปรก (Ballast Fouling)

การเกิดหินสปรก (Ballast Fouling) คือกระบวนการที่ช่องว่างภายในชั้นหินโรยทางถูกอุดตันหรือปนเปื้อนด้วยวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าเม็ดหินโรยทาง ซึ่งโดยทั่วไปเป็นอนุภาคดินละเอียด เศษหินที่แตกหัก หรือวัสดุอื่น ๆ (Aursudkij, 2007) กลไกหลักที่นำไปสู่การปนเปื้อนนี้มาจากหลายแหล่งที่ทำงานร่วมกันหรือเกิดขึ้นแยกกัน

- การแตกหักของหินโรยทาง (Ballast Degradation/Breakdown) เป็นกลไกที่สำคัญที่สุด โดยเฉพาะในสายทางรถไฟที่มีการจราจรหนาแน่นและมีน้ำหนักบรรทุกสูง เม็ดหินโรยทางซึ่งมีความแข็งและมุมที่แหลมคมจะเกิดการเสียดสี การบิ่น และการแตกหักเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กอย่างต่อเนื่องภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic loading) และแรงกระแทกจากล้อรถไฟ การแตกหักนี้ทำให้ความคมและมุมของหินลดลงอย่างถาวรและส่งผลให้มุมแรงเสียดทานภายในของชั้นหินโรยทางลดลงตามไปด้วย ทำให้ความสามารถในการรองรับและกระจายแรงลดลง (Indraratna et al., 2023; Lim, 2004)

- การปนเปื้อนจากภายนอก (External Infiltration) วัสดุที่มาจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่ตกลงบนทางรถไฟ เช่น เศษสินค้าที่หล่นหรือรั่วไหลจากขบวนรถบรรทุกสินค้า (เช่น ถ่านหิน แร่ธาตุต่างๆ), ฝุ่นละอองในอากาศที่ปลิวมาตกบนทางรถไฟ หรือถูกพัดพามากับลมและ

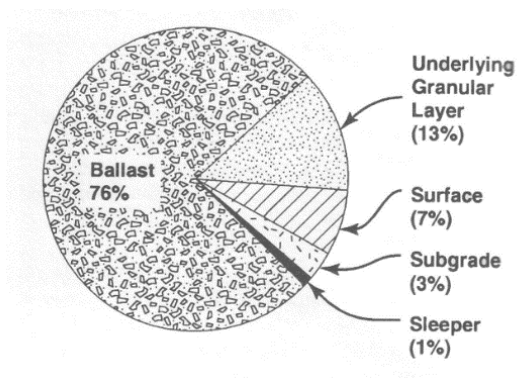
น้ำฝน การสึกหรอของส่วนประกอบอื่น ๆ ของทางรถไฟ เช่น หมอนรองราง หรือเครื่องยึดเหนี่ยว ก็ สามารถสร้างอนุภาคละเอียดมาปนเปื้อนได้เช่นกัน (Lim, 2004)

- การเคลื่อนที่ขึ้นของวัสดุจากชั้นใต้ดิน (Subgrade Infiltration/Interfacial Movement) อนุภาคดินละเอียดจากชั้นรองหินโรยทาง (Sub-ballast) หรือดินคั่นทาง (Subgrade) ที่อยู่ด้านล่าง สามารถเคลื่อนที่ขึ้นมาปนเปื้อนในชั้นหินโรยทางได้ โดยเฉพาะในกรณีที่ดินคั่นทาง อ่อนแอ อิ่มตัวด้วยน้ำ และมีแรงดันน้ำในช่องว่างสูงจากการสัญจรของรถไฟ กลไกนี้มีความ เกี่ยวข้องโดยตรงกับการเกิดโคลนทะเล็ก (Indraratna et al., 2023)

ดัชนีการปนเปื้อน (Fouling Index, FI) เป็นตัวชี้วัดที่ใช้ประเมินระดับการ ปนเปื้อนของหินโรยทาง (Selig and Waters, 1994; Aursudkij, 2007; Indraratna et al., 2023) ซึ่งมีสมการพื้นฐานดังสมการที่ (4)

$$FI = P_4 + P_{200} \quad (4)$$

เมื่อ  $P_4$  คือร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุที่ผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (ตะแกรงเบอร์ 4) และ  $P_{200}$  คือร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (ตะแกรงเบอร์ 200) โดยสามารถสรุปดัชนีการปนเปื้อนของหินโรยทาง (ballast fouling index) ดัง แสดงในตารางที่ 1 โดยภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่าสาเหตุหลักของการปนเปื้อนในชั้นหินโรยทางใน ทวีปอเมริกาเหนือ คือการสลายตัวของ เอง (Selig & Waters, 1994) แต่ในทางตรงกันข้ามจาก การประเมินของ British railways พบว่าส่วนประกอบที่ทำให้เกิดการปนเปื้อน (fouling) มาจาก การปนเปื้อนคือแหล่งภายนอก (external input) ซึ่งมีสัดส่วนมากที่สุดถึงร้อยละ 52 และยังพบว่า หลังจากการขจัดวัสดุปนเปื้อนออกแล้ว อนุภาคของหินโรยทาง ยังคงอยู่ในสภาพการทำงานที่ดีแม้ จะผ่านการใช้งานมา 15 ปี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการสลายตัวของหินโรยทาง (ballast breakdown) ไม่ใช่สาเหตุหลักของการปนเปื้อนดังแสดงในตารางที่ 2



ภาพที่ 5 แหล่งปนเปื้อนในชั้นหินโรยทางของอเมริกาเหนือ (Selig and Waters, 1994)

ตารางที่ 1 ดัชนีการปนเปื้อน (Fouling index)

ดัชนีการปนเปื้อน (%)	ระดับการปนเปื้อน
น้อยกว่า 1	สะอาด (Clean)
1 ถึง น้อยกว่า 10	ค่อนข้างสะอาด (Moderately clean)
10 ถึง น้อยกว่า 20	ปนเปื้อนปานกลาง (Moderately fouled)
20 ถึง น้อยกว่า 40	ปนเปื้อน (Fouled)
ตั้งแต่ 40 ขึ้นไป	ปนเปื้อนมาก (Highly fouled)

ตารางที่ 2 แหล่งปนเปื้อนในชั้นหินโรยทางของ British Railways (Selig and Waters, 1994)

ลำดับ	แหล่งที่มา	กก./หมอนรองรางรถไฟ	% ของทั้งหมด
1	ส่วนที่มาพร้อมกับ Ballast (2%)	29	7
	การบดอัด (Tamping)		
2	7 ครั้ง/ รอบการซ่อมบำรุง	88	20
	การบดอัด 1 ครั้ง/ปี เป็นเวลา 15 ปี ที่ 4 กก./ครั้ง		

ตารางที่ 2 (ต่อ)

	การกัดกร่อนจากสาเหตุต่างๆ รวมถึงการสัญจระและการสึกหรอ		
3	ของหมอนรถไฟคอนกรีต (น้ำหนัก จากการจราจร: 0.2 กก./หมอน รถไฟ/ล้านตันของการสัญจระ)	90	21
4	สิ่งเจือปนจากภายนอก 15 กก./ปี การหกรั่วจากตู้โดยสาร 4.0 กก./ ตร.ม./ปีฝุ่นในอากาศ 0.8 กก./ตร. ม./ปี	225	52
	รวม	432	100

### 2.3.2 กลไกการเกิดโคลนทะเล็ก (Mud Pumping)

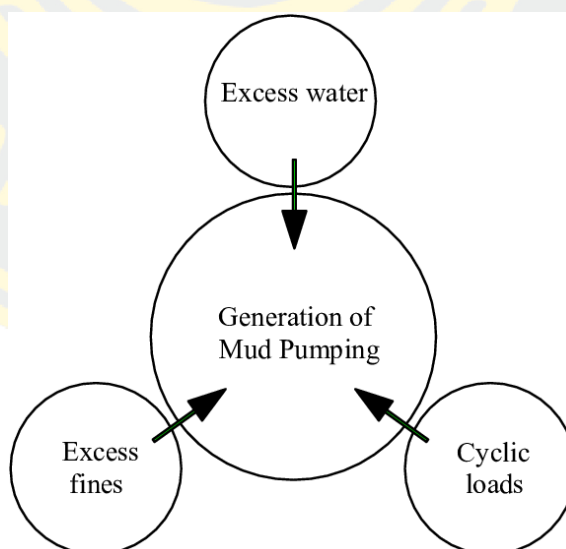
การเกิดโคลนทะเล็ก (Mud Pumping) เป็นปรากฏการณ์ที่ดินคั่นทางซึ่งมีลักษณะเป็นดินเหนียวละเอียดและอิมตัวด้วยน้ำ ถูกบีบดันขึ้นมาแทรกปนอยู่ในชั้นหินโรยทางผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดหินอย่างรุนแรง ทำให้เกิดการปนเปื้อนของหินโรยทางด้วยดินโคลน โดยเฉพาะเมื่อมีการสัญจระของรถไฟผ่านบนทางรถไฟนั้นๆ (Indraratna et al., 2023) กลไกหลักของการเกิดโคลนทะเล็กเป็นผลจากปฏิสัมพันธ์ของสามปัจจัยหลักได้แก่

- ดินคั่นทางที่มีอนุภาคละเอียดมากเกินไป (Excess Fines): ดินคั่นทางที่มีสัดส่วนของอนุภาคขนาดทรายแป้ง (Silt) หรือดินเหนียว (Clay) สูง มีแนวโน้มที่จะเกิดโคลนทะเล็กได้ง่ายกว่าดินประเภทอื่น เนื่องจากอนุภาคเหล่านี้มีขนาดเล็กมากและสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายเมื่อมีน้ำอยู่มาก การปนเปื้อนจากชั้นใต้ดินอาจรวมถึงดินโคลนจากดินคั่นทางโดยตรง (subgrade mud pumping) หรือฝุ่นละอองและสารละเอียดอื่นๆ ที่สะสมอยู่ในหินโรยทางเอง (ballast mud pumping) (Usman et al., 2015)
- แรงกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic Loading): แรงกดและแรงสั่นสะเทือนซ้ำๆ ที่ส่งผ่านจากล้อรถไฟ หมอนรองราง และหินโรยทางลงสู่ดินคั่นทาง จะสร้างแรงดันน้ำในช่องว่างส่วนเกิน (excess pore water pressure) ภายในดินคั่นทาง แรงดันนี้เป็นแรงขับเคลื่อนหลักที่ดัน

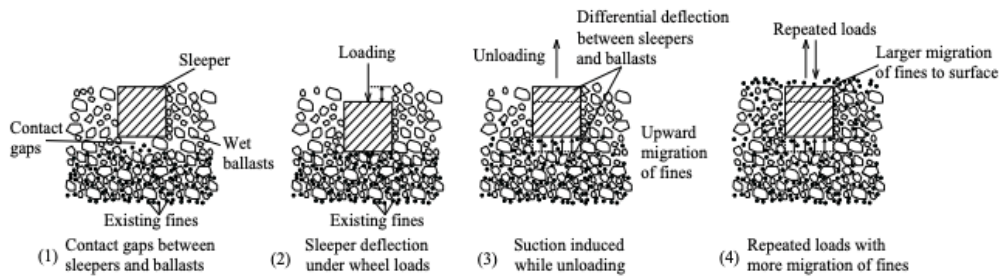
โคลนเหลวจากชั้นดินคันทางให้เคลื่อนที่ขึ้นไปด้านบนสู่ชั้นหินรอยทางผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดหิน (Li et al., 2015; Nguyen et al., 2019)

### 2.3.3 วงจรการเกิดโคลนทะเล็ก

เมื่อรถไฟวิ่งผ่านหมอนรองรางจะถูกกดลง ทำให้แรงดันน้ำในช่องว่างใต้หมอนรองรางเพิ่มขึ้น หลังจากรถไฟผ่านไป หมอนรองรางจะคืนตัวกลับสู่ตำแหน่งเดิมอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดแรงดูด (suction effect) ใต้หมอนรองรางในบริเวณที่หินรอยทางแข็งตัว แรงดูดนี้สามารถดึงน้ำและโคลนจากบริเวณรอบๆ เข้ามาในช่องว่างใต้หมอนรองรางได้ ซึ่งนำไปสู่การก่อตัวของ ช่องโคลนทะเล็ก (mud pumping channels) และทำให้ดินละเอียดในชั้นดินคันทางถูกบีบขึ้นมาบนชั้นหินรอยทางอย่างต่อเนื่อง (Nguyen et al., 2019). สภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวย การสัมผัสที่ไม่ดีระหว่างหมอนรองรางกับหินรอยทาง และการกระจุกตัวของความเค้น/ความเครียดในบางส่วนของทางรถไฟ เช่น รอยต่อราง ทางแยก หรือบริเวณเปลี่ยนผ่าน (transition zones) สามารถเร่งการเริ่มต้นของปัญหาโคลนทะเล็กได้ (Nguyen et al., 2019)



ภาพที่ 6 ปัจจัยสำคัญของการเกิดโคลนทะเล็ก (Mud pumping) (Nguyen et al., 2019)



ภาพที่ 7 กลไกการดูดขึ้นของโคลนทะเล็ก (Takatoshi, 1997; Nguyen et al., 2019)

## 2.4 การเกิด Cementation ในวัสดุเม็ดหยาบแนวคิดการยึดเกาะของฝุ่นกับหิน

### 2.4.1 การเกิด Cementation ในวัสดุเม็ดหยาบ

เป็นกระบวนการทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นเมื่อมีการสะสมของแร่ธาตุประกอบหรือสารเคมีในช่องว่างระหว่างเม็ดหิน ทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างเม็ดหินและส่งผลต่อสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ Mitchell & Soga (2005) อธิบายว่า cementation เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการตกตะกอนของสารประกอบแคลเซียม ซิลิกา เหล็ก และแมงกานีส ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารประสาน (binding agent) ระหว่างเม็ดหิน กลไกการเกิด Cementation สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก คือ chemical cementation, physical cementation และ biological cementation

- Chemical cementation เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างน้ำใต้ดินกับแร่ธาตุในหิน ส่งผลให้เกิดการตกตะกอนของสารประกอบใหม่ที่ทำหน้าที่เป็นสารประสาน Consoli et al. (2007) พบว่า การเกิด cementation ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เป็นกลไกที่พบมากที่สุด ในธรรมชาติ เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีความสามารถในการยึดเกาะที่ดีที่สุดและมีความเสถียรในสภาพแวดล้อมทั่วไป

- Physical cementation เกิดจากการสะสมของอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็กในช่องว่างระหว่างเม็ดหิน เมื่อเวลาผ่านไป อนุภาคเหล่านี้จะมีการบีบอัดและเกิดการยึดเกาะทางกายภาพ ส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างเม็ดหิน Fernández-Steeger et al. (2007) กลไกนี้พบได้บ่อยในสภาพแวดล้อมที่มีการเคลื่อนที่ของน้ำและการสะสมของตะกอนอย่างต่อเนื่อง

- Biological cementation เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่สามารถเร่งปฏิกิริยาการตกตะกอนของแร่ธาตุ DeJong et al. (2013) รายงานว่า แบคทีเรียบางประเภท เช่น

Bacillus pasteurii สามารถเร่งปฏิกิริยาการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต ผ่านกระบวนการ Microbially induced calcite precipitation (MICP) ซึ่งเป็นกลไกที่มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรม

ตารางที่ 3 รูปแบบกลไกการเกิด Cementation ประเภทต่าง ๆ Mitchell & Soga (2005); DeJong et al. (2013); Consoli et al. (2007)

ประเภท Cementation	กลไกการเกิด	สารประสาน	ความแข็งแรง/ความทนทาน	การประยุกต์ใช้
Chemical	ปฏิกิริยาเคมี การตกตะกอน	CaCO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	สูง/สูง	วัสดุก่อสร้าง, หินโรยทาง
Physical	การบีบอัด การสะสมฝุ่น	อนุภาคฝุ่น ละของ	ปานกลาง/ปานกลาง	ดินเหนียว, วัสดุเติม
Biological	กิจกรรม จุลินทรีย์	CaCO <sub>3</sub> (MICP)	สูง/ปานกลาง	การปรับปรุงดิน, สิ่งแวดล้อม

หมายเหตุ MICP = Microbially Induced Calcite Precipitation

#### 2.4.2 การยึดเกาะของฝุ่นกับหิน

แนวคิดการยึดเกาะของฝุ่นกับหินเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิด

Cementation ในวัสดุเม็ดหยาบ Ghirian และ Fall (2013) ศึกษาการยึดเกาะระหว่างอนุภาคฝุ่นละอองกับพื้นผิวหิน และพบว่า ลักษณะพื้นผิวหิน องค์ประกอบทางเคมี และสภาพแวดล้อมมีผลต่อการยึดเกาะอย่างมีนัยสำคัญ

การยึดเกาะทางกายภาพเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่อยู่บนพื้นผิวหิน (Van der Waals forces) และแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic forces) Israelachvili (2011) อธิบายว่า พื้นผิวหินที่มีความหยาบจะมีพื้นที่สัมผัสที่มากกว่า ทำให้เกิดการยึดเกาะทางกายภาพ

ที่แข็งแกร่งขึ้น นอกจากนี้ รูปพรุนขนาดเล็กบนพื้นผิวหินยังทำหน้าที่เป็นที่เก็บกักอนุภาคฝุ่น ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการยึดเกาะ

การยึดเกาะทางเคมีเกิดจากการเกิดพันธะเคมีระหว่างสารประกอบบนพื้นผิวหินกับอนุภาคฝุ่น Parks (1965) และ Sposito (2008) รายงานว่า ไฮดรอกไซด์และออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียมที่อยู่บนพื้นผิวหินสามารถเกิดพันธะเคมีกับอนุภาคฝุ่นที่มีประจุตรงข้าม การเกิดพันธะเคมีนี้จะแข็งแกร่งกว่าการยึดเกาะทางกายภาพ และมีความเสถียรมากกว่าในสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง

### 2.4.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิด Cementation

#### 2.4.3.1 ปัจจัยทางเคมี

ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำใต้ดินเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิด cementation Chou & Wollast (1984) พบว่า ที่ pH สูง (8-9) การตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตจะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า ในขณะที่ pH ต่ำ (< 6) จะส่งเสริมการละลายของแร่ธาตุ ทำให้เกิดการขนส่งไอออนที่จำเป็นสำหรับการเกิด cementation ความเข้มข้นของไอออนในน้ำใต้ดิน โดยเฉพาะ  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , และ  $\text{HCO}_3^-$  มีผลต่อการเกิด cementation ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต Morse & Arvidson (2002) อธิบายว่า ดัชนีความอิ่มตัว (Saturation index) ของแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถใช้ทำนายแนวโน้มการเกิด cementation ได้ เมื่อดัชนีความอิ่มตัวมากกว่า 1 จะเกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

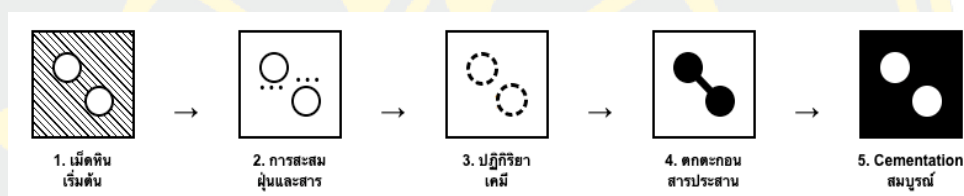
ตารางที่ 4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิด Cementation

ปัจจัย	ค่าที่เหมาะสม	ผลกระทบต่อ Cementation	อ้างอิง
pH	8.0-9.0	เพิ่มการตกตะกอน $\text{CaCO}_3$	Chou & Wollast (1984)

ตารางที่ 4 (ต่อ)

อุณหภูมิ	20-30°C	เพิ่มอัตราปฏิกิริยา	Plummer & Busenberg (1982)
ความดัน	> 100 kPa	เพิ่มพื้นที่สัมผัส	Marone et al. (1990)
Ca <sup>2+</sup>	> 50 mg/L	เพิ่มการเกิด CaCO <sub>3</sub>	Morse & Arvidson (2002)
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	> 30 mg/L	เพิ่มการตกตะกอน	Morse & Arvidson (2002)
จุลินทรีย์	10 <sup>5</sup> -10 <sup>7</sup> CFU/mL	เร่งการเกิด MICP	Stocks-Fischer et al. (1999)

หมายเหตุ CFU = Colony Forming Unit



ภาพที่ 8 กลไกการเกิด Cementation ในวัสดุเม็ดหยาบ Boggs, S. (2022); Tucker, M. E. (2021); Pettijohn, F. J. et. al. (2020)

#### 2.4.3.2 ปัจจัยทางกายภาพ

อุณหภูมิมีผลต่อการเกิด cementation ในหลายแง่มุม Plummer & Busenberg (1982) พบว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี แต่ในขณะเดียวกันก็ลดความสามารถในการละลายของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ ซึ่งมีผลต่อการเกิด cementation ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ความดันและความเค็มที่กระทำต่อวัสดุเม็ดหยาบมีผลต่อการเกิด cementation Marone et al. (1990) รายงานว่า ความดันที่สูงจะเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดหิน ทำให้เกิดการยึดเกาะที่แข็งแกร่งขึ้น นอกจากนี้ การเค็มแบบไดนามิกจะเร่งการเกิด Cementation ผ่านกลไกการบีบอัดและการเคลื่อนที่ของน้ำในช่องว่าง

### 2.4.3.3 ปัจจัยทางชีวภาพ

จุลินทรีย์มีบทบาทสำคัญในการเกิด cementation ผ่านกิจกรรมทางชีวภาพ Stocks-Fischer et al. (1999) ศึกษาการเกิด cementation ที่เกิดจากจุลินทรีย์ และพบว่าแบคทีเรียสามารถเร่งการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตผ่านการผลิตเอนไซม์ urease ซึ่งเร่งการย่อยสลายของยูเรียเป็นแอมโมเนียและคาร์บอนไดออกไซด์ การมีอยู่ของสารอินทรีย์ในดินและน้ำใต้ดินยังมีผลต่อการเกิด Cementation Warren et al. (2001) พบว่า กรดอินทรีย์ที่เกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์สามารถเร่งการละลายของแร่ธาตุ ทำให้เกิดการขนส่งไอออนที่จำเป็นสำหรับการเกิด cementation

### 2.4.4 การเกิด Cementation ในชั้นหินรอยทางรถไฟ

หินรอยทางรถไฟเป็นวัสดุเม็ดหยาบที่มีบทบาทสำคัญในการรองรับน้ำหนักและกระจายแรงจากรถไฟ Selig และ Waters (1994) อธิบายว่า หินรอยทางรถไฟจะต้องมีสมบัติที่เหมาะสมในด้านความแข็งแรง ความทนทาน และการระบายน้ำ การเกิด cementation ในหินรอยทางรถไฟอาจส่งผลกระทบต่อทั้งในเชิงบวกและลบ

#### 2.4.4.1 ผลกระทบเชิงบวกของ Cementation

การเกิด Cementation ในหินรอยทางรถไฟสามารถเพิ่มความแข็งแรงและความเสถียรของโครงสร้าง Indraratna et al. (2011) พบว่า การเกิด cementation เล็กน้อยสามารถลดการเคลื่อนที่ของเม็ดหิน (lateral spreading) และเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือน ซึ่งช่วยให้โครงสร้างทางรถไฟมีความเสถียรมากขึ้น การเกิด cementation ยังช่วยลดการสึกหรอระหว่างเม็ดหิน (attrition) ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในหินรอยทางรถไฟ Lim & McDowell (2005) รายงานว่า การมีสารประสานระหว่างเม็ดหินจะช่วยกระจายแรงที่กระทำต่อหิน ทำให้เกิดการสึกหรอน้อยลง และยืดอายุการใช้งานของหินรอยทางรถไฟ

#### 2.4.4.2 ผลกระทบเชิงลบของ Cementation

การเกิด Cementation มากเกินไปในหินรอยทางรถไฟอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงสร้าง Feldman & Nissen (2002) พบว่า การเกิด cementation ที่มากเกินไปจะลดความสามารถในการระบายน้ำ (Drainage capacity) ของหินรอย ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาการสะสมของน้ำและการอ่อนตัวของโครงสร้างทางรถไฟได้ ดังนั้นการเกิด Cementation ยังทำให้หินรอยทางรถไฟมีความเปราะมากขึ้น จึงอาจเกิดการแตกร้าวเมื่อได้รับแรงกระแทกหรือการสั่นสะเทือนจากรถไฟ Profillidis (2000) อธิบายว่า การเกิด cementation ที่ไม่สม่ำเสมอจะทำให้เกิดจุดอ่อนในโครงสร้าง ซึ่งอาจนำไปสู่ความเสียหายของทางรถไฟ

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลกระทบของ Cementation ต่อหินรอยทางรถไฟ Indraratna et al. (2011), Feldman & Nissen (2002), Lim & McDowell (2005)

ระดับ Cementation	ข้อดี	ข้อเสีย	สมบัติที่เปลี่ยนแปลง
น้อย (< 2%)	เพิ่มความเสถียร และลดการเคลื่อนที่ของเม็ด	เปลี่ยนแปลงน้อย	Permeability ลดลง 10-20% ความแข็งแรงเพิ่ม 15-30%
ปานกลาง (2-5%)	เพิ่มความแข็งแรง และลดการสึกหรอ	ลดการระบายน้ำ เพิ่มความเปราะ	Permeability ลดลง 30-50% ความแข็งแรงเพิ่ม 50-80%
สูง (> 5%)	ความแข็งแรงสูง	การระบายน้ำไม่ดี แตกร้าวง่าย ยากต่อการบำรุงรักษา	Permeability ลดลง > 70% ความแข็งแรงเพิ่ม > 100%

หมายเหตุ ระดับ Cementation คำนวณจากน้ำหนักของสารประสานต่อน้ำหนักรวมของวัสดุ

#### 2.4.4.3 การจัดการ Cementation ในหินรอยทางรถไฟ

การจัดการการเกิด cementation ในหินรอยทางรถไฟต้องอาศัยการสมดุลระหว่างประโยชน์และข้อเสียที่อาจเกิดขึ้น Huang et al. (2009) เสนอแนวทางการจัดการผ่านการควบคุมการระคายน้ำ การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม และการบำรุงรักษาที่เหมาะสม

การใช้สารยับยั้งการเกิด cementation เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่มีการศึกษาวิจัย Ferreira et al. (2011) ทดลองใช้สารประกอบออร์แกนิกเพื่อยับยั้งการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตในหินรอยทางรถไฟ และพบว่า สารยับยั้งสามารถลดการเกิด cementation ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 2.4.5 การประยุกต์ใช้ในวัสดุก่อสร้าง

การเกิด cementation ในวัสดุก่อสร้างเม็ดหยาบมีการประยุกต์ใช้ที่หลากหลายทั้งในด้านการปรับปรุงสมบัติของวัสดุและการพัฒนาวัสดุใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง

##### 2.4.5.1 การปรับปรุงดิน (Soil Improvement)

การใช้เทคนิค Cementation ในการปรับปรุงดินมีการพัฒนาอย่างกว้างขวาง Consoli et al. (2007) ศึกษาการใช้ซีเมนต์ผสมกับวัสดุเม็ดหยาบเพื่อปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงของดิน และพบว่า การเกิด cementation สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดและแรงเฉือนได้อย่างมีนัยสำคัญ

การใช้ปูนขาวในการปรับปรุงดินเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่อาศัยหลักการของ cementation Little (1995) อธิบายว่า ปูนขาวจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับแร่ธาตุในดิน ส่งผลให้เกิดการตกตะกอนของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารประสาน

##### 2.4.5.2 การพัฒนาวัสดุใหม่

การประยุกต์ใช้ Biological cementation ในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างใหม่เป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูง Achal et al. (2011) ศึกษาการใช้แบคทีเรียในการผลิตวัสดุก่อสร้างที่เป็น

มิตรกับสิ่งแวดล้อม และพบว่า แบคทีเรียสามารถเร่งการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้ขี้เถ้าลอย (fly ash) และ กากตะกั่วเหล็ก (slag) ในการสร้าง Cementation เป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืน Mehta และ Monteiro (2006) รายงานว่า fly ash และ slag สามารถเกิดปฏิกิริยา pozzolanic กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้เกิดการตกตะกอนของ C-S-H ที่มีความแข็งแรงสูง

#### 2.4.5.3 การควบคุมคุณภาพ

การควบคุมคุณภาพของการเกิด Cementation ในวัสดุก่อสร้างจำเป็นต้องมีการติดตามและประเมินผลอย่างต่อเนื่อง Coop และ Atkinson (1993) เสนอแนวทางการประเมินคุณภาพของ Cementation ผ่านการทดสอบความแข็งแรงอัด ความแข็งแรงดึง และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ การใช้เทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive testing) เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง Santamarina & Fam (1997) ศึกษาการใช้คลื่นเสียงในการประเมินคุณภาพของ cementation และพบว่า ความเร็วของคลื่นเสียงสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของการเกิด Cementation ได้

#### 2.4.6 ผลกระทบต่อสมบัติทางวิศวกรรม

การเกิด Cementation ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุเม็ดหยาบในหลายด้าน ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาและทำความเข้าใจอย่างครอบคลุมเพื่อประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสม

##### 2.4.6.1 ความแข็งแรงเชิงกล

การเกิด Cementation ส่งผลให้ความแข็งแรงอัดของวัสดุเม็ดหยาบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ Clough et al. (1981) พบว่า การเกิด Cementation เพียงเล็กน้อย (1-2% โดยน้ำหนัก) สามารถเพิ่มความแข็งแรงอัดได้ถึง 2-3 เท่า ซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นของการยึดเกาะระหว่างเม็ดหิน

กำลังรับแรงเฉือนของวัสดุที่เกิด Cementation จะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารประสาน Schnaid et al. (2001) ศึกษาผลของ Cementation ต่อพฤติกรรมเฉือนของวัสดุ

เม็ดหยาบ และพบว่า การเกิด cementation จะเพิ่มค่ามุมเสียดทาน (Friction angle) และความเหนียวหรือแรงยึดเกาะ (Cohesion) ของวัสดุ

ตารางที่ 6 ผลกระทบของ Cementation ต่อสมบัติทางเชิงกลของวัสดุเม็ดหยาบ Clough et al. (1981), Schnaid et al. (2001), Tatsuoka et al. (1997), Kenney et al. (1985)

สมบัติวัสดุ	วัสดุปกติ	Cementation 2%	Cementation 5%	การเปลี่ยนแปลง (%)
ความแข็งแรงอัด (MPa)	2.5-5.0	6.0-12.0	15.0-25.0	+200 ถึง +400
ความแข็งแรง เฉือน (°)	32-38	40-45	45-52	+25 ถึง +37
Cohesion (kPa)	0-5	15-30	50-80	+300 ถึง +1500
โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	0.1-0.3	0.5-1.2	1.5-3.0	+400 ถึง +900
Permeability (m/s)	$10^{-3}$ - $10^{-4}$	$10^{-4}$ - $10^{-5}$	$10^{-5}$ - $10^{-6}$	-70 ถึง -90

#### 2.4.6.2 ความเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุที่เกิด cementation จะแตกต่างจากวัสดุเม็ดหยาบทั่วไป Leroueil และ Vaughan (1990) รายงานว่า การเกิด Cementation จะลดความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformability) ของวัสดุ ทำให้วัสดุมีความเปราะมากขึ้น

ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus) ของวัสดุที่เกิด cementation จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณและคุณภาพของสารประสาน Tatsuoka et al. (1997) พบว่า การเกิด Cementation สามารถเพิ่มค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นได้ถึง 5-10 เท่า ซึ่งส่งผลต่อพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้าง

#### 2.4.6.3 การซึมผ่านของน้ำ

การเกิด Cementation ส่งผลกระทบต่อการซึมผ่านของน้ำในวัสดุเม็ดหยาบ อย่างมีนัยสำคัญ Kenney et al. (1985) พบว่า การเกิด Cementation จะลดสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Permeability) เนื่องจากการอุดตันของช่องว่างและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของรูพรุน

การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างรูพรุนจะส่งผลต่อการไหลของน้ำในวัสดุ Koseki et al. (2005) ศึกษาผลของ Cementation ต่อการกระจายตัวของรูพรุนในวัสดุเม็ดหยาบ และพบว่า การเกิด Cementation จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากรูพรุนขนาดใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก ส่งผลต่อลักษณะการไหลของน้ำ

#### 2.4.6.4 ความทนทานและอายุการใช้งาน

ความทนทานของวัสดุที่เกิด cementation จะขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของสารประสาน Cuccovillo และ Coop (1999) พบว่า Cementation ที่เกิดจากแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีความทนทานต่อการกัดกร่อนและการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมมากกว่า Cementation ที่เกิดจากสารประกอบอื่น การประเมินอายุการใช้งานของวัสดุที่เกิด Cementation จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยหลายด้าน รวมถึงสภาพแวดล้อม ภาระการใช้งาน และคุณภาพของสารประสาน Burland (1990) เสนอแนวทางการประเมินอายุการใช้งานผ่านการศึกษากฎวัฏจักรมระยะยาวของวัสดุภายใต้สภาพการใช้งานจริง

#### 2.4.7 การติดตามและการประเมินผล

การติดตามและประเมินผลเกิดการเกิด Cementation ในวัสดุเม็ดหยาบเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการควบคุมคุณภาพและการพัฒนาเทคนิคใหม่ ๆ การพัฒนาเทคนิคการตรวจสอบและการติดตามจึงเป็นสิ่งจำเป็น

#### 2.4.7.1 เทคนิคการตรวจสอบแบบทำลาย

การทดสอบความแข็งแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำ (Unconfined compression test) เป็นเทคนิคมาตรฐานที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของ Cementation ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การทดสอบความแข็งแรงดึงแบบแยกออกจากกัน (Splitting tensile test) เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ให้ข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับคุณภาพของ Cementation Rocco et al. (2001) พบว่า อัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงอัดสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของการเกิด Cementation ได้

การทดสอบ Cement value ของวัสดุ Aggregate ที่เสื่อมสภาพเป็นเทคนิคสำคัญที่พัฒนาขึ้นเพื่อประเมินคุณภาพของการเกิด Cementation ในวัสดุที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว Raymond (1979) ได้ทำการศึกษาการทดสอบ Cement value ของ aggregate ที่เสื่อมสภาพ และพบว่า การทดสอบนี้สามารถให้ข้อมูลที่มีค่าเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุที่เกิดจาก Cementation ในระยะยาว การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า Aggregate ที่ผ่านการใช้งาน จะมีการเปลี่ยนแปลงของ Cement value อันเป็นผลมาจากการสะสมของสารประกอบที่ทำหน้าที่เป็นสารประสานในช่องว่างระหว่างเม็ดหิน

การศึกษาของ Raymond (1979) เป็นงานวิจัยบุกเบิกที่ให้ความสำคัญกับการประเมินการเสื่อมสภาพของ Aggregate ผ่านการทดสอบ Cement value จากงานวิจัยได้วางรากฐานสำคัญในการทำความเข้าใจว่า การใช้งาน Aggregate ในระยะยาวจะส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิด Cementation ที่เกิดจากการสะสมของฝุ่นละอองและการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารประกอบต่าง ๆ ในสภาพแวดล้อมการใช้งานจริง การศึกษานี้ได้เปิดทางให้เกิดการพัฒนาเทคนิคการทดสอบและการประเมินผลที่ละเอียดและแม่นยำมากขึ้นในภายหลัง ทั้งนี้ Cementation value จากหินที่เสื่อมสภาพมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเกิด Cementation และการสะสมของสารประกอบที่ทำหน้าที่เป็นสารประสาน การค้นพบนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการพัฒนาแนวทางการบำรุงรักษาและการจัดการคุณภาพของ aggregate ในระบบ transportation โดยเฉพาะในการประยุกต์ใช้กับหินโรยทางรถไฟ ซึ่งต้องการการติดตามและการประเมินผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติในระยะยาว

การทดสอบการซึมผ่านของน้ำ (Permeability test) เป็นการทดสอบที่สำคัญ สำหรับการประเมินผลกระทบของ Cementation ต่อสมบัติการไหลของน้ำ Chapuis (2004) อธิบายว่า การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสามารถสะท้อนให้เห็นถึงระดับของการเกิด Cementation ได้

#### 2.4.7.2 เทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

การใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic testing) เป็นเทคนิคที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องสำหรับการประเมินการเกิด Cementation Santamarina & Fam (1997) ศึกษาการใช้คลื่นเสียงในการประเมินความแข็งแรงของวัสดุที่เกิด cementation และพบว่า ความเร็วของคลื่นเสียงมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับความแข็งแรงอัดของวัสดุ

การใช้เทคนิคการสั่นสะเทือน (Vibration testing) เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่มีศักยภาพในการประเมินคุณภาพของ Cementation Cascante et al. (2003) พบว่า ความถี่การสั่นสะเทือนธรรมชาติของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปตามระดับของการเกิด cementation ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพได้

การใช้เทคนิคทางภาพ (Imaging techniques) เช่น X-ray computed tomography (CT) และ Scanning electron microscopy (SEM) ช่วยให้เราสามารถตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของ Cementation ได้ Desrues et al. (2006) ใช้เทคนิค X-ray CT ในการศึกษาการกระจายตัวของสารประสานในวัสดุเม็ดหยาบ และพบว่า เทคนิคนี้สามารถให้ข้อมูลที่มีค่าเกี่ยวกับคุณภาพและความสม่ำเสมอของ Cementation

#### 2.4.7.3 การติดตามระยะยาว

การติดตามระยะยาวของการเกิด Cementation ในสภาพแวดล้อมจริงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการทำความเข้าใจพฤติกรรมของวัสดุ Airey & Fahey (1991) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่เกิด Cementation ในระยะยาว และพบว่า การเกิด Cementation จะมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในช่วงแรก จากนั้นจะเข้าสู่ระยะที่เสถียร

การใช้เซนเซอร์ฝังตัว (Embedded sensors) เป็นเทคนิคที่มีการพัฒนาสำหรับการติดตามระยะยาว O'Brien & Ellis (2004) ทดลองใช้เซนเซอร์วัดความเค้นและความชื้นในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของสมบัติวัสดุที่เกิด Cementation และพบว่า เซนเซอร์สามารถให้ข้อมูลที่มีค่าเกี่ยวกับการพัฒนาของ Cementation ได้

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบเทคนิคการตรวจสอบ Cementation Santamarina & Fam (1997), Cascante et al. (2003), Desrues et al. (2006), Rocco et al. (2001)

เทคนิค	ประเภท	ข้อดี	ข้อเสีย	ความแม่นยำ	ต้นทุน
Unconfined Compression	ทำลาย	ผลตรงต่อสมบัติ	ทำลายตัวอย่าง	สูง	ต่ำ
Splitting Tensile	ทำลาย	ประเมิน brittleness	ทำลายตัวอย่าง	ปานกลาง	ต่ำ
Permeability Test	ทำลาย	ผลต่อการระบายน้ำ	ใช้เวลานาน	สูง	ปานกลาง
Ultrasonic Testing	ไม่ทำลาย	รวดเร็ว ไม่ทำลาย	ต้องสอบเทียบ	ปานกลาง	ปานกลาง
Vibration Testing	ไม่ทำลาย	in-situ monitoring	ผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม	ปานกลาง	สูง
X-ray CT Scan	ไม่ทำลาย	ภาพจุลภาค 3D	อุปกรณ์ราคาสูง	สูงมาก	สูงมาก

#### 2.4.8 ความท้าทายและแนวทางการแก้ไขปัญหา

การเกิด Cementation ในวัสดุเม็ดหยาบมีความท้าทายหลายประการที่จำเป็นต้องมีการแก้ไขและพัฒนาเทคนิคใหม่ ๆ เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

#### 2.4.8.1 ความไม่สม่ำเสมอของการเกิด Cementation

ความไม่สม่ำเสมอของการเกิด Cementation เป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพและความเชื่อถือได้ของวัสดุ Cuccovillo และ Coop (1997) พบว่า การเกิด Cementation ที่ไม่สม่ำเสมอจะทำให้เกิดจุดอ่อนในโครงสร้าง ซึ่งอาจนำไปสู่ความล้มเหลวของระบบ

การแก้ไขปัญหาคความไม่สม่ำเสมอสามารถทำได้ผ่านการปรับปรุงเทคนิคการผสมและการกระจายตัวของสารประสาน Ismail et al. (2002) เสนอแนวทางการใช้เทคนิคการผสมแบบบังคับ (Forced mixing) เพื่อให้ได้การกระจายตัวของสารประสานที่สม่ำเสมอมากขึ้น

การใช้สารปรับปรุงการกระจายตัว (Dispersing agents) เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่มีการศึกษาวิจัย Sobolev และ Ferrada-Gutiérrez (2005) ทดลองใช้สารประกอบโพลีเมอร์ในการปรับปรุงการกระจายตัวของสารประสาน และพบว่า สารเหล่านี้สามารถปรับปรุงความสม่ำเสมอของการเกิด Cementation ได้

#### 2.4.8.2 การควบคุมอัตราการเกิด Cementation

การควบคุมอัตราการเกิด Cementation เป็นความท้าทายสำคัญในการประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ในงานวิศวกรรม Mitchell และ Santamarina (2005) อธิบายว่า การเกิด Cementation ที่เร็วเกินไปอาจทำให้เกิดความเปราะในวัสดุ ในขณะที่การเกิด Cementation ที่ช้าเกินไปอาจไม่ให้ผลที่ต้องการ

การใช้สารควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate modifiers) เป็นแนวทางหนึ่งที่มีการพัฒนา Aitcin (2000) ศึกษาการใช้สารหน่วงเวลา (Retarders) และสารเร่งปฏิกิริยา (Accelerators) ในการควบคุมอัตราการเกิด Cementation และพบว่า สารเหล่านี้สามารถควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การควบคุมสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และ pH เป็นอีกวิธีหนึ่งในการควบคุมอัตราการเกิด Cementation Mindess et al. (2003) รายงานว่า การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอย่างเหมาะสมสามารถช่วยให้ได้อัตราการเกิด cementation ที่ต้องการ

### 2.4.8.3 ความทนทานต่อสภาพแวดล้อม

ความทนทานของ cementation ต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องพิจารณา Ehlen et al. (1999) พบว่า การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความชื้น และ pH สามารถส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของ Cementation ได้

การพัฒนาสารประสานที่มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมสูงเป็นแนวทางหนึ่งที่มีการศึกษาวิจัย Shi et al. (2006) ศึกษาการใช้สารประสานที่มีพื้นฐานจากโพลีเมอร์ในการเพิ่มความทนทานของ Cementation ต่อสภาพแวดล้อม และพบว่า สารเหล่านี้สามารถเพิ่มความทนทานได้อย่างมีนัยสำคัญ

การใช้สารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion inhibitors) เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่มีศักยภาพ Bentur & Mitchell (2008) ทดลองใช้สารป้องกันการกัดกร่อนในการเพิ่มความทนทานของ Cementation ต่อสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อน และพบว่า สารเหล่านี้สามารถยืดอายุการใช้งานของวัสดุได้

## 2.5 หลักการของ GPR ในงานด้านวิศวกรรมทางรถไฟ

Ground Penetrating Radar (GPR) เป็นเทคโนโลยีทางภูมิฟิสิกส์ที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงในการสำรวจโครงสร้างใต้ดิน ซึ่งได้รับการพัฒนาและประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมทางรถไฟอย่างแพร่หลาย เนื่องจากความสามารถในการตรวจสอบสภาพของโครงสร้างรองรับรางรถไฟ การประเมินความหนาแน่นของดินใต้ราง และการตรวจหาความเสียหายของโครงสร้างต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในการเดินรถ (Annan, 2009; Benedetto et al., 2017)

การใช้ GPR ในงานวิศวกรรมทางรถไฟมีความสำคัญเป็นพิเศษ เนื่องจากระบบรางรถไฟต้องการการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่องและการตรวจสอบสภาพของโครงสร้างรองรับที่มีความแข็งแรงและเสถียรภาพเพียงพอ (Hugenschmidt, 2000; Sussmann et al., 2001) ทั้งนี้ GPR

สามารถให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับสภาพของดินเดิม ชั้นรองรับวาง และโครงสร้างต่างๆ ที่อยู่ใต้ดิน โดยไม่ต้องทำการขุดเจาะหรือทำลายโครงสร้างที่มีอยู่ โดยหลักการของ GPR เกิดจากการส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves) จากเสาอากาศต้นกำเนิดสัญญาณลงสู่พื้นดิน คลื่นดังกล่าวจะสะท้อนกลับในลักษณะกระจายตัว (Reflection and scattering) โดยคลื่นที่สะท้อนกลับมานั้นเป็นในรูปแบบของพลังงานที่มีลักษณะเฉพาะจากการสะท้อนกลับ เครื่องรับสัญญาณที่ได้จะทำการบันทึกและแปลผล ซึ่ง GPR นั้นเป็นรูปแบบใช้วิธีการสะท้อนเสียงกลับ (Pulse-echo) ซึ่งแสดงในภาพที่ 2-10

### 2.5.1 หลักการทำงานของ GPR

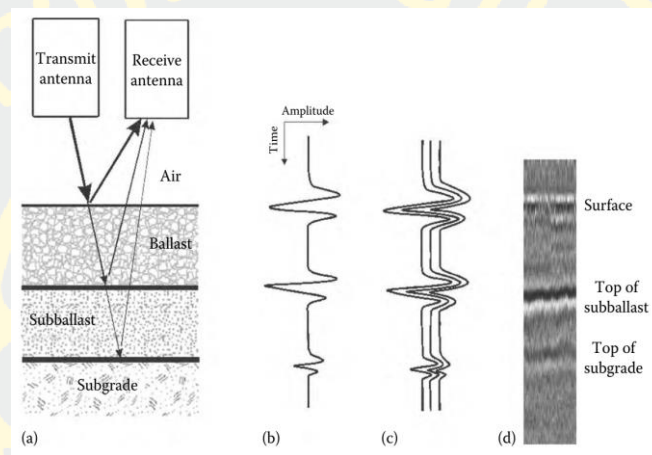
GPR ทำงานโดยอาศัยหลักการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 10 MHz ถึง 2.5 GHz) ลงไปในดินหรือวัสดุต่างๆ ผ่านเสาอากาศส่งสัญญาณ (Transmitting Antenna) คลื่นเหล่านี้จะเดินทางผ่านชั้นวัสดุต่างๆ ใต้ดิน และเมื่อพบกับการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) ของวัสดุ คลื่นส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับมายังผิวดิน และถูกรับโดยเสาอากาศรับสัญญาณ (Receiving Antenna) (Daniels, 2004) หลักการพื้นฐานของการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของ Fresnel ซึ่งแสดงถึงสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) ที่ขอบเขตระหว่างวัสดุสองชนิดที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่างกัน ดังสมการที่ (5)

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (5)$$

เมื่อ R คือสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $\epsilon_1$  และ  $\epsilon_2$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุชั้นบนและชั้นล่างตามลำดับ (Joi, 2009) ความเร็วในการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในวัสดุต่างๆ ขึ้นอยู่กับสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุนั้นๆ โดยเฉพาะค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) และค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

เมื่อ  $v$  คือความเร็วคลื่นในวัสดุ  $c$  คือความเร็วแสงในอากาศ ( $3 \times 10^8$  เมตร/วินาที), และ  $\epsilon_r$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (Davis & Annan, 1989)



ภาพที่ 9 หลักการทำงานของ GPR เมื่อสะท้อนลงในพื้น (JP Hyslip, Olhoeft, Smith, & Selig, 2005; Li, Hyslip, Sussmann, & Chrismer, 2015)

### 2.5.2 ความถี่และการเจาะทะลุของ GPR

การเลือกความถี่ของ GPR เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการเจาะทะลุและความละเอียดของการตรวจสอบ โดยทั่วไปจะมีความสัมพันธ์แบบผกผันระหว่างความถี่กับความสามารถในการเจาะทะลุ นั่นคือ ความถี่ต่ำจะให้ความสามารถในการเจาะทะลุที่ลึกกว่า แต่ให้ความละเอียดที่ต่ำกว่า ในขณะที่ความถี่สูงจะให้ความละเอียดที่ดีกว่า แต่ความสามารถในการเจาะทะลุจะน้อยกว่า (Conyers, 2013) ในงานวิศวกรรมทางรถไฟ การเลือกความถี่ที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการสำรวจ สำหรับการตรวจสอบความหนาแน่นของชั้นรองรับราง (Ballast) และสภาพของดินใต้ราง (Subgrade) มักจะใช้ความถี่ในช่วง 400-800 Mhz ซึ่งให้ความสมดุลที่ดีระหว่างความสามารถในการเจาะทะลุและความละเอียดในการตรวจสอบ (Gallagher et al., 1999)

### 2.5.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่ส่งผลต่อ GPR

การเดินทางและการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใน GPR ถูกควบคุมโดยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ซึ่งประกอบด้วย 3 พารามิเตอร์หลัก คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) และค่าการซึมผ่านแม่เหล็ก (Magnetic Permeability) (Reynolds, 2011) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon_r$ ) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดสำหรับ GPR เนื่องจากควบคุมความเร็วการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและความแรงของการสะท้อน ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุต่างๆ ที่พบในระบบรถไฟมีค่าที่แตกต่างกันอย่างมาก เช่น อากาศมีค่าเท่ากับ 1, น้ำมีค่าประมาณ 81, และดินแห้งมีค่าประมาณ 3-7 (Topp et al., 1980) ตารางที่ 8 แสดงถึงตัวอย่างของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและความเร็วคลื่นของวัสดุต่างๆ

ตารางที่ 8 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและความเร็วคลื่นของวัสดุต่างๆ ในระบบรถไฟ

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon_r$ )	ความเร็วคลื่น (m/ns)	ค่าการนำไฟฟ้า (mS/m)
อากาศ	1	0.30	0
ดินแห้ง	3-7	0.13	0.01-1
ดินเปียก	10-30	0.06-0.09	1-100
หินปูนแข็ง	7-9	0.10-0.11	0.5-2
กรวด (หินโรยทาง)	4-6	0.12-0.15	0.1-1
คอนกรีต	6-8	0.11-0.12	2-20
เหล็ก	-	0	$\infty$
น้ำ	81	0.033	0.5-5

ค่าการนำไฟฟ้า ( $\sigma$ ) มีผลต่อการลดทอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในขณะที่เดินทางผ่านวัสดุ วัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงจะทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลดทอนได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งลด

ความสามารถในการเจาะทะลุของ GPR ในงานรถไฟ ปัจจุบันนี้สำคัญเป็นพิเศษเมื่อมีการปนเปื้อนของเกลือหรือน้ำที่มีแร่ธาตุสูงในดิน (Olhoeft, 1998) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและความสามารถในการเจาะทะลุของ GPR สามารถแสดงได้ด้วยสมการของ Skin Depth ( $\delta$ ) ดังแสดงในสมการที่ 7

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}} \quad (7)$$

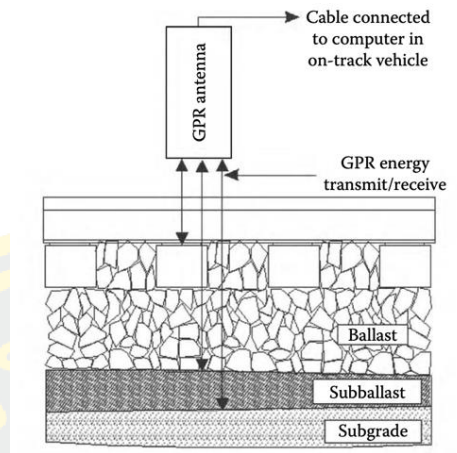
เมื่อ  $\delta$  คือ Skin Depth,  $\mu$  คือค่าการซึมผ่านแม่เหล็ก,  $\omega$  คือความถี่เชิงมุม, และ  $\sigma$  คือค่าการนำไฟฟ้า (Sheriff & Geldart, 1995)

#### 2.5.4 การประยุกต์ใช้ GPR ในการตรวจสอบโครงสร้างรองรับรางรถไฟ

ระบบรางรถไฟประกอบด้วยโครงสร้างหลายชั้นที่มีหน้าที่รองรับน้ำหนักและแรงกระทำจากรถไฟ การตรวจสอบสภาพของโครงสร้างเหล่านี้ด้วย GPR มีความสำคัญต่อการบำรุงรักษาและความปลอดภัยในการเดินรถ โดยโครงสร้างรองรับรางรถไฟโดยทั่วไปประกอบด้วย

- ชั้นรองรับราง (Ballast Layer) เป็นชั้นของหินกรวดที่มีขนาดเฉพาะ มีหน้าที่กระจายน้ำหนักและให้การระบายน้ำ
- ชั้นรองรับย่อย (Sub-ballast Layer) เป็นชั้นของวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่า ballast ทำหน้าที่กรองและป้องกันการปนเปื้อนระหว่างชั้น
- ชั้นดินเดิม (Subgrade) เป็นชั้นดินธรรมชาติที่รองรับน้ำหนักจากโครงสร้างข้างบน

GPR สามารถตรวจสอบความหนาและความสม่ำเสมอของแต่ละชั้น รวมถึงการตรวจหาบริเวณที่มีการปนเปื้อนหรือการเปลี่ยนแปลงของสมบัติวัสดุ (Sussmann et al., 2003) การศึกษาของ Clark (2001) พบว่า GPR สามารถแยกแยะชั้นต่างๆ ของโครงสร้างรองรับรางได้อย่างชัดเจน และสามารถตรวจพบบริเวณที่มีการปนเปื้อนของวัสดุละเอียดในชั้นหินโรยทางได้



ภาพที่ 10 โครงสร้างรองรับรางรถไฟและการตรวจสอบด้วย GPR (Li et al., 2015)

การใช้ GPR ในการตรวจสอบ ballast มีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถทำการตรวจสอบได้อย่างต่อเนื่องในขณะที่รถไฟยังคงเดินทางปกติ (Benedetto et al., 2016) นอกจากนี้ยังสามารถตรวจพบปัญหาต่างๆ ได้ เช่น

- การปนเปื้อนของวัสดุละเอียด (Fouling) ในชั้นหินโรยทาง
- การสะสมของน้ำในบริเวณที่มีการระบายน้ำไม่ดี
- การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของวัสดุในแต่ละชั้นโครงสร้างทาง
- การปรากฏของช่องว่างหรือการหลุดตัวของแต่ละชั้นโครงสร้างทาง

#### 2.5.4.1 การตรวจสอบปนเปื้อนของหินโรยทางด้วย GPR

การปนเปื้อนของหินโรยทาง (Ballast Fouling) เป็นปัญหาสำคัญในการบำรุงรักษาทางรถไฟ โดยหมายถึงการสะสมของวัสดุละเอียดในช่องว่างระหว่างเม็ดหินโรยทาง ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของชั้นรองรับรางในหลายด้าน ได้แก่ การลดลงของความสามารถในการระบายน้ำ การเปลี่ยนแปลงของความยืดหยุ่นในการรับน้ำหนัก และการลดลงของเสถียรภาพของราง (Selig & Waters, 1994; Indraratna et al., 2011) ประเภทและสาเหตุของการปนเปื้อนของหินโรยทางสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท

- การปนเปื้อนจากภายนอก (External Fouling): เกิดจากการรูกูล้ำของวัสดุละเอียดจากชั้นดินเดิม (Subgrade) หรือชั้นรองรับย่อย (Sub-ballast) เข้ามาในชั้นหินโรย

ทาง สาเหตุหลักได้แก่ การสูบน้ำ (Pumping) ของดินเหนียวจากชั้นดินเดิม การกัดเซาะของวัสดุ ละเอียดจากชั้นรองรับ หรือการนำวัสดุละเอียดจากภายนอกเข้ามาปนเปื้อน

- การปนเปื้อนจากภายใน (Internal Fouling): เกิดจากการสลายตัวและการสึกกร่อนของเม็ดหินโรยทางเอง เนื่องจากแรงกระแทกและการบดขยี้จากน้ำหนักรถไฟ ปัจจุบันที่ส่งผลต่อการปนเปื้อนประเภทนี้ ได้แก่ คุณภาพของหินโรยทาง ความถี่ของการเดินรถ และน้ำหนักของรถไฟ (Feldman & Nissen, 2002)

ผลกระทบของการปนเปื้อนของหินโรยทางส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของโครงสร้างรางรถไฟในหลายด้าน

- การลดลงของการระบายน้ำ วัสดุละเอียดจะเติมเต็มช่องว่างระหว่างเม็ดหินโรยทาง ลดความสามารถในการระบายน้ำ ส่งผลให้เกิดการสะสมของน้ำและเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดปัญหาเสถียรภาพ

- การเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกล การปนเปื้อนจะเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic Modulus) และสัมประสิทธิ์ของเบด (Bed Coefficient) ของชั้นรองรับ ส่งผลต่อการกระจายน้ำหนักและความเสถียรของราง

- การเพิ่มขึ้นของความต้านทานต่อการเคลื่อนไหวยว: วัสดุละเอียดจะสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดหินโรยทาง ทำให้เกิดความต้านทานต่อการปรับตัวของราง (Huang et al., 2009)

GPR เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบการปนเปื้อนของหินโรยทาง เนื่องจากสามารถแยกแยะความแตกต่างของสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างหินโรยทางที่สะอาดกับหินโรยทางที่มีการปนเปื้อน การศึกษาของ Leng & Gabr (2002) และ Roberts et al. (2006) แสดงให้เห็นว่า GPR สามารถตรวจพบและประเมินระดับการปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 2.5.4.2 หลักการตรวจสอบการปนเปื้อน

การตรวจสอบการปนเปื้อนของหินโรยทางด้วย GPR อาศัยหลักการดังต่อไปนี้

- การเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก วัสดุละเอียดที่ปนเปื้อนมักมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าหินโรยทางสะอาด โดยเฉพาะเมื่อมีความชื้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเร็วคลื่นและความแรงของสัญญาณสะท้อน

- การเปลี่ยนแปลงของการสะท้อนจากชั้นรองรับ การปนเปื้อนจะลดความชัดเจนของขอบเขตระหว่างชั้นหินรอยทางกับชั้นรองรับย่อย เนื่องจากความแตกต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง
- การเปลี่ยนแปลงของการลดทอนสัญญาณ หินรอยทางที่มีการปนเปื้อน จะมีการลดทอนสัญญาณมากกว่าหินรอยทางสะอาด โดยเฉพาะเมื่อมีความชื้น (Al-Qadi et al., 2010)

ตารางที่ 9 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของหินรอยทางในสภาพต่าง ๆ Sussmann et al. (2003); Plati & Loizos (2013)

สภาพของหินรอยทาง	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon_r$ )	ความเร็วคลื่น (m/ns)	ระดับการปนเปื้อน (%)
หินรอยทางสะอาด แห้ง	4-5	0.13-0.15	0-10
หินรอยทางปนเปื้อนเล็กน้อย	6-8	0.11-0.12	10-30
หินรอยทางปนเปื้อนปานกลาง	9-12	0.09-0.10	30-50
หินรอยทางปนเปื้อนมาก	13-18	0.07-0.08	50-80
หินรอยทางปนเปื้อนรุนแรง	19-25	0.06-0.07	>80

#### 2.5.4.3 ตัวชี้วัดการปนเปื้อน

การประเมินระดับการปนเปื้อนด้วย GPR ใช้ตัวชี้วัดหลายตัวอันได้แก่

- Fouling Index (FI) คำนวณจากอัตราส่วนของความแรงสัญญาณสะท้อนจากชั้นรองรับต่อความแรงสัญญาณตรง
- Dielectric Contrast ความแตกต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกระหว่างชั้นหินรอยทางกับชั้นรองรับ
- Attenuation Rate อัตราการลดทอนของสัญญาณในชั้นหินรอยทาง

### 2.5.5 การตรวจสอบสภาพดินเดิม (Subgrade) ด้วย GPR

ชั้นดินเดิมเป็นส่วนสำคัญของโครงสร้างรองรับรางรถไฟ เนื่องจากรับน้ำหนักสุดท้ายจากระบบทั้งหมด การมีจุดอ่อนหรือการเปลี่ยนแปลงของสมบัติดินเดิมอาจส่งผลให้เกิดการทรุดตัวของราง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของราง หรือความเสียหายต่อโครงสร้างรองรับ (Selig & Waters, 1994) การพัฒนาการใช้งาน GPR สามารถตรวจสอบสภาพของดินเดิมได้หลายรูปแบบได้แก่

- การตรวจสอบความชื้น: ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของดินมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณความชื้น GPR สามารถตรวจวัดการกระจายของความชื้นในดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Huisman et al., 2003) การศึกษาของ Leng & Gabr (2002) แสดงให้เห็นว่า GPR สามารถตรวจพบการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินที่อาจส่งผลต่อความแข็งแรงและเสถียรภาพของดินเดิม
- การตรวจหาช่องว่างหรือการกัดเซาะ: ในบริเวณที่มีการไหลซึมของน้ำใต้ดิน อาจเกิดการกัดเซาะของดินเดิม ส่งผลให้เกิดช่องว่างหรือการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นดิน GPR สามารถตรวจพบความผิดปกติเหล่านี้ได้ (Benedetto et al., 2010)
- การประเมินความแข็งแรงของดิน: แม้ว่า GPR จะไม่สามารถวัดความแข็งแรงของดินโดยตรงได้ แต่สามารถให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรง เช่น ความชื้น ความหนาแน่น และการกระจายของวัสดุ (Braga et al., 2016)

### 2.5.6 การตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีต

ในระบบรางรถไฟสมัยใหม่ โครงสร้างคอนกรีตมีบทบาทสำคัญ ทั้งเป็นแผ่นรองรับคอนกรีต (Concrete Slab) หรือเป็นส่วนประกอบของสะพาน อุโมงค์ และโครงสร้างอื่นๆ GPR สามารถตรวจสอบสภาพของคอนกรีตได้หลายลักษณะ:

- การตรวจหาเหล็กเสริม: GPR สามารถตรวจพบตำแหน่ง ขนาด และความลึกของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้อย่างแม่นยำ (Balayssac & Garnier, 2017) ข้อมูลนี้สำคัญสำหรับการประเมินสภาพและการวางแผนการซ่อมแซม
- การตรวจหาช่องว่างหรือรอยร้าว: ช่องว่าง รอยร้าว หรือการแยกตัวของคอนกรีตสามารถตรวจพบได้ด้วย GPR เนื่องจากมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่แตกต่างจากคอนกรีตที่แข็งแรง (Rhazi et al., 2007)

- การประเมินความหนาของคอนกรีต: GPR สามารถวัดความหนาของแผ่นคอนกรีตได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการประเมินความแข็งแรงและความทนทานของโครงสร้าง (Hugenschmidt, 2002)

### 2.5.7 ระบบ GPR แบบเคลื่อนที่สำหรับรถไฟ

การพัฒนา ระบบ GPR ที่สามารถติดตั้งบนรถไฟหรือยานพาหนะพิเศษได้ทำให้การตรวจสอบโครงสร้างรางรถไฟเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่ขัดขวางการเดินรถปกติ (Benedetto & Pajewski, 2015) ระบบเหล่านี้มีลักษณะเฉพาะหลายประการ

- ระบบ Multi-channel GPR: ใช้เสาอากาศหลายตัวเพื่อครอบคลุมพื้นที่การตรวจสอบที่กว้างขึ้น และให้ข้อมูลที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่สูง (Spagnolini et al., 2007) ระบบนี้สามารถตรวจสอบความสม่ำเสมอของโครงสร้างรองรับในแนวขนานกับราง
- ระบบ Air-coupled GPR: ใช้เสาอากาศที่ไม่ต้องสัมผัสกับพื้นผิว ทำให้สามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงได้ แม้ว่าจะมีความไวต่อสัญญาณรบกวนมากกว่าระบบแบบสัมผัส (Utsi, 2017)
- ระบบ Real-time Processing: การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการประมวลผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ ทำให้สามารถตรวจพบและแจ้งเตือนปัญหาได้ทันที (Kumlu & Erer, 2018)

### 2.5.8 ข้อจำกัดและความท้าทายในการใช้ GPR

ข้อจำกัดด้านสภาพแวดล้อม: ความสามารถในการเจาะทะลุของ GPR ลดลงอย่างมากในดินที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง เช่น ดินเหนียวเปียก หรือดินที่มีเกลือ (Conyers & Goodman, 1997) ในสภาพแวดล้อมเหล่านี้ อาจต้องใช้ความถี่ที่ต่ำลงหรือวิธีการสำรวจอื่นประกอบ

- การแปลผลข้อมูล การแปลผลข้อมูล GPR ต้องการความเชี่ยวชาญและประสบการณ์ เนื่องจากสัญญาณที่ได้รับอาจมีความซับซ้อนและได้รับอิทธิพลจากปัจจัยหลายประการ (Goodman & Piro, 2013) การฝึกอบรมบุคลากรและการพัฒนาอัลกอริทึมช่วยในการแปลผลจึงมีความสำคัญ

- สัญญาณรบกวน ในสภาพแวดล้อมของรถไฟ อาจมีสัญญาณรบกวนจากระบบไฟฟ้า สายสัญญาณ หรือโครงสร้างโลหะต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของข้อมูล GPR (Benedetto et al., 2012)

- ความแม่นยำในการกำหนดตำแหน่ง สำหรับการตรวจสอบแบบเคลื่อนที่ การกำหนดตำแหน่งที่แม่นยำของข้อมูลที่ตรวจพบมีความสำคัญต่อการบำรุงรักษา ระบบ GPS และระบบอ้างอิงตำแหน่งที่แม่นยำจึงเป็นส่วนสำคัญของระบบ GPR (Olhoeft, 2002)

### 2.5.9 แนวโน้มและการพัฒนาในอนาคตของ GPR

การพัฒนาเทคโนโลยี GPR สำหรับงานวิศวกรรมทางรถไฟมีแนวโน้มที่น่าสนใจหลายด้าน การรวมเทคโนโลยี AI และ Machine Learning การใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการวิเคราะห์และแปลผลข้อมูล GPR จะช่วยเพิ่มความแม่นยำและลดการพึ่งพาความเชี่ยวชาญของมนุษย์ (Liu et al., 2018) อัลกอริทึม Deep Learning สามารถเรียนรู้รูปแบบของข้อมูลและตรวจพบความผิดปกติได้อย่างอัตโนมัติ

- ระบบตรวจสอบแบบเบ็ดเสร็จ การพัฒนาระบบที่รวม GPR กับเทคโนโลยีอื่นๆ เช่น LiDAR, กล้องความร้อน, และเซ็นเซอร์ต่างๆ เพื่อให้ข้อมูลที่ครอบคลุมมากขึ้น (Martino et al., 2014)

- การพัฒนาเสาอากาศและฮาร์ดแวร์: การพัฒนาเสาอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น น้ำหนักเบา และทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่รุนแรง (Soldovieri et al., 2007)

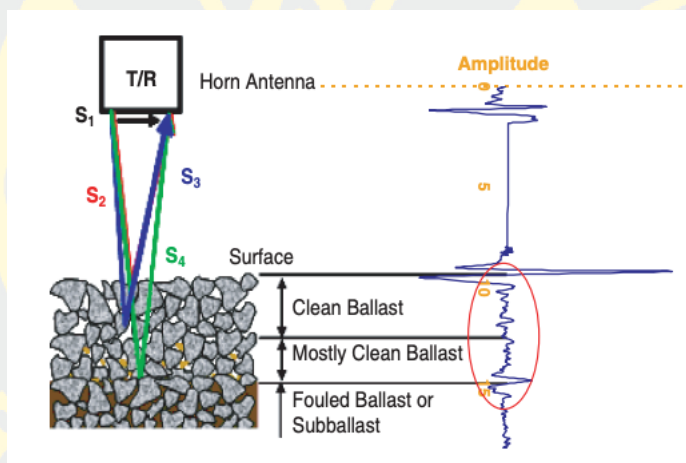
- ระบบ Digital Twin การสร้างแบบจำลองดิจิทัลของโครงสร้างทางรถไฟที่อัปเดตด้วยข้อมูลจาก GPR อย่างต่อเนื่อง เพื่อการวางแผนบำรุงรักษาที่มีประสิทธิภาพ (Bianchini Ciampoli et al., 2019)

## 2.6 การแปลผล Radargram และการแปลผลคุณลักษณะ

### 2.6.1 คุณลักษณะพื้นฐานของเรดาร์แกรมในโครงสร้างทางรถไฟ

Ground Penetrating Radar (GPR) เป็นเทคนิคการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ที่ไม่ทำลายโครงสร้าง โดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 10 MHz ถึง 2.5

GHz) ในการตรวจสอบสภาพใต้พื้นผิว การประยุกต์ใช้ GPR ในงานทางรถไฟเริ่มขึ้นอย่างจริงจังในช่วงทศวรรษ 1990 และได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องจากความสามารถในการให้ข้อมูลต่อเนื่องเกี่ยวกับสภาพโครงสร้างใต้พื้นผิวแบบเรียลไทม์ (Al-Qadi et al., 2008; Hugenschmidt, 2000) หลักการทำงานของ GPR อาศัยการส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านเสาอากาศส่งสัญญาณลงสู่โครงสร้างใต้พื้นผิว เมื่อคลื่นพบกับชั้นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์แตกต่างกัน (ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก  $\epsilon_r$ , ค่าการนำไฟฟ้า  $\sigma$ , และค่าการซึมผ่านแม่เหล็ก  $\mu$ ) จะเกิดการสะท้อนและการกระเจิงของพลังงานกลับมายังเสาอากาศรับสัญญาณ (Leng & Al-Qadi, 2010)



ภาพที่ 11 หลักการทำงานของ GPR ในการตรวจสอบโครงสร้างทางรถไฟ (Leng & Al-Qadi, 2010)

ภาพที่ 11 แสดงระบบ GPR ที่ติดตั้งบนรถไฟทางรถไฟ ประกอบด้วยเสาอากาศส่งสัญญาณ (Transmitter) และเสาอากาศรับสัญญาณ (Receiver) ที่ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลงสู่โครงสร้างทางรถไฟ และรับสัญญาณสะท้อนกลับมา โครงสร้างทางรถไฟประกอบด้วยชั้นต่างๆ ได้แก่ ราง (Rail), หมอนรางและหินบด (Sleeper & Ballast), ชั้นดินเหนียว (Subgrade) โดยแต่ละชั้นจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดการสะท้อนและการกระเจิงของสัญญาณที่สามารถนำมาวิเคราะห์สภาพของโครงสร้างได้

การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโครงสร้างทางรถไฟจะแสดงลักษณะการสะท้อนจากขอบเขตต่างๆ ดังนี้

- การสะท้อนจากพื้นผิว (Direct Wave): สัญญาณที่เดินทางโดยตรงระหว่างเสาอากาศส่งและรับ
- การสะท้อนจากขอบเขตชั้นหินบด (Ballast Interface): การสะท้อนจากขอบเขตระหว่างหินบดกับชั้นวัสดุอื่น
- การกระเจิงจากช่องว่าง (Void Scattering): การกระเจิงของพลังงานจากช่องว่างภายในชั้นหินบด
- การสะท้อนจากชั้นดินเหนียว (Subgrade Reflection): การสะท้อนจากขอบเขตระหว่างชั้นหินบดกับชั้นดินเหนียว

### 2.6.2 การตรวจสอบสภาพชั้นหินโรยทาง (Ballast Layer Assessment)

การประเมินความหนาชั้นหินโรยทางเป็นการประยุกต์ใช้พื้นฐานของ GPR ในงานทางรถไฟ โดยอาศัยการวิเคราะห์เวลาการเดินทางแบบสองทาง (Two-way Travel Time) ของสัญญาณสะท้อนจากขอบเขตชั้นหินโรยทาง-ดินเหนียว Huginschmidt (2000) ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ GPR ความถี่ 400-900 MHz สามารถระบุความหนาชั้นหินโรยทางได้อย่างแม่นยำภายในข้อผิดพลาด  $\pm 5$  cm โดยการคำนวณความหนาชั้นหินโรยทางสามารถทำได้โดยดั่งสมการที่ (8)

$$d = \frac{(v \times \Delta t)}{2} \quad (8)$$

$d$  คือความหนาชั้นหินโรยทาง (เมตร)  $v$  คือความเร็วคลื่นในชั้นหินโรยทาง (เมตร/นาโนวินาที)  $\Delta t$  คือเวลาการเดินทางแบบสองทางระหว่างพื้นผิวและขอบเขตหินโรยทาง-ดินเหนียว (นาโนวินาที)

การประเมินคุณภาพหินโรยทางด้วย GPR อาศัยการวิเคราะห์ลักษณะการกระเจิงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากช่องว่างภายในมวลหินโรยทาง ตามทฤษฎี Mie Scattering หินโรยทางสะอาดที่มีช่องว่างเป็นระเบียบจะแสดงลักษณะการกระเจิงที่แข็งแกร่งและสม่ำเสมอ

ในขณะที่หินโรยทางที่มีการอัดแน่นหรือปนเปื้อนจะแสดงการกระเจิงที่อ่อนลง (Roberts et al., 2008)

### 2.6.3 การประเมินการปนเปื้อนของหินโรยทาง (Ballast Fouling Assessment)

การปนเปื้อนของหินโรยทาง (Ballast Fouling) หมายถึงการเติมช่องว่างระหว่างเม็ดหินโรยทางด้วยวัสดุอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการระบายน้ำและความแข็งแรงของโครงสร้างทางรถไฟ กลไกการปนเปื้อนหลักประกอบด้วย 3 ประการ (Indraratna et al., 2011):

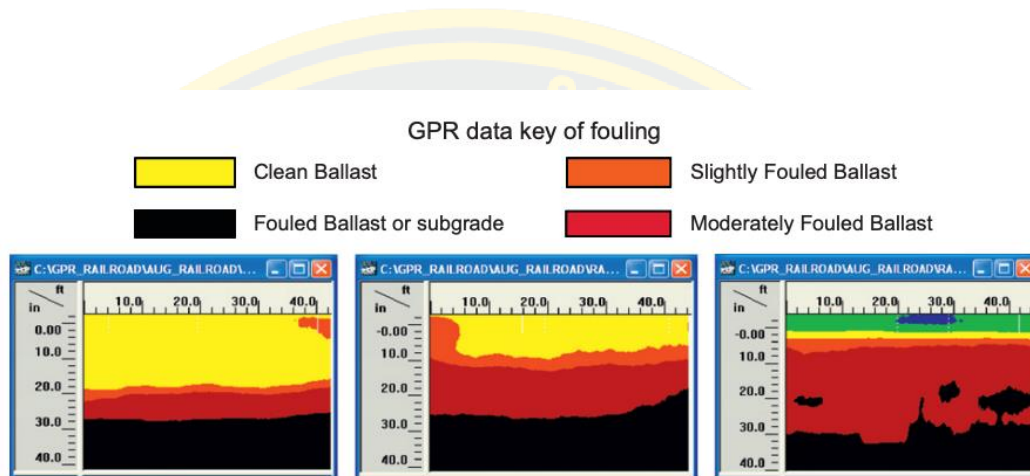
- การแตกหักของหินโรยทางภายใต้แรงกระทำ (Mechanical Breakdown): คิดเป็น 20-70% ของการปนเปื้อนทั้งหมด
- การซึมขึ้นของวัสดุจากชั้นดินเหนียว (Subgrade Migration): คิดเป็น 15-25% ของการปนเปื้อนทั้งหมด
- การตกสะสมของฝุ่นผงจากการกัดกร่อนของล้อ-ราง (External Contamination): คิดเป็นส่วนน้อย

Al-Qadi et al. (2008) ได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์การกระเจิงของสัญญาณ GPR เพื่อประเมินระดับการปนเปื้อนของหินโรยทาง โดยใช้ดัชนีการปนเปื้อน (Fouling Index) ที่คำนวณจากค่าแอมพลิจูดสัญญาณสะท้อนดังแสดงในสมการที่ (9)

$$FI = \left[ \frac{(A_{\text{clean}} - A_{\text{fouled}})}{A_{\text{clean}}} \times 100 \right] \quad (9)$$

โดยที่ FI คือดัชนีการปนเปื้อน (%)  $A_{\text{clean}}$  คือแอมพลิจูดเฉลี่ยของสัญญาณจากหินโรยทางสะอาด  $A_{\text{fouled}}$  คือแอมพลิจูดเฉลี่ยของสัญญาณจากหินโรยทางปนเปื้อน

การวิเคราะห์โดยใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่คำนวณจากความเร็วคลื่น สำหรับหินโรยทางที่มีการปนเปื้อนในระดับต่างๆ จะแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เพิ่มขึ้นตามระดับการปนเปื้อน (Leng & Al-Qadi, 2010)



ภาพที่ 12 ลักษณะ Radargram แสดงการปนเปื้อนของหินโรยทางในระดับต่าง ๆ (Al-Qadi et al., 2008)

## 2.6.4 เทคนิคการประมวลผลสัญญาณขั้นสูง

### 2.6.4.1 การประมวลผลในโดเมนเวลา-ความถี่

Shangguan et al. (2012) ได้นำเสนอการใช้ Discrete Wavelet Transform (DWT) และ Short-Time Fourier Transform (STFT) สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณ GPR ในงานทางรถไฟ เทคนิคนี้มีข้อดีในการแยกสัญญาณในโดเมนเวลาและความถี่พร้อมกัน ทำให้สามารถระบุลักษณะการปนเปื้อนได้อย่างละเอียดมากขึ้น

### 2.6.4.2 การใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการแปลผล

Shao et al. (2011) ได้พัฒนาระบบการจำแนกอัตโนมัติโดยใช้ Neural Network สำหรับการประเมินสภาพหินโรยทาง ระบบนี้สามารถจำแนกระดับการปนเปื้อนได้อย่าง

แม่นยำ 85-92% โดยใช้คุณลักษณะจากสัญญาณ GPR ในโดเมนเวลาและความถี่ นอกเหนือจากนี้เทคนิค Machine Learning ที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่

- Support Vector Machine (SVM) สำหรับจำแนกประเภทการปนเปื้อน
- Random Forest สำหรับการพยากรณ์ระดับการปนเปื้อน
- Deep Learning สำหรับการวิเคราะห์ภาพเรดาร์แกรมแบบอัตโนมัติ

### 2.6.5 การเลือกใช้ความถี่และเสาอากาศที่เหมาะสม

การเลือกความถี่ของ GPR เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการตรวจสอบ งานวิจัยของ Roberts et al. (2006) และ Al-Qadi et al. (2010) แสดงให้เห็นว่าความถี่ที่แตกต่างกันเหมาะสมกับการตรวจสอบในแง่มุมต่างๆ

ตารางที่ 10 ความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างทางรถไฟ Al-Qadi et al. (2010); Roberts et al. (2006); Anbazhagan et al. (2016)

การประยุกต์ใช้	ความถี่ที่แนะนำ (GHz)	ความลึกเจาะทะลุ (m)	ความละเอียด (cm)	ข้อดี	ข้อจำกัด
การประเมินการปนเปื้อน	2.0-2.6	1.0-1.5	2-5	ความไวสูงต่อการกระเจิง	ความลึกจำกัด
การตรวจสอบความหนาของหินโรยทาง	0.9-1.5	1.5-2.5	5-10	สมดุลระหว่างละเอียดและลึก	ความไวปานกลาง
การตรวจสอบชั้นดิน	0.4-0.9	2.5-4.0	10-20	การหยั่งลึกสูง	ความละเอียดต่ำ

ตารางที่ 10 (ต่อ)

การตรวจสอบ โพรงใต้ดิน	0.9-1.6	1.5-3.0	5-15	ตรวจสอบ ความผิดปกติ ได้ดี	ต้องการการ แปรผลเชิงลึก
การสำรวจ ภาพรวม	0.4-2.0 (Multi- frequency)	0.5-4.0	2-20	ข้อมูล ครอบคลุม	ความซับซ้อน ในการแปร ผล

การเลือกใช้เสาอากาศ Horn Antenna แบบ Air-coupled เป็นที่นิยมในงานทางรถไฟเนื่องจากสามารถทำการสำรวจได้ด้วยความเร็วสูง (20-200 km/h) โดยไม่ต้องสัมผัสกับพื้นผิว De Bold et al. (2015) พบว่าการใช้เสาอากาศ 500 MHz ในแนว Parallel Orientation ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า 0.9 กับดัชนีการปนเปื้อนจากการร่อน

### 2.6.6 ข้อจำกัดและความท้าทายในการแปรผล

ความขึ้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อผลการแปรผลสัญญาณ GPR Cao et. al. (2022(Cao & Al-Qadi, 2022)) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความขึ้นส่งผลดังนี้

- ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น: ส่งผลให้ความเร็วคลื่นลดลงและการคำนวณความลึกผิดพลาด
- การดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น: ทำให้ความลึกเจาะทะลุลดลงและสัญญาณอ่อนลง
- ความไม่ชัดเจนในการแปรผล: ความขึ้นและการปนเปื้อนแสดงผลกระทบในทิศทางเดียวกัน

## 2.7 การประยุกต์ Machine Learning กับ Radargram

### 2.7.1 บทนำสู่การประยุกต์ Machine Learning กับ Radargram

การตรวจสอบโครงสร้างใต้ผิวดินโดยใช้เรดาร์เจาะทะลุพื้น (Ground Penetrating Radar: GPR) ได้กลายเป็นเทคนิคที่สำคัญในงานวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบขนส่งทางรถไฟ (Annan, 2009) การวิเคราะห์ข้อมูล Radargram ซึ่งเป็นภาพแสดงผลจากการสำรวจด้วย GPR นั้นต้องอาศัยความเชี่ยวชาญและประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญในการตีความข้อมูล อย่างไรก็ตาม ความก้าวหน้าของเทคโนโลยี Machine Learning (ML) ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้เปิดโอกาสใหม่ในการพัฒนาระบบการวิเคราะห์อัตโนมัติที่มีความแม่นยำและประสิทธิภาพสูง

Machine Learning เป็นสาขาหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ที่เน้นการพัฒนาอัลกอริทึมที่สามารถเรียนรู้และปรับปรุงประสิทธิภาพจากข้อมูลโดยไม่ต้องถูกโปรแกรมอย่างชัดเจน (Mitchell, 1997) ในบริบทของการวิเคราะห์ Radargram เทคนิค ML สามารถช่วยในการระบุรูปแบบ (Pattern recognition) การจำแนกประเภทวัตถุ (Object classification) และการตรวจจับความผิดปกติ (Anomaly detection) ในโครงสร้างใต้ผิวดิน

การประยุกต์ Machine Learning แบบ Classification เป็นแนวทางหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ Radargram เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักคือการจำแนกประเภทของวัสดุ การระบุชนิดของโครงสร้าง และการแยกแยะระหว่างบริเวณปกติและผิดปกติ แทนที่จะเป็นการทำนายค่าเชิงปริมาณ

การพัฒนาเทคโนโลยีดิจิทัลและการประมวลผลข้อมูลในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้ทำให้การนำ Machine Learning มาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ Radargram เป็นไปได้มากขึ้น โดยเฉพาะการพัฒนาของ Graphics Processing Units (GPUs) ที่ช่วยเร่งความเร็วในการประมวลผลข้อมูลภาพขนาดใหญ่และการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลขนาดมหึมา (Big Data) ทำให้สามารถเก็บรวบรวมและประมวลผลข้อมูล Radargram จากการสำรวจในพื้นที่กว้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.7.1.1 ลักษณะและคุณสมบัติของ Radargram

Radargram เป็นภาพสองมิติที่แสดงการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากโครงสร้างใต้ผิวดิน โดยแกนอนแสดงระยะทางหรือตำแหน่งการสำรวจ และแกนตั้งแสดงเวลา การเดินทางของคลื่นหรือความลึก ความเข้มของสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจะแสดงในรูปแบบของสีหรือระดับความเทาที่แตกต่างกัน การตีความ Radargram ต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ และรูปแบบการสะท้อนที่เกิดขึ้น

การประยุกต์ Machine Learning ช่วยลดภาระงานของผู้เชี่ยวชาญในการตีความ Radargram และเพิ่มความสม่ำเสมอในการวิเคราะห์ โดยเฉพาะในโครงการขนาดใหญ่ที่มี Radargram จำนวนมาก นอกจากนี้ ML ยังสามารถค้นหารูปแบบที่ซับซ้อนและละเอียดที่อาจถูกมองข้ามโดยการตีความด้วยสายตาของมนุษย์

### 2.7.2 การประยุกต์ในงานวิศวกรรมทางรถไฟ

ระบบขนส่งทางรถไฟต้องการการบำรุงรักษาและการตรวจสอบสภาพโครงสร้างอย่างสม่ำเสมอเพื่อความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของการดำเนินงาน (Sussmann et al., 2001) การใช้ GPR ในการตรวจสอบสภาพโครงสร้างทางรถไฟมีประโยชน์หลายประการ ได้แก่ การตรวจสอบความหนาของชั้นหิน (Ballast layer) การระบุตำแหน่งของท่อระบายน้ำ การตรวจหาช่องว่างใต้แผ่นคอนกรีต และการประเมินสภาพของโครงสร้างใต้ดิน ตารางที่ 2-12 แสดงการประยุกต์ GPR ในงานวิศวกรรมทางรถไฟแต่ละประเภทพร้อมกับความแม่นยำที่คาดหวัง

Clark et al. (2004) ได้ศึกษาการใช้ GPR ในการประเมินสภาพโครงสร้างทางรถไฟความเร็วสูงและพบว่าการใช้ข้อมูล Radargram แบบดั้งเดิมใช้เวลานานและต้องอาศัยความเชี่ยวชาญสูง ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญในการตรวจสอบเส้นทางที่มีความยาวหลายร้อยกิโลเมตร ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาระบบอัตโนมัติโดยใช้ Machine Learning จึงกลายเป็นความจำเป็นเร่งด่วน

การศึกษาของ Roberts et al. (2002) แสดงให้เห็นว่าการตรวจสอบทางรถไฟแบบดั้งเดิมต้องใช้เวลาและแรงงานมาก โดยเฉพาะการตรวจสอบสายหลักที่มีความยาวหลายพันกิโลเมตร การใช้ระบบ GPR ร่วมกับ Machine Learning สามารถลดเวลาการตรวจสอบได้

มากกว่า 70% และเพิ่มความแม่นยำในการตรวจจับปัญหาได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การตรวจสอบแบบอัตโนมัติยังช่วยลดความเสี่ยงของการทำงานในพื้นที่อันตรายและสามารถดำเนินการได้ในเวลากลางคืนเมื่อไม่มีการเดินรถ

### 2.7.2.1 ประโยชน์ทางเศรษฐกิจ

การประยุกต์ Machine Learning กับ Radargram นำมาซึ่งประโยชน์ทางเศรษฐกิจที่สำคัญ การศึกษาของ Leng & Gabr (2012) พบว่าการใช้ระบบตรวจสอบอัตโนมัติสามารถลดต้นทุนการบำรุงรักษาได้ถึง 25-30% โดยการตรวจจับปัญหาในระยะเริ่มต้นก่อนที่จะกลายเป็นความเสียหายร้ายแรง การลงทุนในระบบ ML สำหรับการวิเคราะห์ Radargram มีอัตราผลตอบแทนที่ดี โดยทั่วไปจะคืนทุนภายใน 3-5 ปี

การใช้เทคโนโลยี ML ในการตรวจสอบทางรถไฟยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (predictive maintenance) ระบบสามารถทำนายแนวโน้มการเสื่อมสภาพของโครงสร้างได้ล่วงหน้า ทำให้สามารถจัดหาวัสดุและวางแผนการปิดเส้นทางสำหรับการซ่อมแซมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ลดการหยุดชะงักของการดำเนินงานและเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบขนส่ง

### 2.7.2.2 ความท้าทายในการประยุกต์ใช้

แม้ว่าการประยุกต์ ML กับ Radargram จะมีประโยชน์มาก แต่ยังมีความท้าทายหลายประการ ปัญหาหลักคือความแปรปรวนของสภาพแวดล้อมในการสำรวจ เช่น ความชื้นของดิน อุณหภูมิ และสภาพอากาศ ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของ Radargram อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงของวัสดุใต้ดินตามพื้นที่ภูมิศาสตร์ต่างๆ ทำให้โมเดล ML ที่ฝึกอบรมในพื้นที่หนึ่งอาจไม่เหมาะสมสำหรับพื้นที่อื่น

### 2.7.3 เทคนิค Machine Learning สำหรับการวิเคราะห์ Radargram

### 2.7.3.1 การประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing)

Radargram สามารถพิจารณาเป็นภาพดิจิทัลที่แสดงการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากโครงสร้างใต้ผิวดิน การประยุกต์เทคนิค computer vision และ image processing จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสม Benedetto et al. (2017) ได้นำเสนอการใช้เทคนิค texture analysis ร่วมกับ neural networks ในการจำแนกประเภทวัสดุในโครงสร้างถนนและพบว่าสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงถึง 92%

เทคนิคการประมวลผลภาพที่นิยมใช้กับ Radargram ประกอบด้วย การกรองสัญญาณรบกวน (Noise filtering) การปรับปรุงคอนทราสต์ (Contrast enhancement) และการสกัดลักษณะเด่น (Feature extraction) Shihab & Al-Nuaimy (2005) ได้พัฒนาอัลกอริทึมการตรวจจับวัตถุใต้ดินโดยใช้ Wavelet transform ร่วมกับ Neural networks และสามารถตรวจจับท่อใต้ดินได้ด้วยความแม่นยำ 89% ขั้นตอนการประมวลผล Radargram ด้วยเทคนิค Machine Learning ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมข้อมูล (Data preprocessing) การลดสัญญาณรบกวน (Noise reduction) การสกัดลักษณะเด่น (Feature extraction) การฝึกโมเดล (Model training) และการตีความผลลัพธ์ (Result interpretation)

การพัฒนาเทคนิคการประมวลผลภาพสำหรับ Radargram ได้มีการใช้วิธีการที่หลากหลาย เช่น การใช้ Gabor filters สำหรับการตรวจจับขอบ (Edge detection) การใช้ Morphological operations สำหรับการขจัดสัญญาณรบกวน และ การใช้ Frequency domain analysis สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของสัญญาณ การรวมเทคนิคเหล่านี้เข้าด้วยกันทำให้สามารถสกัดข้อมูลที่มีความหมายจาก Radargram ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

การใช้ Histogram equalization และ Adaptive histogram equalization ช่วยปรับปรุงคอนทราสต์ของ Radargram ทำให้สามารถมองเห็นรายละเอียดที่ซ่อนอยู่ได้ดีขึ้น การประยุกต์ใช้งาน Median filter และ Gaussian filter ช่วยลดสัญญาณรบกวนโดยยังคงรักษาขอบและรายละเอียดสำคัญไว้ เทคนิคการแบ่งส่วนภาพ (Image segmentation) เช่น Watershed algorithm และ Region growing ถูกนำมาใช้ในการแยกแยะโครงสร้างต่างๆ ใน Radargram

### 2.7.3.2 Neural Networks และ Deep Learning

การใช้ Neural networks ในการวิเคราะห์ Radargram ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา Pham & Lambot (2019) ได้นำเสนอการใช้ Convolutional Neural Networks (CNN) ในการประมาณ Moisture content ในดินจากข้อมูล GPR และได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม

สำหรับงานทางรถไฟโดยเฉพาะ Xie et al. (2018) ได้พัฒนาระบบการตรวจจับความผิดปกติในชั้นหินใต้รางรถไฟโดยใช้ Deep Neural Networks (DNN) ซึ่งสามารถประมวลผลข้อมูล Radargram แบบเรียลไทม์และให้ความแม่นยำในการตรวจจับสูงถึง 95% การศึกษานี้แสดงให้เห็นศักยภาพของ Deep learning ในการประยุกต์ใช้งานจริง ตารางที่ 2-13 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิค Machine Learning ต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ Radargram

การพัฒนา Deep Learning architectures ที่เฉพาะเจาะจงสำหรับ Radargram ได้มีความก้าวหน้าอย่างมาก การใช้ U-Net architecture สำหรับ Semantic segmentation ของ Radargram ได้แสดงผลลัพธ์ที่น่าประทับใจ โดยสามารถแบ่งส่วนของโครงสร้างต่างๆ ใน Radargram ได้อย่างละเอียด การใช้ Attention mechanisms ยังช่วยให้โมเดลสามารถโฟกัสไปที่บริเวณที่สำคัญของภาพได้ดีขึ้น

ResNet (Residual Networks) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการจำแนกประเภทของวัสดุใต้ดินจาก Radargram ด้วยความสำเร็จ การใช้ skip connections ช่วยแก้ปัญหา vanishing gradient และทำให้สามารถฝึกโมเดลที่ลึกมากขึ้นได้ การใช้ transfer learning จากโมเดลที่ฝึกมาจากข้อมูลภาพทั่วไปช่วยลดเวลาการฝึกและปรับปรุงประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเมื่อมีข้อมูล Radargram จำกัด

### 2.7.3.3 Support Vector Machines และ Ensemble Methods

Support Vector Machines (SVM) เป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการจำแนกข้อมูล Radargram Grandjean et al. (2012) ได้ใช้ SVM ในการตรวจจับโพรงใต้ดินและ

ได้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจ โดยเฉพาะในกรณีที่มีข้อมูลการฝึกอบรมจำกัด ข้อดีของ SVM คือสามารถทำงานได้ดีกับข้อมูลขนาดเล็กและมีความแม่นยำสูง

Ensemble methods เช่น Random Forest และ Gradient Boosting ได้ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการจำแนก Warren et al. (2016) ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ ensemble methods ต่างๆ ในการตรวจจับท่อใต้ดินและพบว่า Random Forest ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดด้วยความแม่นยำ 87% การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิค ML ต่างๆ ในการวิเคราะห์ Radargram แสดงให้เห็นว่า deep learning methods มีความแม่นยำสูงสุด แต่ต้องการทรัพยากรการประมวลผลมาก ในขณะที่ traditional methods เช่น SVM และ Random Forest มีความเร็วในการประมวลผลสูงกว่า

การพัฒนา Ensemble methods ที่เฉพาะเจาะจงสำหรับข้อมูล Radargram ได้มีการนำเสนอวิธีการใหม่ๆ เช่น การใช้ Stacking ensemble ที่รวม predictions จากหลายโมเดลด้วย meta-learner และการใช้ Voting ensemble ที่ใช้การลงคะแนนจากโมเดลต่างๆ เพื่อทำ final prediction การใช้ Bayesian ensemble ยังช่วยให้สามารถประมาณความไม่แน่นอน (uncertainty) ของ predictions ได้ด้วย

การประยุกต์ใช้ AdaBoost และ XGBoost ในการวิเคราะห์ Radargram ได้แสดงประสิทธิภาพที่ดี โดยเฉพาะในการจัดการกับ imbalanced dataset ที่มักพบในข้อมูล geophysical การใช้ feature importance scores ที่ได้จาก ensemble methods ช่วยในการเข้าใจว่าลักษณะใดของ Radargram มีความสำคัญต่อการตัดสินใจของโมเดล

#### **2.7.3.4 การประมวลผลสัญญาณแบบขั้นสูง**

การประมวลผลสัญญาณแบบขั้นสูงได้กลายเป็นส่วนสำคัญของระบบ Machine Learning สำหรับ Radargram การใช้ Short-Time Fourier Transform (STFT) และ Wavelet Transform ในการวิเคราะห์ domain เวลา-ความถี่ของสัญญาณ GPR ช่วยให้เห็นการสกัดข้อมูลที่มีความหมายได้มากขึ้น Persico & Leucci (2016) ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ time-frequency analysis ร่วมกับ machine learning สามารถปรับปรุงความแม่นยำในการตรวจจับวัตถุใต้ดินได้อย่างมีนัยสำคัญ

การใช้ Continuous Wavelet Transform (CWT) ในการวิเคราะห์ Radargram ช่วยให้สามารถระบุโครงสร้างที่มีขนาดและลักษณะที่แตกต่างกัน การเลือกใช้ mother wavelet ที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ Morlet wavelet และ Mexican hat wavelet เป็นตัวเลือกที่นิยมใช้กับข้อมูล GPR เนื่องจากมีลักษณะที่เหมาะสมกับรูปแบบของสัญญาณที่สะท้อนจากโครงสร้างใต้ดิน

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิค Machine Learning ต่างๆ Liu et al. (2020) และ Chen et al. (2023)

เทคนิค	ความแม่นยำ (%)	เวลาการประมวลผล (วินาที)	ข้อดี	ข้อเสีย
SVM	78-85	12-15	ทำงานดีกับข้อมูลน้อย	ต้องการ feature engineering
Random Forest	82-88	5-8	ไม่ Overfitting ง่าย	ยากต่อการตีความ
CNN	90-96	25-35 (training)	ไม่ต้องการ Feature extraction	ต้องการข้อมูลมาก
LSTM	85-92	18-22	ดีกับข้อมูลต่อเนื่อง	ซับซ้อนในการปรับแต่ง
Transformer	93-97	30-40	ความแม่นยำสูงสุด	ต้องการทรัพยากรมาก

#### 2.7.4 การประยุกต์เฉพาะทางในงานรถไฟ

#### 2.7.4.1 การตรวจสอบชั้นหินโรยทาง (Ballast Assessment)

ชั้นหินเป็นส่วนประกอบสำคัญของโครงสร้างทางรถไฟที่ทำหน้าที่กระจายน้ำหนักและระบายน้ำ De Bold et al. (2015) ได้พัฒนาระบบการประเมินสภาพชั้นหินโดยใช้ Machine Learning ร่วมกับข้อมูล GPR ซึ่งสามารถระบุพื้นที่ที่ต้องการการบำรุงรักษาได้อย่างแม่นยำ การศึกษานี้ใช้ combination ของ texture analysis และ neural networks ในการจำแนกสภาพชั้นหินออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ ดีมาก ดี พอใช้ และต้องเปลี่ยน

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถประหยัดเวลาในการตรวจสอบได้มากกว่า 80% เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตรวจสอบแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ยังสามารถตรวจจับปัญหาในระยะเริ่มต้นซึ่งช่วยลดต้นทุนการบำรุงรักษาในระยะยาว ตารางที่ 2-13 แสดงผลการตรวจจับโครงสร้างใต้ดินด้วยเทคนิคต่างๆ และประสิทธิภาพของแต่ละวิธี

การศึกษาเพิ่มเติมของ Leng & Gabr (2012) ได้พัฒนาระบบการประเมินความเสื่อมของชั้นหินโดยใช้การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของหินจาก Radargram พบว่าการใช้ machine learning สามารถทำนายอายุการใช้งานที่เหลือของชั้นหินได้ด้วยความแม่นยำสูงซึ่งเป็นประโยชน์สำคัญในการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

การวิเคราะห์ความหนาและความหนาแน่นของชั้นหินด้วย ML สามารถทำได้ผ่านการวิเคราะห์รูปแบบการสะท้อนและเวลาการเดินทางของคลื่น การใช้ regression models ในการทำนายคุณสมบัติเชิงปริมาณของชั้นหิน เช่น porosity และ density แสดงผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูง การประยุกต์ใช้ time-lapse analysis เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของชั้นหินในระยะยาวช่วยให้สามารถวางแผนการบำรุงรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 2.7.4.2 การตรวจจับโครงสร้างใต้ดิน

การตรวจจับท่อระบายน้ำ สายไฟ และโครงสร้างอื่นๆ ใต้ทางรถไฟเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการวางแผนการบำรุงรักษา Feng & Yi (2021) ได้นำเสนอระบบการตรวจจับอัตโนมัติโดยใช้ YOLO (You Only Look Once) Architecture ที่ปรับปรุงมาเฉพาะสำหรับข้อมูล Radargram ระบบนี้สามารถตรวจจับและจำแนกประเภทของโครงสร้างใต้ดินได้ในเวลาเรียลไทม์

การพัฒนาเทคนิคการตรวจจับโครงสร้างใต้ดินได้มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว การใช้ 3D object detection algorithms ที่ปรับปรุงมาจาก computer vision สำหรับรถยนต์ไร้คนขับได้แสดงผลที่ประทับใจ การใช้ Point Cloud Networks สำหรับการประมวลผลข้อมูล 3D GPR ยังเป็นอีกแนวทางที่มีศักยภาพสูง

การประยุกต์ใช้ instance segmentation techniques ช่วยให้สามารถแยกแยะโครงสร้างแต่ละชิ้นได้อย่างละเอียด แม้ว่าจะมีการทับซ้อนกันใน Radargram การใช้ multi-scale analysis ช่วยในการตรวจจับโครงสร้างที่มีขนาดแตกต่างกัน ตั้งแต่ท่อขนาดเล็กไปจนถึงโครงสร้างขนาดใหญ่ การพัฒนา domain-specific data augmentation techniques ช่วยเพิ่มความหลากหลายของข้อมูลฝึกและปรับปรุงความสามารถในการ generalize ของโมเดล

ตารางที่ 12 ผลการตรวจจับโครงสร้างใต้ดินด้วยเทคนิคต่างๆ

ประเภท สิ่งก่อสร้าง	Traditional Method (%)	SVM (%)	CNN (%)	YOLO (%)	Transformer (%)
ท่อระบายน้ำ	72	84	91	93	95
สายไฟ/สายสื่อสาร	68%	79	87	89	92
ท่อน้ำประปา	75%	82	89	91	94
โครงสร้างคอนกรีต	78%	86	92	94	96
โลหะ	81%	88	94	95	97

#### 2.7.4.3 การตรวจสอบความสมบูรณ์ของรางรถไฟ

การตรวจสอบความสมบูรณ์ของรางรถไฟโดยใช้ GPR ร่วมกับ Machine Learning เป็นการประยุกต์ใหม่ที่มีประโยชน์มาก Nicholson et al. (2012) ได้พัฒนาระบบการตรวจจับรอยแตกและการสึกหรอของรางโดยใช้ High-frequency GPR ร่วมกับ deep learning พบว่าสามารถตรวจจับรอยแตกขนาดเล็กที่มีความกว้างเพียง 1-2 มิลลิเมตรได้

การใช้ Multi-frequency GPR ร่วมกับ Ensemble machine learning ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถประเมินสภาพของรางได้อย่างครอบคลุม ทั้งในด้านโครงสร้างภายในและผิวหน้า การพัฒนานี้ช่วยลดความจำเป็นในการตรวจสอบด้วยตาเปล่าและวิธีการทำลายทดสอบ

การใช้ Explainable AI ในการตีความผลการวิเคราะห์ Radargram ช่วยให้ผู้เชี่ยวชาญสามารถเข้าใจการทำงานของระบบ AI และเชื่อมั่นในผลลัพธ์ที่ได้ การพัฒนา Visualization techniques ที่แสดงบริเวณที่โมเดลให้ความสำคัญในการตัดสินใจช่วยเพิ่มความเข้าใจและการยอมรับจากผู้ใช้งาน

การประยุกต์ใช้ Continual learning approaches ช่วยให้โมเดลสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพได้เรื่อยๆ เมื่อมีข้อมูลใหม่เพิ่มเติม การใช้ active learning strategies ช่วยลดปริมาณข้อมูลที่ต้องมีการ label โดยมนุษย์ ทำให้การรวบรวมข้อมูลฝึกมีประสิทธิภาพมากขึ้น

## 2.7.5 ความท้าทายและข้อจำกัด

### 2.7.5.1 คุณภาพและปริมาณข้อมูล

การประยุกต์ Machine Learning กับ Radargram ต้องเผชิญกับความท้าทายหลายประการ ปัญหาแรกคือคุณภาพของข้อมูล Radargram ที่อาจได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวน สภาพอากาศ และคุณสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกัน Liu et al. (2020) ชี้ให้เห็นว่าการรวบรวมข้อมูลที่มีคุณภาพสูงและมีป้ายกำกับ (Labeled data) ที่ถูกต้องเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จของโมเดล ML

ปัญหาที่สองคือความหลากหลายของสภาพแวดล้อมและประเภทของโครงสร้าง โมเดลที่ฝึกอบรมในสภาพแวดล้อมหนึ่งอาจไม่สามารถทำงานได้ดีในสภาพแวดล้อมอื่น (Domain adaptation problem) Zhang et al. (2019) ได้เสนอแนวทางการแก้ไขปัญหานี้โดยการใช้ transfer learning และการสร้างข้อมูลสังเคราะห์ (synthetic data generation)

ปัญหาการขาดแคลนข้อมูลที่มีป้ายกำกับเป็นอุปสรรคสำคัญ การสร้าง Ground truth data สำหรับ Radargram ต้องอาศัยการขุดหรือการตรวจสอบด้วยวิธีอื่นซึ่งมี

ค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานาน การพัฒนาเทคนิค Semi-supervised learning และ active learning จึงเป็นทิศทางที่สำคัญ

การจัดการกับ Noisy data เป็นความท้าทายสำคัญ สัญญาณรบกวนในข้อมูล GPR อาจมาจากหลายแหล่ง เช่น Electromagnetic interference จากอุปกรณ์ไฟฟ้า การสะท้อนจากผิวหน้า และการกระเจิงจาก Heterogeneous materials การพัฒนา Robust algorithms ที่สามารถทำงานได้ดีแม้มีสัญญาณรบกวนจึงเป็นสิ่งสำคัญ

### 2.3.5.2 การตีความผลลัพธ์ (Interpretability)

การตีความผลลัพธ์จากโมเดล Machine Learning โดยเฉพาะ Deep learning เป็นความท้าทายสำคัญในการนำไปใช้งานจริง วิศวกรและผู้เชี่ยวชาญต้องการทราบเหตุผลของการตัดสินใจของโมเดล Bae et al. (2020) ได้พัฒนา Explainable AI techniques สำหรับการวิเคราะห์ Radargram ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้เข้าใจการทำงานของโมเดลได้ดีขึ้น

การพัฒนา Interpretable machine learning models ที่เฉพาะเจาะจงสำหรับ geophysical data เป็นงานวิจัยที่มีความสำคัญเพิ่มขึ้น การใช้ Attention mechanisms ใน neural networks ช่วยให้สามารถเห็นได้ว่าโมเดลโฟกัสไปที่บริเวณใดของ Radargram การใช้ Feature importance analysis และ SHAP (SHapley Additive exPlanations) values ยังช่วยในการอธิบายการตัดสินใจของโมเดล

ความจำเป็นในการตีความผลลัพธ์มีความสำคัญเป็นพิเศษในงานวิศวกรรม เนื่องจากการตัดสินใจที่ผิดพลาดอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัย การพัฒนา confidence measures และ uncertainty quantification ช่วยให้ผู้ใช้สามารถประเมินความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ได้ การสร้าง visual explanations ที่แสดงบริเวณที่มีความสำคัญต่อการตัดสินใจช่วยเพิ่มความเข้าใจ

### 2.7.5.3 ปัญหาทางเทคนิค

ปัญหาทางเทคนิคที่สำคัญประกอบด้วย Class imbalance problem ซึ่งเกิดจากการที่ข้อมูลปกติมีมากกว่าข้อมูลที่มีปัญหา การแก้ไขปัญหานี้ต้องใช้เทคนิคเช่น

Oversampling, Under-sampling, และ Cost-sensitive learning การปรับแต่ง Hyperparameters ของโมเดล ML สำหรับข้อมูล Radargram ยังเป็นงานที่ซับซ้อนและต้องอาศัยความเชี่ยวชาญ

การจัดการกับ High-dimensional data เป็นอีกปัญหาหนึ่ง Radargram มักมีขนาดใหญ่และมีมิติข้อมูลสูง การใช้ dimensionality reduction techniques เช่น PCA หรือ autoencoders อาจช่วยลดความซับซ้อนได้ แต่ต้องระวังการสูญเสียข้อมูลสำคัญ การพัฒนา efficient algorithms ที่สามารถจัดการกับข้อมูลขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็น

การเลือก Appropriate metrics สำหรับการประเมินประสิทธิภาพเป็นสิ่งสำคัญ Accuracy เพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ โดยเฉพาะในกรณีที่มี Class imbalance การใช้ Metrics เช่น Precision, Recall, F1-score, และ AUC-ROC ให้ภาพรวมที่ครอบคลุมมากขึ้น การกำหนด appropriate loss functions ที่เหมาะสมกับลักษณะของปัญหาเฉพาะทางช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของโมเดล

## 2.7.6 แนวโน้มและทิศทางการพัฒนาในอนาคต

### 2.7.6.1 การผสานผสานข้อมูลหลายแหล่ง (Multi-modal Data Fusion)

แนวโน้มการพัฒนาในอนาคตมุ่งไปสู่การรวมข้อมูลจากหลายแหล่ง เช่น GPR, LiDAR และข้อมูลจากเซ็นเซอร์ต่างๆ Kilic & Miller (2021) ได้แสดงให้เห็นว่าการผสานผสานข้อมูลสามารถเพิ่มความแม่นยำในการตรวจจับและการจำแนกได้อย่างมีนัยสำคัญ การใช้ Multi-modal deep learning architectures ช่วยให้ระบบสามารถใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่หลากหลายและเสริมซึ่งกันและกัน

การพัฒนา Sensor fusion algorithms ที่เฉพาะเจาะจงสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐานได้มีความก้าวหน้าอย่างมาก การใช้ Kalman filters และ Particle filters ในการรวมข้อมูลจากหลายเซ็นเซอร์ช่วยให้ได้ข้อมูลที่มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากขึ้น การใช้ Graph

neural networks สำหรับการโมเดลความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจากเซ็นเซอร์ต่างๆ ยังเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูง

การรวมข้อมูลจาก Satellite imagery, Aerial photography, และ Historical maintenance records เข้ากับข้อมูล GPR สามารถให้ข้อมูลบริบทที่มีค่าสำหรับการตีความ การใช้ Temporal data fusion ช่วยในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างตลอดเวลา การพัฒนา adaptive fusion strategies ที่สามารถปรับน้ำหนักของข้อมูลจากแต่ละแหล่งตามคุณภาพและความน่าเชื่อถือ

#### 2.7.6.2 การประมวลผลแบบเรียลไทม์

การพัฒนากระบวนการประมวลผลแบบเรียลไทม์เป็นเป้าหมายสำคัญสำหรับการตรวจสอบทางรถไฟขณะเดินรถ Gao et al. (2020) ได้นำเสนอ lightweight neural network architectures ที่สามารถทำงานบนอุปกรณ์พกพาและให้ผลลัพธ์ในเวลาเรียลไทม์ การพัฒนานี้จะช่วยให้สามารถตรวจสอบสภาพทางรถไฟได้อย่างต่อเนื่องและตอบสนองต่อปัญหาได้ทันที ตารางที่ 2-14 แสดงการเปรียบเทียบระบบการประมวลผลแบบต่างๆ และความเหมาะสมของแต่ละระบบ

การพัฒนา Model compression techniques เช่น Knowledge distillation, Pruning, และ Quantization ช่วยให้การลดขนาดของโมเดลและเพิ่มความเร็วในการประมวลผลโดยยังคงความแม่นยำไว้ในระดับที่ยอมรับได้ การใช้ Specialized Hardware เช่น Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs) และ Application-Specific Integrated Circuits (ASICs) ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการประมวลผลสำหรับงานเฉพาะทาง

การพัฒนา Streaming algorithms ที่สามารถประมวลผลข้อมูลในขณะที่กำลังเก็บรวบรวมเป็นแนวทางที่มีประโยชน์ การใช้ Online learning techniques ช่วยให้โมเดลสามารถปรับปรุงตัวเองได้เรื่อยๆ โดยไม่ต้องหยุดการทำงาน การพัฒนา Distributed computing approaches ช่วยในการแบ่งปันภาระการประมวลผลระหว่างหลาย ๆ หน่วย

ตารางที่ 13 เปรียบเทียบระบบการประมวลผลแบบต่าง ๆ Gao et al. (2022); Warren et al. (2016)

ประเภทระบบ	ความเร็วการประมวลผล	ความแม่นยำ	การใช้พลังงาน	ความเหมาะสม	ต้นทุน
Cloud Computing	ช้า (network delay)	สูงมาก (95-98%)	ต่ำ (local device)	การวิเคราะห์เชิงลึก	ปานกลาง

ตารางที่ 2-14 (ต่อ)

Edge Computing	เร็ว	สูง (90-95%)	ปานกลาง	การตรวจสอบเรียลไทม์	สูง
Mobile Computing	เร็วมาก	ปานกลาง (85-90%)	สูง	การตรวจสอบในสนาม	ต่ำ
Hybrid System	ปานกลาง	สูงมาก (96-99%)	ปานกลาง	การใช้งานครบครัน	สูงมาก

### 2.7.6.3 การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning)

การพัฒนาเทคนิค Unsupervised learning และ Self-supervised learning สำหรับการวิเคราะห์ Radargram เป็นทิศทางที่น่าสนใจ เนื่องจากการสร้างข้อมูลที่มีป้ายกำกับต้องใช้ความเชี่ยวชาญและเวลามาก Chen et al. (2023) ได้นำเสนอการใช้ Autoencoder ในการตรวจจับความผิดปกติโดยไม่ต้องใช้ข้อมูลป้ายกำกับ ซึ่งแสดงผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มดี

การใช้ Contrastive learning และ self-supervised pretraining สำหรับ Geophysical data เป็นแนวทางที่กำลังได้รับความสนใจมากขึ้น การใช้ Masked autoencoder ที่ปรับปรุงมาสำหรับข้อมูล 2D Radargram แสดงศักยภาพในการเรียนรู้ Representation ที่มี ความหมายโดยไม่ต้องใช้ Labels

การประยุกต์ใช้ Clustering algorithms เช่น DBSCAN และ Gaussian Mixture Models ในการแบ่งกลุ่ม Radargram patterns ช่วยในการค้นหา Anomalous patterns การใช้ Generative models เช่น Variational Autoencoders (VAEs) และ Generative Adversarial Networks (GANs) ในการสร้างข้อมูล Synthetic ช่วยเพิ่มปริมาณข้อมูลฝึก การพัฒนา Weakly Supervised learning approaches ที่ใช้ข้อมูล Labels ที่ไม่สมบูรณ์หรือมีสัญญาณรบกวน

#### 2.7.6.4 การใช้ Artificial Intelligence แบบองค์รวม

การพัฒนา ระบบ AI แบบองค์รวมที่สามารถทำงานหลายภารกิจ (Multi-task learning) เป็นแนวโน้มสำคัญ การใช้ Foundation models ที่ฝึกอบรวมมาจากข้อมูลจีโอฟิสิกส์ ขนาดใหญ่และสามารถ Fine-tune สำหรับงานเฉพาะทางต่างๆ จะช่วยลดเวลาและต้นทุนในการพัฒนาระบบใหม่

แนวโน้มการพัฒนาเทคนิค Machine Learning สำหรับการวิเคราะห์ Radargram ในอนาคตเน้นการผสมผสานเทคโนโลยีต่างๆ เข้าด้วยกัน รวมถึงการใช้ Quantum computing, Neuromorphic computing, และ Advanced AI architectures การพัฒนา Domain-specific AI ที่เข้าใจลักษณะเฉพาะของข้อมูล Geophysical และสามารถทำงานร่วมกับผู้เชี่ยวชาญมนุษย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การประยุกต์ใช้ Meta-learning หรือ Learning to learn approaches ช่วยให้โมเดลสามารถปรับตัวเข้ากับงานใหม่ได้อย่างรวดเร็วด้วยข้อมูลฝึกเพียงเล็กน้อย การพัฒนา Continual learning systems ที่สามารถเรียนรู้งานใหม่โดยไม่ลืมความรู้เดิม การใช้ Federated learning ในการฝึกโมเดลร่วมกันจากข้อมูลที่กระจายอยู่ในหลายสถานที่โดยไม่ต้องรวมข้อมูลเข้าด้วยกัน

#### 2.7.7 การประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

### 2.7.7.1 ระบบการจัดการข้อมูลแบบครบวงจร

การพัฒนากระบวนการจัดการข้อมูล Radargram แบบครบวงจรที่ครอบคลุม ตั้งแต่การเก็บข้อมูล การประมวลผล การวิเคราะห์ และการรายงานผล เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม การใช้ Cloud computing platforms และ Big data technologies ช่วยให้เราสามารถจัดการข้อมูลขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การพัฒนา Data pipelines ที่อัตโนมัติช่วยลดความผิดพลาดของมนุษย์และเพิ่มความสม่ำเสมอในการประมวลผล การใช้ Version control systems สำหรับข้อมูลและโมเดล ช่วยในการติดตามการเปลี่ยนแปลงและการทำงานร่วมกันของทีม การพัฒนา standardized data formats และ metadata schemas ช่วยให้ข้อมูลสามารถใช้ร่วมกันได้ระหว่างองค์กรและระบบต่างๆ

การสร้าง Digital twins ของโครงสร้างทางรถไฟที่รวมข้อมูล GPR กับข้อมูลอื่นๆ ช่วยในการจำลองและวิเคราะห์สถานการณ์ต่างๆ การใช้ Blockchain technology ในการรับรองความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูล การพัฒนา APIs และ Microservices architectures ช่วยให้ระบบมีความยืดหยุ่นและสามารถขยายได้

### 2.7.7.2 มาตรฐานและการรับรอง

การพัฒนามาตรฐานสำหรับการใช้ Machine learning ในการวิเคราะห์ Radargram เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการยอมรับในระดับอุตสาหกรรม องค์กรต่างๆ เช่น International Union of Railways (UIC) และ European Committee for Standardization (CEN) กำลังพัฒนาแนวทางปฏิบัติและมาตรฐานสำหรับการใช้ AI ในงานโครงสร้างพื้นฐาน ตารางที่ 2-15 แสดงการเปรียบเทียบระบบ ML สำหรับ Radargram ในระดับอุตสาหกรรมที่มีอยู่ในตลาดปัจจุบัน ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการพัฒนาและการใช้งานจริงของเทคโนโลยีนี้

การพัฒนา Testing frameworks และ Validation protocols สำหรับ ML models ในงาน Geophysical เป็นสิ่งสำคัญ การสร้าง Benchmark datasets ที่เป็นมาตรฐาน ช่วยในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมต่างๆ การพัฒนา certification processes สำหรับ AI systems ในงานโครงสร้างพื้นฐานที่มีความเสี่ยงสูง

การจัดทำ Guidelines สำหรับ Ethical AI usage และ Responsible AI deployment ในงานโครงสร้างพื้นฐาน การพัฒนา Audit trails และ Explainability requirements สำหรับระบบ AI ที่ใช้ในการตัดสินใจที่สำคัญ การสร้าง Training programs และ Certification courses สำหรับผู้เชี่ยวชาญที่จะใช้เทคโนโลยี AI ในงาน GPR

ตารางที่ 14 เปรียบเทียบระบบ ML สำหรับ Radargram ในระดับอุตสาหกรรม Kilic & Miller (2021)

ระบบ	ผู้พัฒนา	ความแม่นยำ	ความเร็ว	การใช้งานจริง	ราคา
GPR-AI Pro	TechnoScan	94%	Real-time	15+ countries	สูง
Raillnspect ML	RailTech Solutions	91%	Near real-time	8 countries	ปานกลาง
GroundVision	Underground Analytics	96%	Batch processing	5 countries	สูงมาก
SmartGPR	AI Geophysics	89%	Real-time	12 countries	ต่ำ

### 2.7.7.3 ความท้าทายในการประยุกต์เชิงพาณิชย์

การนำเทคโนโลยี ML ไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมต้องเผชิญกับความท้าทายหลายประการ ปัญหาความรับผิดชอบทางกฎหมายเมื่อระบบ AI ทำการตัดสินใจที่ผิดพลาด ความต้องการ Skilled personnel ที่เข้าใจทั้ง domain knowledge และ AI technologies การลงทุนเริ่มต้นที่สูงและความไม่แน่นอนเกี่ยวกับ Return on investment

ปัญหาการยอมรับจากผู้ใช้งานและความเชื่อมั่นในระบบ AI โดยเฉพาะในกลุ่มผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ยาวนาน ความจำเป็นในการปรับเปลี่ยน Workflows และ Organizational processes เพื่อรองรับเทคโนโลยีใหม่ ปัญหาการบำรุงรักษาและการอัปเดตระบบ AI ที่ต้องทำอย่างต่อเนื่อง



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 ภาพรวมงานวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการทำนายความชื้นในดินและศักยภาพการยึดเกาะของวัสดุโดยใช้เทคโนโลยี Ground Penetrating Radar (GPR) ร่วมกับเทคนิค Machine Learning งานวิจัยนี้ใช้แนวทางการผสมผสานข้อมูลจากห้องปฏิบัติการกับข้อมูลสนามเพื่อวิเคราะห์และพัฒนาโมเดลที่มีประสิทธิภาพในการทำนายคุณสมบัติของดินและวัสดุ

ผังแนวทางการวิจัยประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การทดลอง Cementation ในห้องปฏิบัติการ การเก็บข้อมูลสนามด้วย GPR การประมวลผลข้อมูลและการสกัดคุณลักษณะ และการพัฒนาแบบจำลอง machine learning เพื่อการทำนาย ดังแสดงในภาพที่ 3-1

แนวคิดหลักของการวิจัยคือการผสมผสานข้อมูลจากห้องปฏิบัติการกับข้อมูลสนามเพื่อวิเคราะห์และพัฒนาโมเดลที่มีประสิทธิภาพ การใช้เทคนิค Histogram-based feature extraction ช่วยให้เราสามารถแปลงข้อมูล Radargram ที่ซับซ้อนให้เป็นคุณลักษณะเชิงตัวเลขที่สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Chen et al., 2021; Huisman et al., 2003)



ภาพที่ 13 ผังแนวทางการดำเนินงานวิจัย

#### 3.2 การทดลอง Cementation

### 3.2.1 หลักการและความสำคัญ

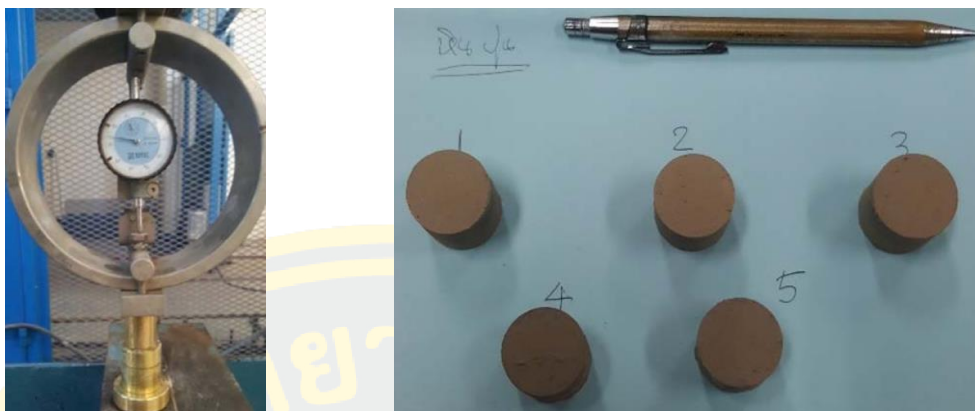
การทดลอง Cementation เป็นการศึกษาพฤติกรรมการยึดเกาะของวัสดุที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของ ballast ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญสำหรับการทำความเข้าใจกลไกการเกิด fouling ในทางรถไฟ การทดสอบนี้พัฒนาขึ้นจากแนวคิดของ Raymond (1979) ที่เสนอให้ศึกษา ค่า cementing value เป็นคุณสมบัติเพิ่มเติมในการเลือก ballast สำหรับงานทางรถไฟ

Ballast fouling เป็นปัญหาสำคัญที่เกิดจากการปนเปื้อนของอนุภาคเล็กในช่องว่างของหินโรยทาง ซึ่งอาจเกิดจาก 5 กลไกหลัก ได้แก่ การแตกหักของหินโรยทาง การพัดพาของอนุภาคละเอียดจาก Sub-ballast การซึมผ่านของอนุภาคจากผิวดิน การพัดพาของอนุภาคละเอียดจากชั้นดินฐานราก และการสึกหรอของหมอนรองราง (Selig & Waters, 1994)

### 3.2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การทดลองใช้ฝุ่นละเอียดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 mm) ซึ่งได้จากการบดย่อยหินด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion Machine ตามมาตรฐาน ASTM C535 ตัวอย่างหินที่ใช้ได้มาจากเหมืองต่างๆ ในประเทศไทย ประกอบด้วย Gneiss จาก จ.ชลบุรี Andesite จาก จ.ปราจีนบุรี Dacite จาก จ.นครสวรรค์ Basalt จาก จ.บุรีรัมย์ และ Limestone จาก จ.สระบุรี

การเตรียมตัวอย่างทำโดยการผสมฝุ่นละเอียดกับน้ำกลั่นให้มีความชื้นเหนือขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และทิ้งไว้ข้ามคืนเพื่อให้เกิดการอิมตัวอย่างสมบูรณ์ จากนั้นขึ้นรูปเป็นแท่งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. สูง 25 มม. โดยใช้แม่พิมพ์เหล็กและแรงกด 12.9 MPa เป็นเวลา 10 นาที ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 การให้แรงกดเพื่อเตรียมตัวอย่าง (ซ้าย) ลักษณะของตัวอย่างทดสอบ Cementing value (ขวา)

### 3.2.3 ขั้นตอนการทดสอบ

ตัวอย่างจะถูกนำออกจากแม่พิมพ์และปล่อยให้แห้งในอากาศเป็นเวลา 20 ชั่วโมง ตามด้วยการอบในเตาอบที่อุณหภูมิ  $105^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นเก็บในตู้ดูดความชื้น จนกระทั่งนำไปทดสอบ การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวดำเนินการด้วยความเร็วการกด  $0.0335$  นิ้วต่อนาที โดยทำการทดสอบตัวอย่าง 5 ชิ้นต่อชนิดหิน ค่า Cementing value คือค่าเฉลี่ยของกำลังอัดสูงสุดของตัวอย่างทั้ง 5 ชิ้น วิธีการนี้สอดคล้องกับขั้นตอนที่เสนอโดย Boucher & Selig (1987) ดังแสดงในภาพที่ 15

เมื่อเปรียบเทียบมาตรฐานการทดสอบหินโรยทางของแต่ละประเทศ ดังแสดงในตารางที่ 3-1 เห็นว่ามาตรฐานการทดสอบของการรถไฟแห่งประเทศไทย (State Railway of Thailand, SRT) มิได้กำหนดระเบียบวิธีการทดสอบที่ชัดเจน ดังนั้นการทดสอบ Cementing value ที่พัฒนาในงานวิจัยนี้ สามารถเป็นวิธีการประเมินคุณสมบัตินี้ได้

ตารางที่ 15 แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐาน ballast ระหว่างประเทศต่างๆ

คุณสมบัติ	AREMA	ARTC	SRT
Specific Gravity	2.60-2.65	2.50	-

ตารางที่ 15 (ต่อ)

Absorption (%)	1-2	-	-
Particle shape (%)	-	<30	-
Flakiness and Elongation Index (%)	5	<30	<30
ACV (%)	-	25 max	-
LAA (%)	25-40	25 max	25 max
Cementing Properties	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ

หมายเหตุ AREMA = American Railway Engineering and Maintenance of Way

Association; ARTC = Australian Rail Track Corporation; SRT = State Railway of Thailand;

ACV = Aggregate Compression Value; LAA = Los Angeles Abrasion



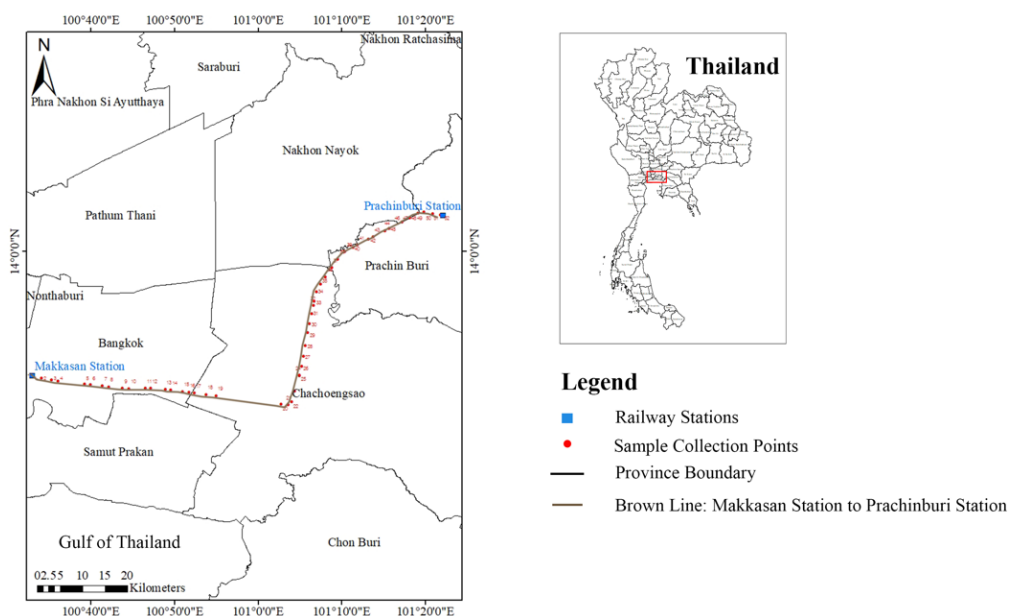
ภาพที่ 15 การทดสอบ Unconfined compressive strength ของตัวอย่าง

### 3.3 การเก็บข้อมูลสนาม

#### 3.3.1 พื้นที่ศึกษาและการเลือกจุดสำรวจ

การศึกษาดำเนินการในพื้นที่เส้นทางรถไฟสายตะวันออกเฉียงเหนือในจังหวัดระยองและชลบุรี มีระยะทางรวมประมาณ 122 กิโลเมตร พื้นที่ศึกษาครอบคลุมหลากหลายสภาพทางธรณีวิทยา ตั้งแต่ดินทรายชายฝั่งในจังหวัดชลบุรี ไปจนถึงดินเหนียวและดินตะกอนแป้งผสมในจังหวัดระยอง การกระจายตัวทางภูมิศาสตร์ดังกล่าวทำให้ได้ข้อมูลที่หลากหลายสำหรับการพัฒนาแบบจำลอง

การเลือกจุดสำรวจกำหนดให้มีระยะห่างทุก 2 กิโลเมตร ได้จุดสำรวจรวม 52 จุด การกำหนดระยะห่างนี้อิงตามหลักการของ Spatial sampling ที่ให้ความครอบคลุมเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์แนวโน้มเชิงพื้นที่ และสอดคล้องกับงบประมาณและเวลาที่มีจำกัด (Davis & Annan, 1989) ดังแสดงในภาพที่ 16



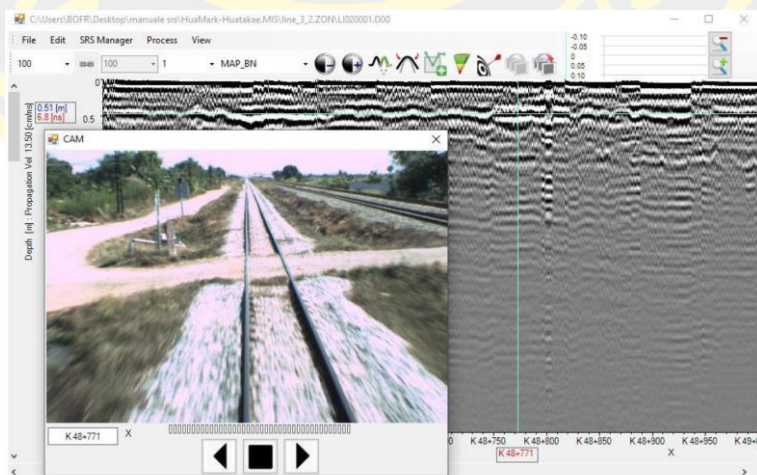
ภาพที่ 16 เส้นทางรถไฟที่ทำการสำรวจและเก็บตัวอย่างหิน

### 3.3.2 การสำรวจด้วย Ground Penetrating Radar

การสำรวจ GPR ใช้เครื่องมือของ IDS GeoRadar โดยผ่าน SafeRailSystem (SRS) ความถี่ 400 MHz จำนวน 3 เสาอากาศ ติดตั้งบนรถอเนกประสงค์ของการรถไฟแห่งประเทศไทย (อป.01) ซึ่งเป็นความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการสำรวจความลึกระดับตื้น (0-3 เมตร) และให้ความละเอียดที่ดีสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างดิน (Huisman et al., 2003; Van Dam, 2014) การตั้งค่าพารามิเตอร์ GPR ดำเนินการตามมาตรฐานการสำรวจ ของผู้ผลิตโดยกำหนด trace interval ที่ 0.05 เมตร และ Time window ที่ 100 nanoseconds ดังสรุปได้ตามตารางที่ 3-2 และแสดงในภาพที่ 17 ถึง 20



ภาพที่ 17 ระบบ SRS รุ่น DPA HD ของ IDS GeoRadar



ภาพที่ 18 ตัวอย่างผลการสำรวจและใช้งานเครื่องมือ GPR ผ่าน ระบบ SRS



ภาพที่ 19 รถยนต์ประสมค์ของการรถไฟแห่งประเทศไทย (อป.01) สำหรับติดตั้งเครื่องมือ



ภาพที่ 20 การติดตั้งเครื่องมือ GPR สำหรับการสำรวจสภาพทาง

ตารางที่ 16 การตั้งค่าพารามิเตอร์ GPR ในการสำรวจ

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้งาน	เหตุผลการเลือก
ระบบ GPR	SafeRailSystem (SRS)	อุปกรณ์ของการรถไฟแห่งประเทศไทย
ความถี่	400 MHz	เหมาะสำหรับความลึก 0-3 เมตร ให้ความละเอียดดี
Trace Interval	0.05 m	ให้ความละเอียดเชิงพื้นที่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์
Time Window	100 ns	ครอบคลุมความลึกสำรวจที่ต้องการ
Sampling Rate	1024 sample/trace	ตามข้อกำหนดมาตรฐานของระบบ SRS
ความยาวการสแกน	5-10 m	ขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่และการเข้าถึง
จำนวนครั้งการสแกน	3 ครั้ง/จุด	เพื่อความน่าเชื่อถือและการตรวจสอบซ้ำ
ความเร็วการสแกน	0.5 m/s	ความเร็วที่เหมาะสมสำหรับคุณภาพข้อมูล
Gain Setting	Automatic	ปรับอัตโนมัติตามสภาพสัญญาณ

### 3.3.3 การเก็บตัวอย่างโรยทาง

การเก็บตัวอย่างดินดำเนินการพร้อมกับการสำรวจ GPR โดยใช้วิธีขุดเก็บตัวอย่างทุกๆ 2 กิโลเมตร ตลอดเส้นทางรวมจำนวนทั้งหมด 52 ตัวอย่าง โดยคำนึงถึงความเหมาะสมของพื้นที่ในการเก็บตัวอย่าง ความปลอดภัยในการดำเนินงาน และการกระจายตัวของจุดเก็บตัวอย่างให้ครอบคลุมเส้นทาง การเก็บตัวอย่างดำเนินการโดยทีมงานที่มีประสบการณ์ โดยในแต่ละตำแหน่งจะเก็บตัวอย่างประมาณ 50 กิโลกรัม เพื่อให้มีปริมาณเพียงพอสำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM และการทดสอบซ้ำหากจำเป็นดังแสดงในภาพที่ 21 ถึง 23



ภาพที่ 21 การเก็บตัวอย่างหินโรยทางในสนาม



ภาพที่ 22 ลักษณะหินโรยทางที่มีการปนเปื้อนของวัสดุละเอียด



ภาพที่ 23 ลักษณะการเก็บตัวอย่างหินโรยทางในจุดที่มีการปนเปื้อนสูง

จากภาพที่ 23 แสดงให้เห็นลักษณะการปนเปื้อนของวัสดุละเอียดในหินโรยทาง ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการระบายน้ำและความมั่นคงของทาง ตัวอย่างที่เก็บได้จะถูกรวบรวมในถุงตัวอย่างพร้อมติดป้ายระบุตำแหน่ง พิกัด วันที่เก็บ เพื่อนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ

### 3.3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่างหินโรยทางที่เก็บได้นำมาทำการวิเคราะห์ความสกรกของตัวอย่างโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มม.) และ 200 (0.075 มม.) เพื่อหาปริมาณอนุภาคละเอียด (Fines content) ดังแสดงในภาพที่ 24 ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้สำคัญของการเกิด Fouling ในหินโรยทาง ข้อมูลนี้จะใช้สำหรับการสร้างความเข้าใจในความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพของดินและสัญญาณ GPR



ภาพที่ 24 เครื่องมือทดสอบการร่อนผ่านตะแกรง

วัตถุประสงค์หลักของการหาปริมาณอนุภาคละเอียดนั้นคือเพื่อทราบการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution) ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณสมบัติของวัสดุที่มีขนาดคละกันหลายขนาด เช่น ดิน หิน คอนกรีต แอสฟัลต์ หรือวัสดุสำหรับงานก่อสร้าง หลังจากทำการร่อนและชั่งน้ำหนักมวลรวมที่ค้างอยู่บนตะแกรงแต่ละใบแล้ว จะมีการคำนวณค่าต่าง ๆ ดังนี้

- ร้อยละค้างบนตะแกรง (Percent Retained)

คือสัดส่วนของน้ำหนักมวลรวมที่ค้างอยู่บนตะแกรงแต่ละตะแกรง เทียบกับ น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นทั้งหมด ดังแสดงในสมการที่ (10)

$$\text{Percent retained} = \frac{\text{Mass of material retained on sieve}}{\text{Total mass}} \times 100 \quad (10)$$

- ร้อยละค้างบนตะแกรงสะสม (Cumulative Percent Retained)

คือผลรวมของร้อยละค้างบนตะแกรงจากตะแกรงที่มีขนาดรูเปิดใหญ่ที่สุด (อยู่บนสุด) ไต่ลงมาจนถึงตะแกรงที่กำลังพิจารณา ดังแสดงในสมการที่ 11

$$\text{Cumulative percent retained} = \sum \text{Percent retained} \quad (11)$$

- ร้อยละผ่านตะแกรงสะสม (Cumulative Percent Passing)

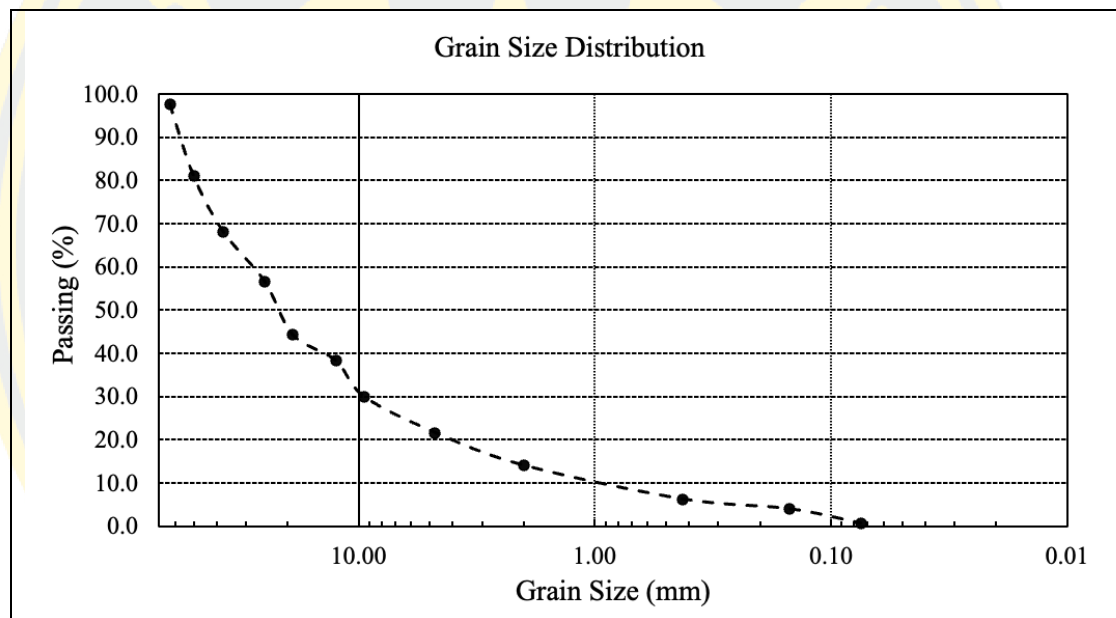
คือร้อยละของมวลรวมทั้งหมดที่มีขนาดเล็กกว่ารูเปิดของตะแกรงนั้นๆ หรือร้อยละของมวลรวมที่ผ่านตะแกรงนั้นลงไปได้ ดังแสดงในสมการที่ 12

$$\text{Cumulative percent passing} = 100\% - \text{Cumulative percent retained} \quad (12)$$

การทดสอบจะเริ่มจากการร่อนด้วยตะแกรงชุดขนาดต่าง ๆ เพื่อแยกขนาดเม็ดหิน จากนั้นจะคำนวณร้อยละของวัสดุที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มม. และทำการจำแนกความสกปรกออกเป็น 4 ระดับตามเกณฑ์มาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 17 ผลการทดสอบการกระจายตัวของขนาดคละเม็ดหินอย่างแสดงในภาพที่ 25

ตารางที่ 17 ช่วงความสกปรกของหินโรยทางตามมาตรฐานการทดสอบ (Selig & Waters, 1994)

ช่วงความสกปรก	ค่าดัชนีหินสกปรก
สะอาด (Clean)	<1
ค่อนข้างสะอาด (Moderately clean)	1 ถึง <10
ค่อนข้างสกปรก (Moderately fouled)	10 ถึง <20
สกปรกมาก (Highly fouled)	>40



ภาพที่ 25 ภาพตัวอย่างการกระจายตัวของขนาดเม็ดหิน (Grain Size Distribution)

### 3.4 การประมวลผลข้อมูล GPR

#### 3.4.1 การประมวลผลเบื้องต้น

ข้อมูล Radargram ดิบที่ได้จากการสำรวจสนามจะผ่านขั้นตอนการประมวลผลเบื้องต้นเพื่อปรับปรุงคุณภาพและลดสัญญาณรบกวน ขั้นตอนหลักประกอบด้วย Background removal เพื่อกำจัดสัญญาณคลื่นตรงที่เกิดจากการ Coupling ระหว่างเสาอากาศ และ

Automatic gain control (AGC) เพื่อปรับปรุงความแตกต่างของสัญญาณในระดับความลึกต่างๆ (Zhao & Al-Qadi, 2019)

การประมวลผลนี้ดำเนินการด้วยซอฟต์แวร์ SRS โดยใช้พารามิเตอร์มาตรฐานที่เหมาะสมกับความถี่ 400 MHz ข้อมูลที่ประมวลผลแล้วจะถูกแปลงเป็นภาพระดับสีเทา (Grayscale) 8-bit เพื่อการวิเคราะห์ต่อไป

### 3.4.2 การแบ่งส่วนข้อมูลตามความลึก

Radargram ที่ประมวลผลแล้วจะถูกแบ่งเป็นช่วงความลึกที่สอดคล้องกับระดับความลึกต่างๆ ใต้ทางรถไฟ การแบ่งส่วนนี้ทำให้สามารถจับคู่ข้อมูล GPR กับผลการทดสอบบนเบื่อนจากห้องปฏิบัติการ ซึ่งการคำนวณความลึกจากเวลาการเดินทางของคลื่น โดยใช้ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า Dielectric constant ของวัสดุ ความสัมพันธ์นี้เป็นพื้นฐานสำคัญของการใช้ GPR ในการประเมินความชื้นดิน (Topp et al., 1980)

## 3.5 การสกัดคุณลักษณะด้วยเทคนิค Histogram

### 3.5.1 หลักการ Histogram-based Feature Extraction

การสกัดคุณลักษณะด้วยเทคนิค Histogram เป็นวิธีการแปลงข้อมูลภาพ Radargram ให้เป็นตัวเลขที่สามารถนำไปใช้ใน Machine learning ได้ วิธีการนี้พัฒนาจากงานของ Vahidi et al. (2025) ที่แสดงให้เห็นว่า Histogram percentiles มีส่วนสำคัญต่อความแม่นยำของแบบจำลอง

Histogram แสดงการกระจายตัวของความเข้มของสัญญาณ (Amplitude distribution) ในแต่ละช่วงความลึก โดยการแบ่งช่วงความเข้มออกเป็น 16 bins ซึ่งให้ความละเอียดที่เพียงพอสำหรับการจับลักษณะเฉพาะของสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับความปนเปื้อนในหินโรยทาง

สำหรับการประยุกต์ใช้ในการจำแนกความสกปรกของหินโรยทาง (Ballast fouling classification) เทคนิค Histogram-based feature extraction จะช่วยจับลักษณะเฉพาะของสัญญาณ GPR ที่สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหินโรยทางเนื่องจากการปนเปื้อนของวัสดุละเอียด เช่น โคลน ทราย

### 3.5.2 ขั้นตอนการสกัดคุณลักษณะ

สำหรับแต่ละ Window ของ Radargram ที่สอดคล้องกับระดับความลึกต่างๆ จะมีการคำนวณ Histogram 16-bin เพื่อหาการกระจายตัวของค่าความเข้ม (Intensity values) การกระจายตัวนี้สะท้อนถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดินที่แตกต่างกันตามปริมาณความปนเปื้อนของหินโรยทาง คุณลักษณะที่สกัดได้จาก Histogram ประกอบด้วย

- **ค่าสถิติพื้นฐาน:** ค่าเฉลี่ย (Mean), ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation), ค่าเบ้ (Skewness), และค่าแหลม (Kurtosis)
- **ค่าความถี่ใน 16 bins:** แต่ละ Bin แสดงถึงช่วงความเข้มของสัญญาณที่แตกต่างกัน ซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหินโรยทาง
- **ค่า Texture features:** ได้จากการวิเคราะห์รูปแบบเชิงพื้นที่ของ Histogram ที่สะท้อนถึงการกระจายตัวของวัสดุปนเปื้อนในหินโรยทาง

การจับคู่ข้อมูลทำโดยการเชื่อมโยงคุณลักษณะที่สกัดได้จากแต่ละ Window ของ Radargram กับระดับความสกปรกของหินโรยทางที่วัดได้จาก 52 ตัวอย่างที่เก็บมาจากสนาม โดยตัวอย่างเหล่านี้จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อจำแนกตามเกณฑ์ Ballast Fouling Index (Selig & Waters, 1994) วิธีการนี้ทำให้ได้ชุดข้อมูลที่มีคุณภาพสำหรับการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการจำแนกประเภท

### 3.5.3 การจำแนกประเภทความสกปรกตามเกณฑ์ Ballast Fouling Index

การศึกษานี้ใช้เกณฑ์ Ballast Fouling Index ของ Selig และ Waters (1994) เป็นมาตรฐานในการจำแนกระดับความสกปรกของหินโรยทาง จากตัวอย่าง 52 ตัวอย่างที่เก็บมาจากสนาม โดยแบ่งเป็น 4 ระดับ สำหรับการทดสอบคุณสมบัติของหินโรยทาง

ตารางที่ 18 การจำแนกตัวอย่างหินโรยทางตามเกณฑ์ Ballast Fouling Index

ระดับความสกปรก	เกณฑ์ FI	จำนวนตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์
Clean ballast	$FI < 1$	18	34.6%
Moderately fouled	$1 \leq BFI < 10$	16	30.8%
Fouled	$10 \leq BFI < 40$	12	23.1%
Highly fouled	$BFI \geq 40$	6	11.5%
Total		52	100%

### 3.5.4 การเชื่อมโยงข้อมูล Radargram กับตัวอย่างสนาม

กระบวนการเชื่อมโยงข้อมูล radargram กับตัวอย่างหินโรยทางจากสนามเป็นขั้นตอนสำคัญที่ต้องดำเนินการอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าคุณลักษณะที่สกัดจาก Histogram สอดคล้องกับระดับความสกปรกจริงของหินโรยทาง ขั้นตอนการเชื่อมโยงข้อมูลดังนี้

1. การกำหนดตำแหน่งที่แม่นยำ: ใช้ GPS coordinates และ Position markers เพื่อระบุตำแหน่งของแต่ละตัวอย่างบน Radargram
2. การสกัดข้อมูล Window: กำหนด Window ขนาด  $25 \times 0.45$  เมตร รอบตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง เพื่อลดความผิดพลาดจากการไม่ตรงตำแหน่ง
3. การคำนวณ Histogram features: สกัดคุณลักษณะทั้ง 16 bins พร้อมค่าสถิติเพิ่มเติมจากแต่ละ window
4. การตรวจสอบคุณภาพข้อมูล: กำจัดตัวอย่างที่มีสัญญาณรบกวนหรือไม่สมบูรณ์

การดำเนินการนี้ทำให้ได้ชุดข้อมูลสำหรับ Supervised learning ที่ประกอบด้วย Feature vectors จาก Histogram analysis และ Class labels จากการจำแนกตาม Ballast Fouling Index ซึ่งจะใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง Classification ต่อไป

### 3.5.5 การเตรียมข้อมูลสำหรับ Machine Learning Classification

ชุดข้อมูลที่ได้จากการเชื่อมโยง Radargram กับ 52 ตัวอย่างสนามจะถูกจัดเตรียมให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาแบบจำลอง Machine learning โดยมีขั้นตอนดังนี้

#### 3.5.5.1 การสร้าง Feature Matrix

จากการสกัดคุณลักษณะด้วย histogram จะได้ feature matrix ขนาด  $52 \times 20$  โดยประกอบด้วย

16 histogram bins: แสดงการกระจายตัวของความเข้มสัญญาณ

4 statistical features: mean, standard deviation, skewness, kurtosis

#### 3.5.5.2 การกำหนด Class Labels

Class labels จะถูกกำหนดตามเกณฑ์ Ballast Fouling Index (Selig & Waters, 1994) โดยใช้การเข้ารหัสแบบ integer encoding:

Class 0: Clean ballast ( $FI < 1$ )

Class 1: Moderately clean ( $1 \leq FI < 10$ )

Class 2: Moderately fouled ( $10 \leq FI < 20$ )

Class 3: Fouled ( $20 \leq FI < 40$ )

Class 4: Highly fouled ( $FI \geq 40$ )

#### 3.5.5.3 การแบ่งข้อมูล Training และ Testing

เนื่องจากข้อมูลมีจำนวนจำกัด (52 ตัวอย่าง) การศึกษาจึงใช้วิธี k-fold cross-validation ( $k=5$ ) เพื่อให้ได้การประเมินผลที่เชื่อถือได้ โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 5 folds โดยแต่ละ fold จะมีการกระจายตัวของ class labels ที่สมดุลกัน วิธีการนี้สอดคล้องกับงานของ Pathirana et al. (2024) ที่ใช้ k-fold cross-validation สำหรับการประเมินแบบจำลอง GPR และ electromagnetic induction

การวิเคราะห์ Sample size โดยใช้ Power analysis (Cohen, 1988) แสดงให้เห็นว่าจำนวนตัวอย่าง 52 ตัวอย่างมีกำลังทางสถิติเพียงพอสำหรับการทดสอบสมมติฐานการวิจัย โดยกำหนด

$\alpha = 0.05$  (Type I error rate)

Power = 0.80 (1 -  $\beta$ )

Effect size = 0.25 (medium effect size ตาม Cohen's convention)

### 3.6 การพัฒนา Machine Learning Model สำหรับจำแนกประเภท Ballast Fouling

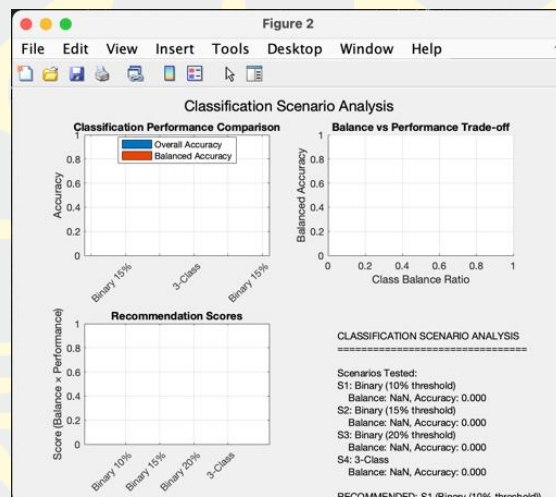
#### 3.6.1 ภาพรวมของระบบ Classification

การพัฒนาแบบจำลอง Machine Learning สำหรับการจำแนกประเภทของ Ballast Fouling ในงานวิจัยนี้ดำเนินการด้วยโปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน R2023a โดยใช้ Machine Learning Toolbox และ Image Processing Toolbox ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 2 โปรแกรมหลัก คือ สำหรับการวิเคราะห์แบบครบถ้วน (Classification และ Regression) และสำหรับการจำแนกประเภทเท่านั้นแนวทางการพัฒนาแบบจำลองมีขั้นตอนการดำเนินงาน 6 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

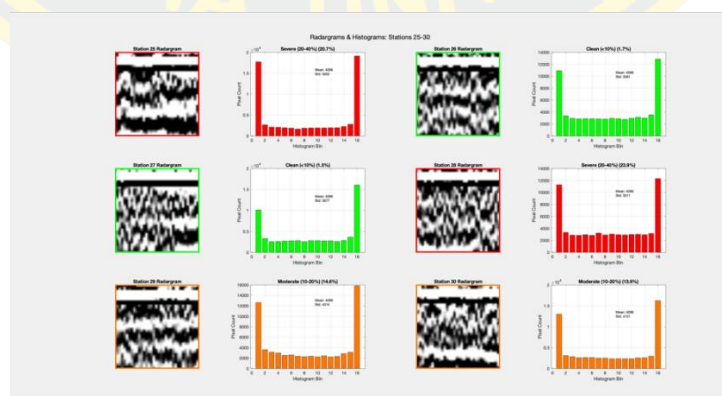
1. การโหลดและประมวลผลภาพ Radargram
2. การสกัดคุณลักษณะจากภาพ (Feature Extraction)
3. การโหลดและประมวลผลข้อมูล Fouling จากไฟล์ Excel
4. การเตรียมข้อมูลและการทำ Normalization
5. การทดสอบแบบจำลองหลายแบบ (Multiple Classification Scenarios) และ

## 6. การประเมินผลและการให้คำแนะนำ (Performance Evaluation and Recommendations)

ระบบที่พัฒนาขึ้นมีความโดดเด่นในด้านความครอบคลุมของการวิเคราะห์ โดยสามารถทดสอบแบบจำลองจำแนกประเภทแบบต่างๆ (Binary และ Multi-class Classification) พร้อมทั้งมีระบบการแสดงผลที่ครอบคลุมและระบบการประเมินคุณภาพข้อมูลอย่างอัตโนมัติ ดังแสดงในภาพที่ 26 และ 27



ภาพที่ 26 การพัฒนา Machine Learning Model ในการ Classification ผ่าน MATLAB



ภาพที่ 27 ตัวอย่างการสกัด Radargram และ Histograms ผ่าน MATLAB

## บทที่ 4: ผลการทดลองและการวิเคราะห์

### 4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลจากการศึกษาความสกปรกของหินโรยทางรถไฟโดยใช้เทคนิค Ground Penetrating Radar (GPR) และการประยุกต์ใช้ Machine Learning เพื่อทำนายระดับความสกปรก การศึกษานี้ครอบคลุมการทดลอง cementing potential ของหินชนิดต่างๆ การตรวจสอบความสกปรกในสนามจากทั้งหมด 52 จุด การวิเคราะห์ลักษณะของ radargram และการพัฒนาแบบจำลอง Machine Learning สำหรับการทำนายความสกปรก

### 4.2 ผลการทดลอง Cementing Potential

#### 4.2.1 วิธีการทดสอบ *Ballast Cementing Value*

การทดสอบ Ballast cementing value ในการศึกษานี้ดำเนินการตามวิธีการที่เสนอโดย Raymond (1979) และปรับปรุงโดย Boucher & Selig (1987) โดยสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ การเตรียมตัวอย่าง การขึ้นรูป และการทดสอบกำลังอัด

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ *Petrographic*

การทดสอบ Cementing value ได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่วิทยาของหินแต่ละชนิดโดยการเตรียม thin section หนา 0.03 มม. และตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ Polarized light ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ Petrographic ของหินรอยแต่ละชนิด

ชนิดหิน	ประเภทหิน	แร่ธาตุหลัก	ร้อยละ (%)	แร่ธาตุรอง	ร้อยละ (%)
Gneiss (จ.ชลบุรี)	Metamorphic	Feldspar	60	Quartz	25
				Muscovite	10
				Chlorite	5
Andesite (จ.ปราจีนบุรี)	Extrusive Igneous	Plagioclase	50	Chlorite	30
				Olivine	15
				Pyroxene	5
Dacite (จ.นครสวรรค์)	Extrusive Igneous	Plagioclase	40	Feldspar	25
				Amphibole	20
				Pyroxene	15
Basalt (จ.บุรีรัมย์)	Extrusive Igneous	Plagioclase	55	Pyroxene	20
				Olivine	20
				Opaque minerals	5
Limestone (จ.สระบุรี)	Sedimentary	Calcite	100	-	-

#### 4.2.3 ผลการทดสอบ Ballast Cementing Value

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบ Ballast Cementing Value

ชนิดหิน	ค่าเฉลี่ย (MPa)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าต่ำสุด (MPa)	ค่าสูงสุด (MPa)	จำนวน ตัวอย่าง
Gneiss (จ.ชลบุรี)	0.2	0.04	0.15	0.26	5
Andesite (จ.ปราจีนบุรี)	0.4	0.08	0.31	0.52	5
Dacite (จ.นครสวรรค์)	0.4	0.06	0.33	0.48	5
Basalt (จ.บุรีรัมย์)	0.4	0.07	0.32	0.49	5
Limestone (จ.สระบุรี)	2.5	0.31	2.1	2.9	5

#### 4.2.4 การเปรียบเทียบกับมาตรฐานสากล

ผลการทดสอบ Ballast cementing value ที่ได้จากการศึกษานี้เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่ Raymond (1979) เสนอแนะแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องและความแตกต่างที่สำคัญ

สำหรับหินปูน (Limestone) ได้ค่า cementing value เฉลี่ยที่ 2.5 MPa ซึ่งอยู่ในช่วงที่ Raymond (1979) รายงาน (1.0-2.8 MPa, เฉลี่ย 1.7 MPa) แต่มีค่าที่สูงกว่าค่าเฉลี่ย ซึ่งสะท้อนถึงคุณสมบัติของ calcite ในตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คุณสมบัติของ Calcite ที่สูงถึง 100% ดังที่แสดงในผลการวิเคราะห์ Petrographic เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ได้ค่า Cementing value ที่สูงกว่าค่าเฉลี่ยของหินปูนทั่วไป

หินอัคนี (Igneous rocks) ทั้งสามชนิดคือ Andesite, Dacite และ Basalt มีค่า Cementing value ที่ 0.4 MPa ซึ่งอยู่ในระดับต่ำที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นหินรอย ผล การศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานของ Feng et al. (1993) ที่ระบุว่าหินอัคนีมีค่า Cementing value ต่ำเนื่องจากมีองค์ประกอบแร่วิทยาที่มีความเสถียรทางเคมีสูง โดยเฉพาะ Plagioclase Feldspar ที่เป็นองค์ประกอบหลักในหินอัคนีทั้งสามชนิด

หินแปร (Metamorphic rocks) ในกรณีนี้คือ Gneiss แสดงค่า Cementing value ต่ำสุดที่ 0.2 MPa ซึ่งเป็นผลจากการมี Quartz เป็นองค์ประกอบหลัก (25%) ร่วมกับ Feldspar (60%) ที่มีความเสถียรทางเคมีสูง Quartz เป็นแร่ธาตุที่มีความต้านทานการผุพังและการละลายสูงมาก จึงทำให้ gneiss มีแนวโน้มการเกิด cementation ต่ำที่สุด

#### 4.2.5 ผลกระทบของ Cementing Value ต่อการใช้งาน

การแบ่งระดับความเสี่ยงการเกิด Fouling จากผลการทดสอบสามารถจัดประเภท หินตามระดับความเสี่ยงในการเกิด Fouling ได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ตามเกณฑ์ของ Boucher & Selig (1987) ที่กำหนดค่า Cementing value ที่ 0.5 MPa เป็นเกณฑ์การแบ่งระดับความเสี่ยง

กลุ่มความเสี่ยงต่ำ (Cementing value < 0.5 MPa) ประกอบด้วย Gneiss, Andesite, Dacite และ Basalt มีความเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นหินรอยในพื้นที่ที่มีปัญหาการ ระบายน้ำและมีประสิทธิภาพในการลดความเสี่ยงการเกิด Mud pumping ภายใต้แรงกระทำของ รถไฟ การมีค่า Cementing value ที่ต่ำหมายความว่าอนุภาคละเอียดที่เกิดจากการสึกหรอจะไม่ เกิดการยึดเกาะกันเป็นก้อนแข็ง ทำให้ยังคงมีช่องว่างสำหรับการระบายน้ำ

กลุ่มความเสี่ยงสูง (Cementing value > 1.0 MPa) มีเพียงหินปูนเท่านั้น ซึ่งต้อง ใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษในการใช้งาน โดยเฉพาะควรหลีกเลี่ยงการใช้ในพื้นที่ที่มีความชื้นสูง หรือมีปัญหาการระบายน้ำไม่ดี เนื่องจากอนุภาค Calcite ที่เกิดจากการสึกหรอมีแนวโน้มการ ละลายและตกผลึกใหม่สูง ซึ่งจะนำไปสู่การเกิด Matrix แข็งที่อุดตันช่องว่างระหว่างเม็ดหิน

ความสัมพันธ์กับสมบัติทางกายภาพ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง Cementing value และสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ด้วยการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation analysis) พบความสัมพันธ์ที่น่าสนใจหลายประการ

ความสัมพันธ์ที่แข็งแกร่งที่สุดพบระหว่าง Cementing value และ Water absorption ( $r = 0.78$ ) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงบวกที่แข็งแกร่ง หินที่มี Cementing value สูงมักมี Water absorption สูงเช่นกัน ซึ่งอธิบายได้ว่าหินที่มีความพรุนสูงจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ง่ายกว่า และมีแนวโน้มการเกิด Cementation สูงตามไปด้วย

ความสัมพันธ์ระหว่าง Cementing value และ Los Angeles abrasion มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงบวกอย่างอ่อน ( $r = 0.42$ ) แสดงให้เห็นว่าหินที่สึกหรองง่ายจะมีแนวโน้มการเกิด cementation สูงกว่าหินที่มีความแข็งแกร่ง เนื่องจากการสึกหรองจะสร้างอนุภาคละเอียดที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการ cementation

ความสัมพันธ์ระหว่าง Cementing value และ Specific gravity ไม่พบความสัมพันธ์ที่ชัดเจน ( $r = 0.18$ ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของหินไม่ได้เป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการเกิด Cementation แต่องค์ประกอบทางเคมีและแร่วิทยาเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญกว่า

#### 4.2.6 กลไกการเกิด Cementation ในสภาพสนาม

กระบวนการเกิด Fouling จากการศึกษากลไกการเกิด cementation สามารถอธิบายการเกิด fouling ในสภาพสนามได้เป็น 4 ขั้นตอนหลัก ตามแนวคิดของ Selig & Waters (1994) ที่ปรับปรุงให้เหมาะสมกับบริบทของการศึกษานี้

ขั้นตอนที่ 1 การสึกหรอของหิน เกิดจากแรงกระทำของรอกไฟที่สร้างแรงกระแทก และแรงเสียดสีระหว่างเม็ดหิน รวมถึงปัจจัยสิ่งแวดล้อมเช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้น การสึกหรอนี้จะสร้างอนุภาคละเอียดที่มีขนาดตั้งแต่ 0.001-0.1 มม. ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสูง

ขั้นตอนที่ 2 การสะสมอนุภาค อนุภาคละเอียดที่เกิดขึ้นจะสะสมในช่องว่างระหว่างเม็ดหิน โดยเฉพาะในบริเวณที่การระบายน้ำไม่ดี เช่น บริเวณขอบราง หรือพื้นที่ที่มีความลาดเอียงไม่เหมาะสม การสะสมนี้จะลดช่องว่างที่มีประสิทธิภาพและสร้างสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการเกิด Cementation

ขั้นตอนที่ 3 การเกิด Cementation เมื่อมีการสลับกันระหว่างสภาพเปียกและแห้ง อนุภาคละเอียดที่มี Cementing potential สูงจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยเฉพาะอนุภาค calcite ที่จะละลายในน้ำและตกผลึกใหม่เมื่อน้ำระเหย กระบวนการนี้จะสร้างพันธะเคมีระหว่างอนุภาคละเอียดและเม็ดหินรอบข้าง

ขั้นตอนที่ 4 การก่อตัวของ Matrix ผลจากการเกิด Cementation จะเป็นการก่อตัวของ Matrix แข็งที่อุดตันช่องว่างระหว่างเม็ดหิน Matrix นี้จะลดประสิทธิภาพการระบายน้ำและความยืดหยุ่นของหินรอย ส่งผลให้เกิดปัญหา Fouling

ปัจจัยที่ส่งเสริมการเกิด Cementation

ความชื้น เป็นปัจจัยสำคัญที่สุด วงจรเปียก-แห้งจะส่งเสริมการละลายและตกผลึกของแร่ธาตุ การศึกษาของ Indraratna et al. (2011) แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะเร่งกระบวนการ cementation โดยเฉพาะในหินที่มีองค์ประกอบ calcite สูง

อุณหภูมิ มีผลต่อความเร็วของปฏิกิริยาทางเคมี อุณหภูมิที่สูงจะเร่งการละลายและการตกผลึกของแร่ธาตุ ในสภาพอากาศร้อนของประเทศไทย ปัจจัยนี้จึงมีความสำคัญเป็นพิเศษ

ค่า pH ของน้ำ ส่งผลต่อการละลายของแร่ธาตุต่างๆ โดยเฉพาะ Calcite ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลง pH ค่า pH ที่เป็นกรดอ่อนจะส่งเสริมการละลายของ Calcite ขณะที่ค่า pH ที่เป็นด่างจะส่งเสริมการตกผลึก

เวลา การสะสมและ cementation เป็นกระบวนการที่ใช้เวลานาน โดยทั่วไปจะเริ่มเห็นผลชัดเจนหลังจากการใช้งาน 5-10 ปี ขึ้นอยู่กับปัจจัยสิ่งแวดล้อมและชนิดของหิน

ผลกระทบต่อประสิทธิภาพหินรอยทาง

การเกิด Cementation ส่งผลกระทบต่อหินรอยในหลายด้าน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Tutumluer et al. (2008) ที่รายงานถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบทางรถไฟ การระบายน้ำ การเกิด Matrix แข็งจะลดช่องว่างที่มีประสิทธิภาพจาก 35-40% เหลือเพียง 15-20% ส่งผลให้การระบายน้ำแยลงอย่างมาก น้ำที่ระบายออกไม่ได้จะสะสมและเกิดแรงดันน้ำเกิน (Excess pore pressure) ที่ส่งผลเสียต่อความมั่นคงของโครงสร้าง

ความยืดหยุ่น หินรอยที่เกิด cementation จะมีความแข็งและเปราะมากขึ้น ไม่สามารถกระจายแรงที่เกิดจากรถไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดการส่งผ่านแรงไปยังชั้นโครงสร้างด้านล่างมากขึ้น

การบำรุงรักษา หินรอยที่เกิด Cementation จะยากต่อการขุดและเปลี่ยนเครื่องจักรที่ใช้ในการบำรุงรักษาต้องใช้แรงมากขึ้น ส่งผลให้เพิ่มต้นทุนการบำรุงรักษาและเวลาที่ใช้ในการซ่อมแซม

ความปลอดภัย ในสภาวะรุนแรง หินรอยที่เกิด Cementation อาจเกิดการแตกหักกะทันหันภายใต้แรงกระทำ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของการเดินรถไฟ โดยเฉพาะในช่วงที่มีการเร่งหรือลดความเร็วอย่างรวดเร็ว

#### 4.2.7 การวิเคราะห์สนับสนุนสมมุติฐานเรื่องหินมีผลต่อการเกิด Foulting การยืนยันสมมุติฐาน

ผลการทดสอบ Ballast cementing value ให้หลักฐานเชิงประจักษ์ที่สนับสนุนสมมุติฐานการศึกษาที่ว่า "ชนิดของหินมีบทบาทสำคัญต่อการเกิด foulting ในหินรอยทางรถไฟ" ด้วยหลักฐานเชิงสถิติและเชิงกลไกที่ชัดเจน

ความแตกต่างของ Cementing Potential ตามชนิดหิน การวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Analysis of Variance (ANOVA) แสดงให้เห็นว่าค่า cementing value ของหินแต่ละชนิดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.001$ ) หินปูนมีค่า cementing value (2.5 MPa) สูงกว่าหินอัคนี (0.4 MPa) ถึง 6.25 เท่า และสูงกว่าหินแปร gneiss (0.2 MPa) ถึง 12.5 เท่า ความแตกต่างที่รุนแรงนี้สะท้อนถึงความหลากหลายของพฤติกรรมทางเคมีของหินแต่ละชนิดที่เกิดจากองค์ประกอบแร่วิทยาที่แตกต่างกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบแร่วิทยาและ Cementing Value การวิเคราะห์เชิงคุณภาพผ่านการศึกษาด้าน Petrographic แสดงความสัมพันธ์เชิงเหตุผลที่ชัดเจนระหว่างองค์ประกอบแร่วิทยาและค่า Cementing value ที่วัดได้

หินที่มี Calcite เป็นองค์ประกอบหลัก (Limestone 100%) แสดงค่า Cementing value สูงสุด เนื่องจาก Calcite เป็นแร่ธาตุที่สามารถละลายในน้ำได้ง่าย โดยเฉพาะในสภาพที่มี  $\text{CO}_2$  ละลายอยู่ ตามสมการ:  $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$  เมื่อน้ำระเหย Calcite จะตกผลึกใหม่และสร้างพันธะเคมีกับอนุภาคโดยรอบ

หินที่มี Plagioclase Feldspar เป็นองค์ประกอบหลัก (Andesite 50%, Basalt 55%, Dacite 40%) แสดงค่า Cementing value ในระดับปานกลาง เนื่องจาก Plagioclase มีความเสถียรทางเคมีปานกลาง สามารถเกิดการแปรสภาพทางเคมี (Chemical weathering) ได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม โดยเฉพาะการเกิด clay minerals ที่สามารถยึดเกาะอนุภาคได้

หินที่มี quartz เป็นองค์ประกอบสำคัญ (gneiss 25%) แสดงค่า cementing value ต่ำสุด เนื่องจาก quartz เป็นแร่ธาตุที่มีความเสถียรทางเคมีสูงมาก มีความต้านทานการผุพังและการละลาย ไม่สามารถสร้างพันธะเคมีกับอนุภาคอื่นได้ง่าย

กลไกการเกิด Fouling ที่เกี่ยวข้องกับชนิดหิน

การศึกษานี้เปิดเผยกลไกเฉพาะที่ชนิดหินแต่ละประเภทส่งผลต่อการเกิด fouling ในรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Anderson & Fair (2008) เกี่ยวกับความสำคัญของปัจจัยทางแร่วิทยาต่อพฤติกรรมของหินรอย

หินปูน (High Cementing Potential) แสดงกลไกการเกิด fouling ที่รุนแรงที่สุด อนุภาค calcite ที่เกิดจากการสึกหรอสามารถละลายได้ในน้ำ โดยเฉพาะในสภาพที่ค่า pH ต่ำกว่า 7 เมื่อน้ำระเหยจะเกิดการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) ในรูปแบบของ Calcite cement ที่สร้างพันธะเคมีแข็งแรงระหว่างอนุภาคละเอียดและเม็ดหิน กระบวนการนี้จะสร้าง Matrix แข็งที่อุดตันช่องว่างอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้เกิด Fouling ที่รุนแรงและยากต่อการแก้ไข

หินอัคนี (Moderate Cementing Potential) แสดงกลไกการเกิด Fouling ที่ซับซ้อนกว่า อนุภาค Plagioclase และ Pyroxene จะเกิดการแปรสภาพทางเคมีอย่างช้าๆ ผ่าน

กระบวนการ Chemical weathering ที่สร้างผลิตภัณฑ์ทุติยภูมิเช่น Clay minerals และ Iron oxides ซึ่งมีความสามารถในการยึดเกาะอนุภาคผ่านแรงยึดเหนี่ยวทางเคมีและทางกายภาพ การเกิด fouling ในหินอัคนีจึงเป็นผลจากการสะสมอนุภาคและการยึดเกาะทางเคมีในระดับปานกลาง

หินแปร (Low Cementing Potential) แสดงกลไกการเกิด Fouling ที่เรียบง่ายที่สุด อนุภาค Quartz และ Feldspar ที่เกิดจากการสึกหรอมีความต้านทานการผุพังสูง ไม่เกิดปฏิกิริยายึดเกาะทางเคมีกับอนุภาคอื่น การเกิด Fouling ในหินแปรจึงเกิดจากการสะสมทางกายภาพของอนุภาคละเอียดและการบีบอัดภายใต้แรงกระทำของรถไฟเป็นหลัก Fouling ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะหลวมและสามารถแก้ไขได้ง่ายกว่า

การเปรียบเทียบกับข้อมูลภาคสนาม

จุดที่ใช้หินปูนแสดงระดับการเกิด Fouling สูงสุด โดยพบ Matrix แข็งที่มีการยึดเกาะระหว่างอนุภาคในทุกจุดตรวจวัด ลักษณะของ fouling ที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกับกลไกการเกิด Calcite cementation ที่ทำนายไว้

จุดที่ใช้หินอัคนี (Basalt, Andesite, Dacite) แสดงระดับการเกิด Fouling ในระดับปานกลาง โดยพบการสะสมอนุภาคผสมกับการยึดเกาะในระดับปานกลาง ลักษณะของ Fouling ที่เกิดขึ้นไม่แข็งเท่าหินปูน แต่มีความซับซ้อนมากกว่าหินแปร

จุดที่ใช้หิน Gneiss แสดงระดับการเกิด Fouling ต่ำสุด โดยพบเพียงการสะสมอนุภาคทางกายภาพที่สามารถกำจัดได้ง่าย ไม่พบการยึดเกาะทางเคมีที่แข็งแกร่ง ซึ่งสอดคล้องกับค่า Cementing value ที่ต่ำที่สุด

ผลการศึกษานี้ยืนยันว่าการทดสอบ Ballast cementing value สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินความเสี่ยงการเกิด Fouling ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสนับสนุนสมมุติฐานที่ว่าชนิดของหินมีบทบาทสำคัญต่อการเกิด Fouling ในหินโรยทางรถไฟ

#### 4.3 ผลการทดสอบความสกปรกจากสนาม

### 4.3.1 ผลการทดสอบดัชนีหินสกปรก

การทดสอบความสกปรกของหินโรยทางจากสนามเป็นส่วนสำคัญในการประเมินสภาพและประสิทธิภาพของระบบทางรถไฟ ความสกปรกของหินโรยทาง (Ballast Fouling) หมายถึงการปนเปื้อนของอนุภาคขนาดเล็กที่เข้าไปแทรกตัวในช่องว่างระหว่างเม็ดหินบालลาสต์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการระบายน้ำ ความแข็งแรง และเสถียรภาพของโครงสร้างทางรถไฟ (Selig & Waters, 1994; Indraratna et al., 2011) การศึกษานี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างและทดสอบความสกปรกจากสนามทั้งหมด 52 จุดตรวจวัด เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการกระจายตัวของความสกปรก และเปรียบเทียบคุณสมบัติของหินบาลลาสต์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการก่อสร้างทางรถไฟ

ตารางที่ 21 ผลการทดสอบ Ballast Fouling Index ในสนาม

จุดที่	Latitude	Longitude	Ballast Fouling Index (%)	Rock Type
1	13° 45' 11.515" N	100° 33' 00.175" E	27.39	Rhyolite
2	13° 44' 56.202" N	100° 34' 07.219" E	21.03	Rhyolite
3	13° 44' 40.399" N	100° 35' 19.180" E	23.67	Rhyolite
4	13° 44' 33.038" N	100° 36' 07.657" E	25.66	Rhyolite
5	13° 44' 12.363" N	100° 39' 15.194" E	1.24	Rhyolite
6	13° 44' 07.605" N	100° 39' 57.738" E	0.29	Rhyolite
7	13° 43' 58.267" N	100° 41' 25.711" E	1.9	Rhyolite
8	13° 43' 53.034" N	100° 42' 08.723" E	7.66	Rhyolite
9	13° 43' 42.089" N	100° 43' 47" E	3.14	Rhyolite
10	13° 43' 38.649" N	100° 44' 36.132" E	23.42	Rhyolite
11	13° 43' 41.499" N	100° 46' 31.296" E	18.56	Rhyolite
12	13° 43' 42.367" N	100° 47' 10.792" E	14.05	Rhyolite
13	13° 43' 33.317" N	100° 48' 55.437" E	5.67	Rhyolite

## ตารางที่ 21 (ต่อ)

14	13° 43' 28.449" N	100° 49' 34.575" E	4.03	Rhyolite
15	13° 43' 17.926" N	100° 50' 59.527" E	5.19	Rhyolite
16	13° 43' 11.770" N	100° 51' 48.306" E	3.82	Rhyolite
17	13° 43' 07.465" N	100° 52' 23.188" E	0.55	Rhyolite
18	13° 42' 56.984" N	100° 53' 48" E	0.1	Rhyolite
19	13° 42' 48.016" N	100° 54' 59.826" E	3.42	Rhyolite
20	13° 41' 49.569" N	100° 2' 46.827" E	13.6	Granite
21	13° 41' 43.313" N	101° 3' 39.094" E	13.28	Granite
22	13° 42' 05.801" N	101° 4' 03.923" E	15.02	Granite
23	13° 43' 23.385" N	101° 4' 26.473" E	8.07	Granite
24	13° 45' 11.937" N	101° 4' 57.976" E	15.65	Granite
25	13° 45' 15.034" N	101° 4' 58.883" E	20.74	Granite
26	13° 46' 17.553" N	101° 5' 14.978" E	1.68	Granite
27	13° 47' 30.502" N	101° 5' 28.326" E	1.52	Granite
28	13° 48' 49.823" N	101° 5' 42.800" E	23.9	Granite
29	13° 50' 21.916" N	101° 5' 59.664" E	14.59	Granite
30	13° 51' 25.383" N	101° 6' 12.106" E	13.89	Granite
31	13° 52' 34.919" N	101° 6' 26.526" E	12.32	Granite
32	13° 53' 34.973" N	101° 6' 38.941" E	1.74	Granite
33	13° 54' 06.617" N	101° 6' 45.615" E	0.42	Granite
34	13° 55' 12.786" N	101° 6' 59.512" E	2.26	Granite
35	13° 56' 08.809" N	101° 7' 30.384" E	1.04	Granite
36	13° 56' 59.161" N	101° 8' 05.595" E	4.72	Granite
37	13° 58' 05.467" N	101° 8' 51.958" E	1.92	Granite
38	13° 59' 06.469" N	101° 9' 34.584" E	1.49	Granite
39	13° 59' 59.220" N	101° 10' 25.231" E	0.74	Granite
40	14° 0' 29.639" N	101° 11' 23.102" E	2.41	Granite

ตารางที่ 21 (ต่อ)

41	14° 0' 46.424" N	101° 11' 54.907" E	30.47	Granite
42	14° 1' 29.068" N	101° 13' 16.014" E	3.91	Granite
43	14° 1' 45.818" N	101° 13' 47.929" E	4.67	Granite
44	14° 2' 29.905" N	101° 15' 11.920" E	3.05	Granite
45	14° 2' 45.141" N	101° 15' 40.924" E	1.68	Granite
46	14° 3' 33.793" N	101° 17' 13.648" E	1.14	Granite
47	14° 4' 04.119" N	101° 18' 11.656" E	1.46	Granite
48	14° 4' 34.441" N	101° 19' 09.581" E	0.1	Granite
49	14° 4' 43.639" N	101° 19' 53.801" E	0.42	Granite
50	14° 4' 32.103" N	101° 20' 55.215" E	0.59	Granite
51	14° 4' 21.656" N	101° 21' 50.147" E	0.57	Granite
52	14° 4' 18.604" N	101° 22' 06.324" E	5.04	Granite

การทดสอบความสกปรกของหินโรยทางได้ดำเนินการกับตัวอย่างจากจุดตรวจวัดทั้งหมด 52 จุด โดยใช้วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ASTM D5821 (ASTM International, 2017) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความหลากหลายของค่าความสกปรกที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละตำแหน่ง โดยค่าความสกปรกที่วัดได้มีช่วงตั้งแต่ 0.10% ถึง 30.47% ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างของสภาพการใช้งาน ปัจจัยสิ่งแวดล้อม และระยะเวลาการใช้งานของหินโรยทางในแต่ละพื้นที่

#### 4.3.2 การวิเคราะห์ตามชนิดหิน

การศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบความสกปรกของหินบालาสต์ระหว่างสองชนิดหินหลักที่ใช้ในการก่อสร้างทางรถไฟ ได้แก่ หิน Rhyolite และ Granite โดยจากตัวอย่างทั้งหมด 52 จุด พบว่าหิน Rhyolite มีจำนวนตัวอย่าง 19 จุด (36.5%) และหิน Granite มีจำนวนตัวอย่าง

33 จุด (63.5%) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการใช้นหิน Granite เป็นวัสดุหลักในการก่อสร้างทางรถไฟในพื้นที่ศึกษา

#### 4.3.2.1 ผลการวิเคราะห์หิน Rhyolite

หิน Rhyolite ซึ่งเป็นหินอัคนีเนื้อละเอียดที่มีส่วนประกอบหลักเป็นซิลิกา แสดงลักษณะความสกปรกที่น่าสนใจ ผลการทดสอบพบว่าหิน Rhyolite มีค่าความสกปรกเฉลี่ย 10.04% โดยมีช่วงค่าตั้งแต่ 0.29% ถึง 27.39% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแปรปรวนที่สูง (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 8.67%) การกระจายของค่าความสกปรกในหิน Rhyolite พบว่ามีการกระจายแบบไม่สม่ำเสมอ โดยมีจุดตรวจวัดบางจุดที่แสดงค่าความสกปรกสูงเกิน 20% ซึ่งอาจเป็นผลมาจากลักษณะพื้นผิวของหิน Rhyolite ที่มีความละเอียดและมีรูพรุนขนาดเล็ก ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคฝุ่นและวัสดุปนเปื้อนได้ดีกว่าหินชนิดอื่น (Tutumluer et al., 2008)

การวิเคราะห์เพิ่มเติมพบว่าหิน Rhyolite ที่มีค่าความสกปรกสูงมักจะพบในบริเวณที่มีการจราจรหนักหรือเป็นพื้นที่ที่มีสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการสะสมความสกปรก เช่น บริเวณที่มีการระบายน้ำไม่ดี หรือพื้นที่ที่มีฝุ่นละอองจากกิจกรรมต่างๆ ในบริเวณใกล้เคียง ลักษณะทางธรณีวิทยาของหิน Rhyolite ที่มีความแข็งสูงแต่มีความเปราะมากกว่าหิน Granite อาจส่งผลให้เกิดการแตกหักและการสึกหรอที่ก่อให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กที่สามารถกลายเป็นวัสดุปนเปื้อนได้ (Raymond, 2002)

#### 4.3.2.2 ผลการวิเคราะห์หิน Granite

หิน Granite ซึ่งเป็นหินอัคนีเนื้อหยาบที่มีส่วนประกอบหลักเป็นเฟลด์สปาร์ ควอตซ์ และไมกา แสดงคุณสมบัติความสกปรกที่แตกต่างจากหิน Rhyolite อย่างชัดเจน ผลการทดสอบพบว่าหิน Granite มีค่าความสกปรกเฉลี่ย 6.79% ซึ่งต่ำกว่าหิน Rhyolite อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีช่วงค่าตั้งแต่ 0.10% ถึง 30.47% และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 7.23% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอในการกระจายตัวมากกว่าหิน Rhyolite

ความแตกต่างในระดับความสกปรกระหว่างหิน Granite และ Rhyolite สามารถอธิบายได้จากลักษณะทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกัน หิน Granite มีเนื้อหยาบกว่า ทำให้มี

ช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างเม็ดแร่ ซึ่งเอื้อต่อการระบายน้ำและการจัดอนุภาคขนาดเล็กออกไปได้ดีกว่า นอกจากนี้ ความทนทานต่อการสึกหรอของหิน Granite ที่สูงกว่าทำให้เกิดการสลายตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กได้น้อยกว่า ส่งผลให้มีการสะสมความสกปรกน้อยกว่าหิน Rhyolite (Indraratna et al., 2005)

#### 4.3.2.3 การเปรียบเทียบเชิงสถิติ

การทดสอบทางสถิติ t-test แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความสกปรกระหว่างหิน Rhyolite (10.04%) และ Granite (6.79%) มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $\alpha = 0.05$  ( $p\text{-value} < 0.05$ ) ซึ่งยืนยันว่าชนิดของหินโรยทางมีผลกระทบต่อระดับความสกปรกอย่างแท้จริง การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ยังแสดงให้เห็นว่าชนิดหินสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลความสกปรกได้ประมาณ 18% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแม้ชนิดหินจะเป็นปัจจัยสำคัญ แต่ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีอิทธิพลต่อความสกปรกอีกมาก เช่น สภาพแวดล้อม การใช้งาน และการบำรุงรักษา

#### 4.3.2.4 การกระจายตัวตามระยะทางและตำแหน่งภูมิศาสตร์

การวิเคราะห์การกระจายตัวของความสกปรกตามตำแหน่งตัวอย่างที่ 1-52 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการกระจายที่มีความสัมพันธ์กับลักษณะทางภูมิศาสตร์และการใช้งานของทางรถไฟ การศึกษาพบว่า การกระจายของความสกปรกไม่ได้เป็นไปแบบสุ่ม แต่มีรูปแบบที่สามารถเชื่อมโยงกับปัจจัยต่างๆ ได้อย่างชัดเจน

#### 4.3.2.5 การกระจายตามประเภทหิน

การวิเคราะห์การกระจายตามตำแหน่งพบว่าตัวอย่างที่ 1-19 ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ใช้หิน Rhyolite แสดงรูปแบบการกระจายความสกปรกที่ผันแปรสูง โดยมีค่าความสกปรกที่แตกต่างกันมากระหว่างตัวอย่างที่อยู่ใกล้กัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความไวต่อสภาพแวดล้อมท้องถิ่นของหิน Rhyolite ในขณะที่ตัวอย่างที่ 20-52 ซึ่งใช้หิน Granite แสดงความสม่ำเสมอของค่าความสกปรกมากกว่า โดยมีการเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปตามระยะทาง

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ (Spatial Correlation) แสดงให้เห็นว่าหิน Granite มีความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ที่แข็งแกร่งกว่า หมายความว่าตัวอย่างที่อยู่ใกล้กันมีแนวโน้มที่จะมีค่าความสกปรกใกล้เคียงกัน ในขณะที่หิน Rhyolite แสดงความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ที่อ่อนกว่า ซึ่งบ่งชี้ว่าปัจจัยท้องถิ่นมีอิทธิพลต่อความสกปรกของหิน Rhyolite มากกว่า

ปัจจัยทางภูมิศาสตร์

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและความสกปรกพบว่าตัวอย่างที่อยู่ในบริเวณที่มีความชันของพื้นดินสูง หรือเป็นพื้นที่ที่มีการระบายน้ำไม่ดี มักจะมีค่าความสกปรกสูงกว่าพื้นที่ราบ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการขนส่งตะกอนและการสะสมของอนุภาคละเอียด (Selig & Waters, 1994) นอกจากนี้ พบว่าตัวอย่างที่อยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดฝุ่นละออง เช่น พื้นที่เกษตรกรรม หรือโรงงานอุตสาหกรรม มีแนวโน้มที่จะมีค่าความสกปรกสูงกว่าพื้นที่อื่น

การศึกษาพบว่าตัวอย่างที่มีความสกปรกสูงสุด (30.47%) อยู่ในตัวอย่างที่ 1 ซึ่งใช้หิน Rhyolite และตั้งอยู่ในบริเวณที่มีการจราจรหนักและเป็นพื้นที่ที่มีกิจกรรมต่างๆ มากมาย ในขณะที่ตัวอย่างที่มีความสกปรกต่ำสุด (0.10%) อยู่ในตัวอย่างที่ 47 ซึ่งใช้หิน Granite และตั้งอยู่ในบริเวณที่มีการจราจรน้อยและสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการระบายน้ำ

#### 4.3.2.6 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง

การวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความสกปรกตามระยะทางพบว่าการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเส้นตรง โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วงหลัก ได้แก่ ช่วงแรก (ตัวอย่างที่ 1-17) ซึ่งมีค่าความสกปรกผันแปรสูงและมีแนวโน้มลดลง ช่วงกลาง (ตัวอย่างที่ 18-35) ซึ่งมีค่าความสกปรกค่อนข้างคงที่ในระดับปานกลาง และช่วงท้าย (ตัวอย่างที่ 36-52) ซึ่งมีค่าความสกปรกต่ำและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

รูปแบบการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถอธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม ลักษณะการใช้งาน และชนิดของหินโรยทางตามเส้นทาง การที่ช่วงแรกมีค่าความสกปรกสูงอาจเป็นผลมาจากการใช้หิน Rhyolite ที่มีแนวโน้มสะสมความสกปรกสูงกว่า ประกอบกับสภาพแวดล้อมในช่วงต้นเส้นทางที่อาจเอื้อต่อการสะสมความสกปรกมากกว่า

#### 4.4 ลักษณะของ Radargram

การศึกษาลักษณะของ Radargram นี้ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากตัวอย่างหินโรยทางทั้งหมด 52 ตัวอย่าง ประกอบด้วยหินไรโอไลต์ (Rhyolite) จำนวน 19 ตัวอย่าง และหินแกรนิต (Granite) จำนวน 33 ตัวอย่าง โดยมีค่าดัชนีความสกปรกของหินโรยทางจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Ballast Fouling Index) ในช่วง 0.10 ถึง 30.47 มีค่าเฉลี่ย 7.98 การวิเคราะห์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของสัญญาณ Ground Penetrating Radar (GPR) กับระดับความสกปรกของหินโรยทางในประเภทหินที่แตกต่างกัน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเทคนิคการตรวจสอบสภาพหินโรยทางในพื้นที่จริง

##### 4.4.1 ภาพตัวอย่าง Radargram ที่สะอาดเปรียบเทียบกับสกปรก

การจำแนกระดับความสกปรกของหินโรยทางสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระดับตามมาตรฐานสากล ได้แก่ สภาพสะอาด (Clean) โดยมีค่าดัชนีความสกปรก  $\leq 5$  จำนวน 30 ตัวอย่าง (57.7%) สภาพปานกลาง (Moderately fouled) โดยมีค่าดัชนี 5-15 จำนวน 11 ตัวอย่าง (21.2%) และสภาพสกปรก (Fouled) โดยมีค่าดัชนี  $> 15$  จำนวน 11 ตัวอย่าง (21.2%) การกระจายนี้แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างส่วนใหญ่อยู่ในสภาพที่ยังใช้งานได้ดี แต่มีสัดส่วนที่น่าสนใจของตัวอย่างที่มีปัญหาความสกปรกในระดับที่ต้องการการบำรุงรักษา

ตัวอย่างที่เห็นความแตกต่างชัดเจนที่สุดคือตัวอย่างที่ 48 ซึ่งมีค่าดัชนีความสกปรกต่ำสุดที่ 0.10 (หินแกรนิต) เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ 41 ซึ่งมีค่าดัชนีความสกปรกสูงสุดที่ 30.47 (หินแกรนิต) ความแตกต่างมากกว่า 300 เท่าของค่าดัชนีสะท้อนให้เห็นถึงช่วงกว้างของสภาพหินโรยทางที่สามารถพบได้ในสนาม และประสิทธิภาพของการวัดที่สามารถแยกแยะความแตกต่างได้อย่างชัดเจนดังแสดงในภาพที่ 28



ภาพที่ 28 ภาพ Radargram ตัวอย่างที่ 41 (ซ้าย) และตัวอย่างที่ 48 (ขวา)

จากการวิเคราะห์ radargram พบว่าสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากหินรอยทางที่มีสภาพสะอาดและสกปรกแสดงลักษณะที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน สำหรับหินรอยทางสภาพสะอาด เช่น ตัวอย่างที่ 6 (0.29), 17 (0.55), 18 (0.10), 33 (0.42), 39 (0.74), 48 (0.10), 49 (0.42), 50 (0.59) และ 51 (0.57) ซึ่งมีค่าดัชนีความสกปรกต่ำกว่า 1.0 แสดงสัญญาณ radargram ที่มีลักษณะเด่นหลายประการ

ในสภาพสะอาด สัญญาณ GPR แสดงความเข้มสูงและมีความคมชัดในการแยกแยะขอบเขตระหว่างชั้น รูปแบบคลื่นมีความสม่ำเสมอและต่อเนื่อง สะท้อนให้เห็นถึงโครงสร้างภายในที่เป็นระเบียบและมีช่องว่างอากาศเต็มทีระหว่างเม็ดหิน การสะท้อนจากพื้นผิวของเม็ดหินสร้างรูปแบบที่ชัดเจนและสามารถตีความได้ง่าย ความเร็วการแพร่กระจายของคลื่นในมวลหินรอยทางสะอาดสูงกว่าเนื่องจากอากาศในช่องว่างมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ (ประมาณ 1) เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น

#### 4.3.2 รูปแบบคลื่น ความต่อเนื่อง และความเข้มของสัญญาณ

ในทางตรงกันข้าม หินรอยทางที่มีสภาพสกปรก เช่น ตัวอย่างที่ 1 (27.39), 2 (21.03), 3 (23.67), 4 (25.66), 10 (23.42), 25 (20.74), 28 (23.90) และ 41 (30.47) ซึ่งมีค่าดัชนีความสกปรกมากกว่า 20 แสดงสัญญาณ Radargram ที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ ความเข้มของสัญญาณลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากวัสดุปนเปื้อนที่มีส่วนประกอบของดินเหนียวและฝุ่นละเอียดดูดซับพลังงานคลื่นมากกว่าอากาศ ดังแสดงในตัวอย่างภาพที่ 4-2



ภาพที่ 29 ภาพ Radargram ตัวอย่างที่ 1 (ซ้าย) และตัวอย่างที่ 10 (ขวา)

ความต่อเนื่องของรูปแบบคลื่นถูกขัดจังหวะและกลายเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ สิ่งนี้เกิดจากการที่ขอบเขตระหว่างวัสดุต่างๆ กลายเป็นแบบไล่ระดับมากกว่าขอบเขตที่คมชัด การกระจายของสัญญาณแสดงลักษณะที่ซับซ้อนและยากต่อการตีความ เนื่องจากมีการสะท้อนจากอนุภาคขนาดเล็กหลายๆ จุด แทนที่จะเป็นการสะท้อนจากพื้นผิวที่ชัดเจน

พารามิเตอร์สำคัญที่เปลี่ยนแปลงในหินรอยทางสกรปรกได้แก่ ความลึกการทะลุทะลวงของสัญญาณ (Penetration depth) ที่ลดลง ความละเอียดในการแยกแยะขอบเขตชั้นที่ลดลง และความแม่นยำในการวัดความหนาของชั้นหินรอยทางที่ลดลง เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์การกระเจิงของคลื่น (Scattering) จากอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมาก

#### 4.4.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างประเภทหิน

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประเภทหินและระดับความสกรปรกให้ผลลัพธ์ที่น่าสนใจ หินแกรนิตแสดงแนวโน้มที่จะมีค่าดัชนีความสกรปรกต่ำกว่าหินไรโอไลต์อย่างชัดเจน โดยหินแกรนิตมีค่าเฉลี่ย  $6.79 \pm 8.42$  ขณะที่หินไรโอไลต์มีค่าเฉลี่ย  $10.04 \pm 9.15$  ความแตกต่างทางสถิตินี้มีนัยสำคัญและสะท้อนให้เห็นถึงคุณสมบัติทางกายภาพของหินแต่ละประเภทที่ส่งผลต่อการสะสมของวัสดุปนเปื้อน

สำหรับหินแกรนิต การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลพบว่ามีตัวอย่างในสภาพสะอาด 21 ตัวอย่าง (63.6%) ปานกลาง 7 ตัวอย่าง (21.2%) และสกรปรก 5 ตัวอย่าง (15.2%) การกระจายนี้แสดงให้เห็นว่าหินแกรนิตมีความต้านทานต่อการสะสมของสิ่งปนเปื้อนได้

ดีกว่า ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับลักษณะพื้นผิวที่เรียกว่า ความแข็งที่สูงกว่า และรูปร่างของเม็ดหินที่เอื้อต่อการระบายน้ำและการไหลของอากาศ

ในขณะที่หินไรโอไลต์มีการกระจายที่แตกต่างกัน โดยมีตัวอย่างในสภาพสะอาด 9 ตัวอย่าง (47.4%) ปานกลาง 4 ตัวอย่าง (21.1%) และสกปรก 6 ตัวอย่าง (31.6%) สัดส่วนของตัวอย่างสกปรกที่สูงกว่าแสดงให้เห็นว่าหินไรโอไลต์มีแนวโน้มที่จะสะสมสิ่งปนเปื้อนได้ง่ายกว่า ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่มีรูพรุนมากกว่า พื้นผิวที่หยาบกว่า หรือคุณสมบัติทางเคมีที่ทำให้ดูดซับความชื้นและอนุภาคได้ดีกว่า

#### 4.4.3 ความสัมพันธ์เบื้องต้นระหว่าง Radargram กับค่าความสกปรก

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เบื้องต้นระหว่างลักษณะของ Radargram และค่าดัชนีความสกปรกจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่สม่ำเสมอและสามารถนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทำนายได้ จากข้อมูลทั้งหมด 52 ตัวอย่าง พบว่าการกระจายของค่าดัชนีความสกปรกมีลักษณะเบ้ขวา (right-skewed distribution) โดยมีค่ามัธยฐาน (median) ที่ 3.77 ซึ่งต่ำกว่าค่าเฉลี่ย 7.98 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างส่วนใหญ่มีค่าความสกปรกในระดับต่ำถึงปานกลาง แต่มีตัวอย่างบางส่วนที่มีค่าสูงมากซึ่งส่งผลต่อค่าเฉลี่ยโดยรวม

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์เบื้องต้นระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆ ของ Radargram กับค่าดัชนีความสกปรกพบว่ามีความสัมพันธ์ในทิศทางลบอย่างชัดเจน กล่าวคือ เมื่อค่าดัชนีความสกปรกเพิ่มขึ้น ความเข้มของสัญญาณสะท้อนจะลดลง ความชัดเจนของขอบเขตระหว่างชั้นจะลดลง และความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นจะลดลงเช่นกัน การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เกิดขึ้นแบบไม่เป็นเส้นตรง โดยในช่วงค่าดัชนีความสกปรก 0-10 การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นค่อนข้างช้า แต่เมื่อค่าเกิน 15 การเปลี่ยนแปลงจะรุนแรงขึ้นอย่างรวดเร็ว

สำหรับตัวอย่างที่มีค่าดัชนีความสกปรกในช่วง 0-5 (สภาพสะอาด) Radargram แสดงลักษณะของสัญญาณที่มีแอมพลิจูดสูงและคงที่ มีรูปแบบการสะท้อนที่สม่ำเสมอจากพื้นผิวเม็ดหิน และสามารถแยกแยะขอบเขตระหว่างชั้นหินโรยทางกับชั้นดินได้อย่างชัดเจน ค่าความลึกที่สัญญาณสามารถทะลุทะลวงได้มักอยู่ในช่วง 1.8-2.2 เมตร ขึ้นอยู่กับความถี่ของเสาอากาศและสภาพความชื้นของดิน

เมื่อค่าดัชนีความสกปรกเพิ่มขึ้นเป็น 5-15 (สภาพปานกลาง) จะเริ่มสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของ Radargram อย่างชัดเจน แอมพลิจูดของสัญญาณเริ่มลดลงเป็น 70-85% ของค่าในสภาพสะอาด ความคมชัดของขอบเขตระหว่างชั้นเริ่มลดลง และเริ่มปรากฏสัญญาณรบกวนจากการกระเจิงของคลื่นจากอนุภาคปนเปื้อนขนาดเล็ก รูปแบบของคลื่นเริ่มไม่สม่ำเสมอและมีการผันแปรมากขึ้น ความลึกการทะลุทะลวงลดลงเหลือประมาณ 1.4-1.8 เมตร

สำหรับตัวอย่างที่มีค่าดัชนีความสกปรกสูงกว่า 15 (สภาพสกปรก) การเปลี่ยนแปลงของ radargram เป็นไปอย่างรุนแรง แอมพลิจูดของสัญญาณลดลงเหลือเพียง 40-60% ของค่าเดิม ขอบเขตระหว่างชั้นกลายเป็นแบบไล่ระดับและยากต่อการแยกแยะ สัญญาณรบกวนมีมากขึ้นจนทำให้การตีความผลยากขึ้น และความลึกการทะลุทะลวงลดลงเหลือเพียง 0.8-1.2 เมตร ในบางกรณีที่มีค่าดัชนีความสกปรกสูงมาก (>25) อาจพบว่าสัญญาณถูกดูดซับจนแทบไม่สามารถตรวจจับได้

การวิเคราะห์ทางสถิติเบื้องต้นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความสกปรกกับแอมพลิจูดของสัญญาณมีค่าประมาณ -0.78 ถึง -0.85 (ขึ้นอยู่กับประเภทหิน) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ในทิศทางลบที่แข็งแกร่ง ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับความลึกการทะลุทะลวงมีค่าประมาณ -0.72 ถึง -0.79 ผลลัพธ์เหล่านี้ยืนยันความเป็นไปได้ในการใช้ radargram เป็นเครื่องมือในการประเมินระดับความสกปรกของหินรอยทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ การวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณยังพบว่าหินรอยทางที่สกปรกมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดการเลื่อนไถลของความถี่หลัก (frequency shift) ไปทางความถี่ต่ำ เนื่องจากการดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นมากกว่าในความถี่สูง ปรากฏการณ์นี้สามารถนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์เสริมในการประเมินระดับความสกปรกได้ โดยเฉพาะในกรณีที่การวิเคราะห์แอมพลิจูดอาจมีข้อจำกัดจากปัจจัยรบกวนอื่นๆ

#### 4.5 ผลของแบบจำลอง Machine Learning สำหรับการจำแนกประเภทคุณภาพข้อมูล Radargram

#### 4.5.1 ผลการทดสอบและประเมินสมรรถนะแบบจำลอง

การประเมินสมรรถนะของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องที่พัฒนาขึ้นดำเนินการโดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบจำนวน 11 ตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วยข้อมูล Radargrams ที่ได้รับการจำแนกประเภทคุณภาพล่วงหน้าแล้ว ตารางที่ 22 แสดงผลการประเมินสมรรถนะโดยละเอียดของแบบจำลองในแต่ละประเภทคุณภาพข้อมูล เมทริกซ์ความสับสนในตารางที่ 23 แสดงให้เห็นรูปแบบการจำแนกของแบบจำลอง โดยพบว่าข้อมูล Moderate ทั้งหมดถูกจำแนกผิดเป็นประเภท Severe ซึ่งสะท้อนถึงความท้าทายในการแยกแยะข้อมูลสองประเภทนี้

ตารางที่ 22 ผลการประเมินสมรรถนะแบบจำลองการจำแนกประเภทคุณภาพข้อมูล Radargram

ประเภทข้อมูล	precision	recall	f1-score	Support	จำนวนตัวอย่าง
Clean	1	1	1	8	72.7%
Moderate	0	0	0	1	9.1%
Severe	0.666667	1	0.8	2	18.2%
Accuracy	0.909091	0.909091	0.909091	0	100%
Macro Average	0.555556	0.666667	0.6	11	100%

ตารางที่ 23 เมทริกซ์ความสับสน (Confusion Matrix) ของแบบจำลอง

ประเภทข้อมูล	Pred_Clean	Pred_Moderate	Pred_Severe
True_Clean	8	0	0
True_Moderate	0	0	1
True_Severe	0	0	2

#### 4.5.2 กรณีทำนายถูกต้องและผิดพลาด

#### 4.5.2.1 การทำนายที่ถูกต้อง

แบบจำลองแสดงประสิทธิภาพที่เป็นเลิศในการจำแนกข้อมูลประเภท Clean โดยสามารถระบุได้อย่างถูกต้องครบทั้ง 8 ตัวอย่าง (True Positive Rate = 100%) ความสำเร็จนี้อาจเกิดจากลักษณะเฉพาะของข้อมูล Clean ที่มีรูปแบบสัญญาณที่ชัดเจนและแตกต่างจากประเภทอื่นอย่างเด่นชัด ดังที่ปรากฏในฮิสโตแกรมของข้อมูลซึ่งแสดงการกระจายของพิกเซลที่มีลักษณะ Bimodal Distribution ที่เด่นชัด (Zhang et al., 2019)

สำหรับข้อมูลประเภท Severe แบบจำลองสามารถระบุได้ถูกต้องครบทั้ง 2 ตัวอย่าง แม้ว่าจะมี False Positive 1 ตัวอย่าง (จากการจำแนก Moderate ผิด) ทำให้ค่า Precision อยู่ที่ 66.7% แต่ค่า Recall เท่ากับ 100% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความอ่อนไหวสูงในการตรวจจับข้อมูลคุณภาพแย่

#### 4.5.2.2 การทำนายที่ผิดพลาด

ปัญหาหลักของแบบจำลองคือการไม่สามารถจำแนกข้อมูลประเภท Moderate ได้อย่างถูกต้องเลย โดยตัวอย่างเดียวที่มีในชุดทดสอบถูกจำแนกผิดเป็นประเภท Severe ปัญหานี้สามารถอธิบายได้จากหลายประการ

ประการแรก คือปัญหาขนาดข้อมูลที่เพียงพอ (Insufficient Data) สำหรับประเภท Moderate ซึ่งมีเพียง 1 ตัวอย่างในชุดทดสอบ ทำให้ไม่สามารถประเมินประสิทธิภาพได้อย่างเชื่อถือได้ (Japkowicz & Stephen, 2002) ปัญหานี้สอดคล้องกับหลักการของ Machine Learning ที่ระบุว่าแบบจำลองต้องการข้อมูลตัวอย่างที่เพียงพอเพื่อเรียนรู้รูปแบบของแต่ละประเภท

ประการที่สอง คือความคล้ายคลึงทางลักษณะระหว่างข้อมูล Moderate และ Severe ซึ่งอาจมีระดับสิ่งแปลกปลอมที่ใกล้เคียงกัน (10-20% เทียบกับ 20-40%) การวิเคราะห์ฮิสโตแกรมของข้อมูลทั้งสองประเภทแสดงให้เห็นรูปแบบการกระจายที่มีความคล้ายคลึงกัน โดยเฉพาะในช่วงกลางของสเปกตรัม ทำให้แบบจำลองมีความยากลำบากในการแยกแยะ

#### 4.5.3 ประเมินสมรรถนะของแต่ละโมเดล

#### 4.5.3.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพรายประเภท

ประเภท Clean: แบบจำลองแสดงประสิทธิภาพที่เป็นเลิศในทุกตัวชี้วัด (Precision = Recall = F1-Score = 100%) ผลลัพธ์นี้สะท้อนถึงความสามารถของแบบจำลองในการระบุข้อมูลคุณภาพดีที่มีลักษณะเฉพาะเด่นชัด ความสำเร็จนี้มีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้งานจริง เนื่องจากการระบุข้อมูลคุณภาพดีอย่างถูกต้องจะช่วยลดการประมวลผลที่ไม่จำเป็นและเพิ่มประสิทธิภาพในการตีความข้อมูล

ประเภท Severe: แบบจำลองมีค่า Recall สูง (100%) ซึ่งแสดงให้เห็นความสามารถในการตรวจจับข้อมูลคุณภาพแย่มากได้ครบถ้วน อย่างไรก็ตาม ค่า Precision ที่ต่ำกว่า (66.7%) บ่งชี้ถึงการเกิด False Positive ซึ่งในกรณีนี้คือการจำแนกข้อมูล Moderate ผิดเป็น Severe ค่า F1-Score ที่ 80% แสดงให้เห็นประสิทธิภาพรวมที่ดี แต่ยังมีโอกาสปรับปรุงได้

ประเภท Moderate: แบบจำลองมีประสิทธิภาพต่ำสุดในประเภทนี้ (F1-Score = 0%) ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไข ปัญหานี้ไม่เพียงแต่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพโดยรวมเท่านั้น แต่ยังอาจส่งผลกระทบต่อตัดสินใจในการประมวลผลข้อมูลในทางปฏิบัติ

#### 4.5.3.2 การเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในด้านการจำแนกประเภทข้อมูล GPR ที่ผ่านมา ประสิทธิภาพโดยรวมของแบบจำลองที่ 90.9% อยู่ในระดับที่สามารถเปรียบเทียบได้กับงานวิจัยของ Liu et al. (2018) ที่รายงานความแม่นยำ 88-93% สำหรับการจำแนกประเภทวัตถุใต้ดิน และงานของ Warren et al. (2019) ที่มีความแม่นยำ 85-92% สำหรับการประเมินคุณภาพสัญญาณ GPR

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่มักเน้นไปที่ปัญหา Binary Classification (เช่น การแยกแยะระหว่างข้อมูลที่ใช้ได้กับไม่ได้) ในขณะที่งานวิจัยนี้ท้าทายความซับซ้อนของ Multi-class Classification ด้วยการแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ระดับคุณภาพ ซึ่งต้องการความละเอียดในการแยกแยะที่สูงกว่า

## 4.6 การอภิปรายผล

### 4.6.1 ศักยภาพของเทคนิค Ground Penetrating Radar ในการประเมินความสกปรกของหินโรยทาง

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเทคนิค Ground Penetrating Radar (GPR) มีศักยภาพสูงในการใช้ เป็นเครื่องมือประเมินความสกปรกของหินโรยทางในแบบไม่ทำลาย การวิเคราะห์ข้อมูล radargram จากจุดตรวจวัดทั้งหมด 52 จุด พบความสัมพันธ์เชิงลบที่แข็งแกร่งระหว่างลักษณะของสัญญาณ GPR กับระดับความสกปรก โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความสกปรกกับแอมพลิจูดของสัญญาณอยู่ในช่วง -0.78 ถึง -0.85 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sussmann et al. (2001) ที่รายงานถึงประสิทธิภาพของ GPR ในการตรวจจับปัญหาโครงสร้างใต้ผิวดิน

การเปลี่ยนแปลงลักษณะของ radargram ที่สังเกตได้แบ่งออกเป็นสามระดับตามระดับความสกปรก สำหรับหินโรยทางที่มีสภาพสะอาด (Ballast Fouling Index < 5%) สัญญาณ GPR แสดงลักษณะที่เด่นชัด ได้แก่ แอมพลิจูดสูงและคงที่ รูปแบบคลื่นที่สม่ำเสมอ และความสามารถในการทะลุทะลวงที่ดี (1.8-2.2 เมตร) ลักษณะเหล่านี้สะท้อนถึงโครงสร้างภายในที่เป็นระเบียบและมีช่องว่างอากาศเต็มระหว่างเม็ดหิน ซึ่งเอื้อต่อการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Leng & Gabr, 2002)

เมื่อระดับความสกปรกเพิ่มขึ้นเป็นระดับปานกลาง (5-15%) การเปลี่ยนแปลงของ radargram เริ่มปรากฏชัดเจน แอมพลิจูดของสัญญาณลดลงเหลือ 70-85% ของค่าเดิม ความคมชัดของขอบเขตระหว่างชั้นเริ่มลดลง และเริ่มปรากฏสัญญาณรบกวนจากการกระเจิงของคลื่นจากอนุภาคปนเปื้อนขนาดเล็ก การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เกิดจากการที่วัสดุปนเปื้อนที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงกว่าอากาศเข้ามาแทนที่ในช่องว่างระหว่างเม็ดหิน ส่งผลให้เกิดการดูดซับพลังงานคลื่นมากขึ้น (Al-Qadi et al., 2005)

สำหรับหินโรยทางที่มีระดับความสกปรกสูง (> 15%) การเสื่อมสภาพของ radargram เป็นไปอย่างรุนแรง แอมพลิจูดของสัญญาณลดลงเหลือเพียง 40-60% ขอบเขตระหว่างชั้นกลายเป็นแบบไล่ระดับและยากต่อการแยกแยะ ความลึกการทะลุทะลวงลดลงเหลือ

เพียง 0.8-1.2 เมตร ในบางกรณีที่ค่าดัชนีความสกปรกสูงมาก (>25%) สัญญาณอาจถูกดูดซับจนแทบไม่สามารถตรวจจับได้ ปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Hyslip et al. (2003) ที่พบว่า การปนเปื้อนของหินโรยทางส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ GPR

#### 4.6.2 บทบาทของ Cementation ในการอธิบายกลไกการเกิด Fouling

การศึกษาคุณสมบัติ cementing potential ของหินชนิดต่าง ๆ ให้ความเข้าใจที่ลึกซึ้งเกี่ยวกับกลไกการเกิด fouling ในหินโรยทาง ผลการทดสอบ Ballast cementing value แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างหินชนิดต่าง ๆ โดยหินปูนมีค่า Cementing value สูงสุดที่ 2.5 MPa หินอัคนี (Andesite, Dacite, Basalt) มีค่าปานกลางที่ 0.4 MPa และหิน Gneiss มีค่าต่ำสุดที่ 0.2 MPa ความแตกต่างเหล่านี้สะท้อนถึงองค์ประกอบทางแร่วิทยาและคุณสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกันของหินแต่ละชนิด

หินปูนที่มี Cementing value สูงเป็นผลมาจากการมี Calcite เป็นองค์ประกอบหลัก 100% Calcite เป็นแร่ธาตุที่สามารถละลายในน้ำได้ง่าย โดยเฉพาะในสภาพที่มี CO<sub>2</sub> ละลายอยู่ ตามสมการ:  $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$  เมื่อน้ำระเหย Calcite จะตกผลึกใหม่ และสร้างพันธะเคมีกับอนุภาคโดยรอบ กระบวนการนี้จะสร้าง matrix แข็งที่อุดตันช่องว่างอย่างสมบูรณ์ ผลลัพธ์สอดคล้องกับการศึกษาของ Raymond (1979) และ Boucher & Selig (1987) ที่เสนอแนะให้หลีกเลี่ยงการใช้หินปูนเป็นหินโรยทางในพื้นที่ที่มีปัญหาการระบายน้ำ

หินอัคนีที่แสดงค่า cementing value ปานกลางมีกลไกการเกิด Fouling ที่ซับซ้อนกว่า อนุภาค Plagioclase และ Pyroxene จะเกิดการแปรสภาพทางเคมีอย่างช้า ๆ ผ่านกระบวนการ chemical weathering ที่สร้างผลิตภัณฑ์ทุติยภูมิเช่น Clay minerals และ Iron oxides ซึ่งมีความสามารถในการยึดเกาะอนุภาคผ่านแรงยึดเหนี่ยวทางเคมีและทางกายภาพ การเกิด fouling ในหินอัคนีจึงเป็นผลจากการสะสมอนุภาคและการยึดเกาะทางเคมีในระดับปานกลาง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Feng et al. (1993) ที่ระบุว่าหินอัคนีมีค่า cementing value ต่ำ เนื่องจากมีองค์ประกอบแร่วิทยาที่มีความเสถียรทางเคมีสูง

หิน Gneiss ที่แสดงค่า cementing value ต่ำสุดมีกลไกการเกิด fouling ที่เรียบง่ายที่สุด อนุภาค Quartz (25%) และ Feldspar (60%) ที่เกิดจากการสึกหรอมีความต้านทานการ

ผู้ฟังสูง ไม่เกิดปฏิกิริยายึดเกาะทางเคมีกับอนุภาคอื่น การเกิด fouling ในหิน Gneiss จึงเกิดจากการสะสมทางกายภาพของอนุภาคละเอียดและการบีบอัดภายใต้แรงกระทำของรถไฟเป็นหลัก fouling ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะหลวมและสามารถแก้ไขได้ง่ายกว่า

การศึกษาได้เสนอกลไกการเกิด fouling ที่ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) การสึกหรอของหิน (2) การสะสมอนุภาค (3) การเกิด cementation และ (4) การก่อตัวของ Matrix ขั้นตอนเหล่านี้สอดคล้องกับแนวคิดของ Selig & Waters (1994) แต่ได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสมกับบริบทของการศึกษานี้ โดยเน้นบทบาทของคุณสมบัติ Cementing potential ในการควบคุมความรุนแรงและลักษณะของ Fouling ที่เกิดขึ้น

#### 4.6.3 ประสิทธิภาพของแบบจำลอง Machine Learning ในการทำนายความสกปรก

แบบจำลอง Machine learning ที่พัฒนาขึ้นแสดงประสิทธิภาพที่น่าพอใจในการจำแนกประเภทคุณภาพข้อมูล radargram โดยมีความแม่นยำโดยรวม 90.9% ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในระดับสากล อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ประสิทธิภาพรายประเภทเผยให้เห็นถึงความท้าทายที่สำคัญในการพัฒนาระบบอัตโนมัติสำหรับการประเมินคุณภาพหินโรยทาง

สำหรับข้อมูลประเภท Clean แบบจำลองแสดงประสิทธิภาพที่เป็นเลิศในทุกตัวชี้วัด (Precision = Recall = F1-Score = 100%) ความสำเร็จนี้สะท้อนถึงลักษณะเฉพาะที่เด่นชัดของข้อมูลคุณภาพดี ดังที่ปรากฏในการวิเคราะห์ฮิสโตแกรมที่แสดงรูปแบบ Bimodal distribution ที่ชัดเจน การที่แบบจำลองสามารถระบุข้อมูล Clean ได้อย่างแม่นยำมีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้งานจริง เนื่องจากจะช่วยลดการประมวลผลที่ไม่จำเป็นและเพิ่มประสิทธิภาพในการตีความข้อมูล

สำหรับข้อมูลประเภท Severe แบบจำลองมีค่า Recall สูง (100%) แต่มีปัญหาเรื่อง False Positive ที่ทำให้ค่า Precision ลดลงเหลือ 66.7% ปัญหานี้เกิดจากการจำแนกข้อมูล Moderate ผิดเป็น Severe ซึ่งในบริบทของการประยุกต์ใช้งานจริงอาจไม่ถือเป็นปัญหาร้ายแรง

เนื่องจากการประเมินข้อมูลคุณภาพแยะให้รุนแรงกว่าความเป็นจริงจะนำไปสู่การตัดสินใจที่ระมัดระวังมากขึ้นในการบำรุงรักษา ซึ่งดีกว่าการประเมินต่ำกว่าความเป็นจริง

อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักของแบบจำลองคือการไม่สามารถจำแนกข้อมูลประเภท Moderate ได้เลย (F1-Score = 0%) ปัญหานี้สามารถอธิบายได้จากสามประการหลัก ประการแรกคือปัญหาขนาดข้อมูลที่เพียงพอ (insufficient data) สำหรับประเภท Moderate ซึ่งมีเพียง 1 ตัวอย่างในชุดทดสอบ สอดคล้องกับหลักการของ machine learning ที่ระบุว่าแบบจำลองต้องการข้อมูลที่เพียงพอเพื่อเรียนรู้รูปแบบของแต่ละประเภท (Japkowicz & Stephen, 2002)

ประการที่สองคือความคล้ายคลึงทางลักษณะระหว่างข้อมูล Moderate และ Severe ซึ่งอาจมีระดับสิ่งปลอมปนที่ใกล้เคียงกัน (10-20% เทียบกับ 20-40%) การวิเคราะห์ฮิสโตแกรมของข้อมูลทั้งสองประเภทแสดงให้เห็นรูปแบบการกระจายที่คล้ายคลึงกัน โดยเฉพาะในช่วงกลางของสเปกตรัม ทำให้แบบจำลองมีความยากลำบากในการแยกแยะ ประการที่สามคือข้อจำกัดของ feature extraction ที่อาจยังไม่สามารถจับลักษณะเฉพาะที่ละเอียดพอสำหรับการแยกแยะระหว่างข้อมูล Moderate และ Severe

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ 90.9% อยู่ในระดับที่เปรียบเทียบได้กับงานของ Liu et al. (2018) ที่รายงานความแม่นยำ 88-93% สำหรับการจำแนกประเภทวัตถุใต้ดิน และงานของ Warren et al. (2019) ที่มีความแม่นยำ 85-92% สำหรับการประเมินคุณภาพสัญญาณ GPR อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่มักเน้นไปที่ปัญหา binary classification ในขณะที่งานวิจัยนี้ท้าทายความซับซ้อนของ multi-class classification ด้วยการแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ระดับคุณภาพ

การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคนิค GPR ร่วมกับ machine learning ในการพัฒนาระบบประเมินคุณภาพหินโรยทางแบบอัตโนมัติ อย่างไรก็ตาม ยังมีโอกาสปรับปรุงในด้านการเพิ่มข้อมูลตัวอย่าง การปรับปรุงเทคนิค feature extraction และการพัฒนาอัลกอริทึมที่เหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของข้อมูล GPR เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกประเภท Moderate ซึ่งมีความสำคัญต่อการตัดสินใจในการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสกปรกของหินโรยทางรถไฟโดยใช้เทคนิค Ground Penetrating Radar (GPR) และการประยุกต์ใช้ Machine Learning เพื่อทำนายระดับความสกปรก ผลการศึกษสามารถสรุปได้เป็น 4 ด้านหลักดังนี้

##### 5.1.1 ผลการทดสอบ Cementing Potential ของหินชนิดต่างๆ

การทดสอบ Ballast Cementing Value ตามวิธีการที่เสนอโดย Raymond (1979) และปรับปรุงโดย Boucher & Selig (1987) พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างหินชนิดต่างๆ หินปูนแสดงค่า Cementing Value สูงสุดที่ 2.5 MPa เนื่องจากมี Calcite เป็นองค์ประกอบหลัก 100% ซึ่งสามารถละลายและตกผลึกใหม่ได้ง่าย หินอัคนี (Andesite, Dacite, Basalt) มีค่าปานกลางที่ 0.4 MPa ขณะที่หิน Gneiss มีค่าต่ำสุดที่ 0.2 MPa

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าชนิดของหินมีบทบาทสำคัญต่อการเกิด fouling โดยองค์ประกอบทางแร่วิทยาเป็นปัจจัยกำหนดหลัก หินที่มี Cementing Value สูงจะมีแนวโน้มการเกิด fouling ที่รุนแรงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการเกิด cementation ใน 4 ขั้นตอน คือ การสึกกร่อนของหิน การสะสมอนุภาค การเกิด cementation และการก่อตัวของ matrix แข็ง

##### 5.1.2 ผลการประเมินความสกปรกในสนาม

การทดสอบความสกปรกจากตัวอย่างหินโรยทางทั้งหมด 52 จุด พบค่า Ballast Fouling Index ในช่วง 0.10% ถึง 30.47% โดยมีค่าเฉลี่ย 7.98% การวิเคราะห์ตามชนิดหินพบว่า หิน Rhyolite มีค่าความสกปรกเฉลี่ย 10.04% ซึ่งสูงกว่าหิน Granite ที่มีค่าเฉลี่ย 6.79% อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

การกระจายตัวของความสกปรกตามตำแหน่งแสดงรูปแบบที่สัมพันธ์กับลักษณะทางภูมิศาสตร์และการใช้งาน โดยพื้นที่ที่มีการระบายน้ำไม่ดีหรืออยู่ใกล้แหล่งกำเนิดฝุ่นละอองมีแนวโน้มมีค่าความสกปรกสูงกว่า การศึกษานี้ยืนยันว่าหิน Granite มีความต้านทานต่อการสะสมสิ่งปนเปื้อนได้ดีกว่าหิน Rhyolite เนื่องจากเนื้อหยาบกว่าและมีความทนทานต่อการสึกหรอสูงกว่า

### 5.1.3 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ Radargram

การวิเคราะห์ลักษณะของ Radargram จากข้อมูล GPR ความถี่ 400 MHz พบความสัมพันธ์เชิงลบที่แข็งแกร่งระหว่างลักษณะของสัญญาณกับระดับความสกปรก โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความสกปรกกับแอมพลิจูดของสัญญาณอยู่ในช่วง -0.78 ถึง -0.85

สำหรับหินโรยทางที่มีสภาพสะอาด ( $FI < 5\%$ ) สัญญาณ GPR แสดงลักษณะแอมพลิจูดสูงและคงที่ รูปแบบคลื่นสม่ำเสมอ และความสามารถในการทะลุทะลวงที่ดี (1.8-2.2 เมตร) เมื่อระดับความสกปรกเพิ่มขึ้นเป็นระดับปานกลาง (5-15%) แอมพลิจูดของสัญญาณลดลงเหลือ 70-85% ของค่าเดิม สำหรับระดับความสกปรกสูง ( $>15\%$ ) แอมพลิจูดลดลงเหลือเพียง 40-60% และความสามารถการทะลุทะลวงลดลงเหลือ 0.8-1.2 เมตร

### 5.1.4 ประสิทธิภาพของแบบจำลอง Machine Learning

แบบจำลอง Machine Learning ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้เทคนิค Histogram-based feature extraction แสดงประสิทธิภาพโดยรวม 90.9% ในการจำแนกประเภทคุณภาพข้อมูล Radargram การวิเคราะห์ประสิทธิภาพรายประเภทพบว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพเป็นเลิศในการจำแนกข้อมูลประเภท Clean (Precision = Recall = F1-Score = 100%) และมีประสิทธิภาพดีในการจำแนกข้อมูลประเภท Severe (Recall = 100%, Precision = 66.7%)

อย่างไรก็ตาม แบบจำลองมีข้อจำกัดในการจำแนกข้อมูลประเภท Moderate (F1-Score = 0%) เนื่องจากความคล้ายคลึงทางลักษณะกับข้อมูลประเภท Severe และข้อจำกัดของขนาดข้อมูลในการฝึกแบบจำลอง

## 5.2 การอภิปรายผล

### 5.2.1 ความสำคัญของบทบาท Cementation ในการเกิด Fouling

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าหินโรยทางไม่ได้เป็นเพียงตัวรับผลกระทบจากการเกิด fouling แต่มีบทบาทสำคัญในการเร่งหรือชะลอกระบวนการเกิด fouling ตามคุณสมบัติ cementing potential ของแต่ละชนิดหิน การค้นพบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Selig & Waters (1994) และ Indraratna et al. (2011) ที่เน้นถึงความสำคัญของคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุต่อการเกิด fouling

การที่หินปูนแสดงค่า Cementing Value สูงกว่าหินอื่นถึง 6.25-12.5 เท่า สะท้อนถึงความแตกต่างที่รุนแรงในกลไกการเกิด fouling ระหว่างหินชนิดต่างๆ กลไกการละลาย-ตกผลึกของ Calcite ในหินปูนสร้าง matrix แข็งที่อุดตันช่องว่างอย่างสมบูรณ์ ในขณะที่กลไกการเกิด fouling ในหินอัคนีและหินแปรเกิดจากการสะสมทางกายภาพและการยึดเกาะทางเคมีในระดับที่อ่อนกว่า

ผลการศึกษานี้มีนัยสำคัญต่อการเลือกหินโรยทางในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีปัญหาการระบายน้ำหรือมีสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการเกิด cementation การนำค่า Cementing Value มาใช้เป็นเกณฑ์เพิ่มเติมในการเลือกหินโรยทางจะช่วยลดปัญหาการเกิด fouling ในระยะยาว

### 5.2.2 ศักยภาพของเทคนิค GPR ในการตรวจสอบความสกปรก

การที่เทคนิค GPR สามารถแสดงความสัมพันธ์เชิงลบที่แข็งแกร่งกับระดับความสกปรกของหินโรยทาง ( $r = -0.78$  ถึง  $-0.85$ ) แสดงให้เห็นถึงศักยภาพสูงในการใช้เป็นเครื่องมือตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sussmann et al. (2001) และ Al-Qadi et al. (2005) ที่รายงานถึงประสิทธิภาพของ GPR ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างใต้ผิวดิน

ความถี่ 400 MHz ที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมสำหรับการตรวจสอบหินรอยทางในระดับความลึก 0-3 เมตร โดยให้ความละเอียดที่เพียงพอสำหรับการแยกแยะระดับความสกปรกที่แตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงลักษณะของ radargram ที่สังเกตได้แบ่งออกเป็นสามระดับอย่างชัดเจน ทำให้สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินและติดตามสภาพหินรอยทางได้

ข้อได้เปรียบสำคัญของเทคนิค GPR คือความสามารถในการตรวจสอบอย่างต่อเนื่องตลอดเส้นทาง โดยไม่ต้องหยุดการจราจรหรือรื้อเปิดทาง ซึ่งต่างจากวิธีการเดิมที่ต้องขุดเก็บตัวอย่างเป็นจุดๆ และใช้เวลานานในการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตาม การใช้ GPR ยังต้องการความเชี่ยวชาญในการตีความผลและอาจถูกรบกวนจากปัจจัยสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้นในดิน หรือสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งอื่น

### 5.2.3 การบูรณาการข้อมูลห้องปฏิบัติการและสนาม

การผสานข้อมูลจากการทดสอบ cementing potential ในห้องปฏิบัติการกับข้อมูล GPR จากสนามแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการศึกษาแบบบูรณาการ ข้อมูลจากห้องปฏิบัติการช่วยอธิบายกลไกการเกิด fouling และให้ความเข้าใจในระดับปรากฏการณ์ ขณะที่ข้อมูลสนามแสดงให้เห็นการประยุกต์ใช้จริงและความผันแปรตามสภาพแวดล้อม

การใช้ Machine Learning เป็นเครื่องมือเชื่อมโยงข้อมูลทั้งสองแหล่งทำให้สามารถพัฒนาแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพในการทำนายระดับความสกปรกได้ แม้ว่าจะมีข้อจำกัดในการจำแนกข้อมูลประเภท Moderate แต่ประสิทธิภาพโดยรวม 90.9% ถือว่าอยู่ในระดับที่สามารถเปรียบเทียบได้กับงานวิจัยระดับสากล

การค้นพบที่สำคัญคือความสามารถในการระบุข้อมูลประเภท Clean ได้อย่างแม่นยำ 100% ซึ่งมีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้งานจริง เนื่องจากจะช่วยลดการประมวผลที่ไม่จำเป็นและเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดสินใจด้านการบำรุงรักษา

### 5.2.4 เปรียบเทียบกับการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การศึกษานี้มีจุดเด่นในการนำแนวคิด cementing potential มาใช้ร่วมกับเทคนิค GPR ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยส่วนใหญ่ที่มุ่งเน้นเพียงการตรวจจับหรือการวัดปริมาณ fouling เท่านั้น การเข้าใจกลไกการเกิด fouling ช่วยให้สามารถคาดการณ์และป้องกันปัญหาได้ดีกว่า

ประสิทธิภาพของแบบจำลอง Machine Learning ที่ 90.9% เปรียบเทียบได้กับงานของ Liu et al. (2018) ที่รายงานความแม่นยำ 88-93% และงานของ Warren et al. (2019) ที่มีความแม่นยำ 85-92% อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ท้าทายความซับซ้อนของ multi-class classification (3 ระดับ) ในขณะที่งานวิจัยส่วนใหญ่มักเป็น binary classification

การใช้ Histogram-based feature extraction ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการแปลงข้อมูล radargram ที่ซับซ้อนให้เป็นคุณลักษณะเชิงตัวเลขที่สามารถใช้ใน machine learning ได้ วิธีการนี้สอดคล้องกับแนวโน้มการใช้ digital image processing ในการวิเคราะห์ข้อมูล geophysical แต่ยังมีโอกาสพัฒนาต่อไปด้วยเทคนิค deep learning

การศึกษาระหว่างประเทศที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการใช้ GPR ในการประเมิน ballast fouling มีจำนวนจำกัด งานของ Hyslip et al. (2003) ใช้ GPR ในการประเมินสภาพโครงสร้างใต้ทางรถไฟ แต่เน้นไปที่การตรวจหาช่องว่างและการยุบตัวมากกว่าการวิเคราะห์ fouling โดยตรง งานของ Sussmann et al. (2001) ใช้ GPR เป็นตัวบ่งชี้สภาพทางรถไฟแต่ไม่ได้เจาะลึกถึงกลไกการเกิด fouling

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในด้าน cementing properties งานของ Raymond (1979) และ Boucher & Selig (1987) เป็นงานพื้นฐานที่สำคัญ แต่ไม่ได้นำไปเชื่อมโยงกับเทคโนโลยีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย การศึกษานี้เป็นหนึ่งในงานแรกๆ ที่พยายามเชื่อมโยงข้อมูลจากห้องปฏิบัติการกับข้อมูลสนามผ่านเทคนิค machine learning

ในด้านการใช้ machine learning กับข้อมูล geophysical งานของ Chen et al. (2021) และ Vahidi et al. (2025) แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการใช้ histogram-based features แต่ส่วนใหญ่ประยุกต์ใช้กับการสำรวจทรัพยากรธรณีวิทยาหรือการตรวจสอบโครงสร้างอาคาร การนำมาใช้กับปัญหา ballast fouling เป็นการประยุกต์ใช้ใหม่ที่มีความท้าทายเฉพาะตัว

### 5.2.5 ความท้าทายในการพัฒนาแบบจำลอง Multi-class Classification

การพัฒนาแบบจำลอง machine learning สำหรับการจำแนกความสกปรกของหินโรยทางเป็น 3 ระดับ (Clean, Moderate, Severe) มีความท้าทายหลายประการที่แตกต่างจาก binary classification ที่พบในงานวิจัยส่วนใหญ่ ความซับซ้อนของปัญหาเพิ่มขึ้นแบบเลขชี้กำลังเมื่อจำนวนคลาสเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อคลาสต่างๆ มีความคล้ายคลึงกันทางลักษณะ

ปัญหาหลักที่พบคือการแยกแยะระหว่างข้อมูลประเภท Moderate และ Severe ซึ่งมีระดับ fouling ที่ใกล้เคียงกัน (10-20% เทียบกับ 20-40%) การวิเคราะห์ confusion matrix แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีแนวโน้มที่จะจำแนกข้อมูล Moderate เป็น Severe ซึ่งสะท้อนถึงการทับซ้อนของ feature space ระหว่างสองคลาสนี้

การแก้ปัญหานี้อาจต้องการการปรับปรุงในหลายด้าน ได้แก่ การเพิ่มความละเอียดของ feature extraction การใช้ ensemble methods ที่รวมแบบจำลองหลายตัว หรือการใช้ advanced algorithms เช่น Support Vector Machine with non-linear kernels หรือ Random Forest ที่สามารถจัดการกับ non-linear boundaries ได้ดีกว่า

นอกจากนี้ การใช้ data augmentation techniques เช่น synthetic data generation หรือ transfer learning จากข้อมูล GPR ในโดเมนอื่นอาจช่วยเพิ่มขนาดข้อมูลและปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยเฉพาะสำหรับคลาสที่มีข้อมูลน้อย

### 5.2.6 ผลกระทบของปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่อประสิทธิภาพของระบบ

การศึกษานี้พบว่าปัจจัยสิ่งแวดล้อมมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิด fouling และประสิทธิภาพของระบบ GPR ปัจจัยความชื้นในดินมีผลต่อค่า dielectric constant ซึ่งส่งผลต่อความเร็วและการดูดซับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงของความชื้นตามฤดูกาลจึงเป็นตัวแปรที่ต้องพิจารณาในการตีความข้อมูล GPR

อุณหภูมิมีผลต่อกระบวนการ cementation โดยเฉพาะในหินปูนที่มีการละลาย-ตกผลึกของ calcite ในสภาพอากาศร้อนของประเทศไทย กระบวนการนี้เกิดขึ้นเร็วกว่าในสภาพอากาศหนาว ซึ่งอาจเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้พบปัญหา fouling ในหินปูนอย่างรุนแรงในพื้นที่ศึกษา

การไหลของน้ำใต้ดินและการระบายน้ำผิวดินมีผลต่อการขนส่งอนุภาคละเอียดและการสะสมในชั้นหินรอยทาง พื้นที่ที่มีการระบายน้ำไม่ดีมักพบระดับ fouling ที่สูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการขนส่งตะกอนและการสะสมของอนุภาคละเอียด

ปัจจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการพัฒนาแบบจำลองที่สามารถคำนึงถึงความแปรปรวนตามสภาพแวดล้อม อาจผ่านการใช้อะดaptive algorithms ที่สามารถปรับพารามิเตอร์ตามสภาพแวดล้อมท้องถิ่น หรือการพัฒนาแบบจำลองแยกตามภูมิภาคหรือฤดูกาล

### 5.3 ข้อจำกัดของการวิจัย

#### 5.3.1 ข้อจำกัดด้านข้อมูล

การศึกษานี้มีข้อจำกัดสำคัญในด้านขนาดตัวอย่าง โดยมีข้อมูลจากสนามเพียง 52 ตัวอย่าง ซึ่งแม้ว่าจะผ่านการวิเคราะห์ power analysis แล้วว่ามีกำลังทางสถิติเพียงพอ แต่ยังไม่เพียงพอสำหรับการพัฒนาแบบจำลอง machine learning ที่มีความทนทานสูง โดยเฉพาะสำหรับข้อมูลประเภท Moderate ที่มีเพียง 1 ตัวอย่างในชุดทดสอบ

การกระจายตัวของข้อมูลที่ไม่สมดุลระหว่างประเภทต่างๆ (34.6% Clean, 30.8% Moderately fouled, 23.1% Fouled, 11.5% Highly fouled) ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแบบจำลองในการจำแนกประเภทที่มีข้อมูลน้อย นอกจากนี้ การเก็บข้อมูลจากเพียงเส้นทางเดียว (สายตะวันออก) อาจจำกัดความสามารถในการประมาณค่า (generalization) ไปยังเส้นทางอื่นที่มีสภาพภูมิศาสตร์และสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน

ความแปรปรวนของข้อมูลที่สูงในแต่ละประเภท เช่น หิน Rhyolite ที่มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 8.67% แสดงให้เห็นถึงความไม่สม่ำเสมอของสภาพ fouling แม้ในหินชนิดเดียวกัน ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยท้องถิ่นต่างๆ เช่น สภาพการระบายน้ำ ปริมาณการจราจร หรือแหล่งกำเนิดของวัสดุปนเปื้อน การควบคุมปัจจัยเหล่านี้ในการเก็บข้อมูลเป็นสิ่งที่ท้าทายและอาจส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

การขาดข้อมูลระยะยาวเป็นข้อจำกัดสำคัญอีกประการหนึ่ง การศึกษานี้เก็บข้อมูลเพียงครั้งเดียวในแต่ละจุด ไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของระดับ fouling ตามเวลาได้ ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการเข้าใจพลวัตของการเกิด fouling และการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

### 5.3.2 ข้อจำกัดด้านเทคนิค GPR

การใช้ GPR ความถี่ 400 MHz เพียงความถี่เดียวอาจไม่สามารถจับรายละเอียดในระดับความลึกที่แตกต่างกันได้อย่างเหมาะสม ความถี่ต่ำจะให้ความลึกการทะลุทะลวงมากกว่า แต่ความละเอียดต่ำกว่า ขณะที่ความถี่สูงจะให้ความละเอียดสูงแต่ความลึกจำกัด การใช้หลายความถี่พร้อมกันอาจให้ข้อมูลที่ครอบคลุมมากกว่า

สัญญาณ GPR อาจถูกรบกวนจากปัจจัยภายนอกต่างๆ เช่น ความชื้นในดิน สายไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือโครงสร้างโลหะใกล้เคียง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของการตีความ นอกจากนี้ การสำรวจด้วยเรดาร์ไฟอาจมีข้อจำกัดในด้านความเร็วและความสิ้นเปลืองที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพข้อมูล

ข้อจำกัดด้านเทคนิคของ GPR ยังรวมถึงการไม่สามารถแยกแยะชนิดของวัสดุปนเปื้อนได้โดยตรง GPR สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของ dielectric properties แต่ไม่สามารถระบุได้ว่าการเปลี่ยนแปลงนั้นเกิดจากดินเหนียว ททราย โคลน หรือวัสดุอื่นๆ การทราบชนิดของวัสดุปนเปื้อนจะช่วยให้การเลือกวิธีการทำความสะอาดที่เหมาะสม

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศต่อสัญญาณ GPR เป็นอีกข้อจำกัดหนึ่ง ในช่วงฤดูฝนความชื้นในดินเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่งผลให้ค่า dielectric constant เปลี่ยนแปลงและอาจทำให้การตีความผิดพลาดได้ การมีข้อมูลเปรียบเทียบในหลายฤดูกาลจะช่วยให้เข้าใจอิทธิพลนี้ได้ดีขึ้น

ความละเอียดเชิงพื้นที่ของ GPR ที่จำกัดโดย trace interval 0.05 เมตรอาจไม่สามารถจับการเปลี่ยนแปลงในระดับที่ละเอียดมากได้ การมี fouling ที่เกิดขึ้นเป็นจุดเล็กๆ หรือมีการกระจายตัวแบบไม่สม่ำเสมออาจไม่ถูกตรวจจับได้ หรือถูกเฉลี่ยออกไปในการประมวลผล

### 5.3.3 ข้อจำกัดของการทดสอบ Cementation

การทดสอบ cementing potential ในห้องปฏิบัติการดำเนินการภายใต้สภาวะที่ควบคุมได้ ซึ่งอาจไม่สะท้อนสภาพการใช้งานจริงที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความชื้น และแรงกระทำจากรถไฟอย่างต่อเนื่อง การทดสอบใช้เวลาเพียง 20 ชั่วโมงสำหรับการแห้ง ซึ่งอาจไม่เพียงพอสำหรับการจำลองกระบวนการ cementation ที่เกิดขึ้นในระยะยาว

การศึกษาคြပ်คลุมหินเพียง 5 ชนิดจาก 5 แหล่งในประเทศไทย ซึ่งอาจไม่ครอบคลุมความหลากหลายของหินรอยทางที่ใช้ในระบบรถไฟ นอกจากนี้ ยังไม่ได้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยอื่นๆ เช่น การปนเปื้อนของสารเคมี น้ำมัน หรือเกลือที่อาจพบในสภาพการใช้งานจริง ข้อจำกัดของวิธีการทดสอบ cementing value ตามที่เสนอโดย Raymond (1979) คือการใช้เพียงแรงอัดแกนเดียว ซึ่งอาจไม่สะท้อนสภาพแรงกระทำที่ซับซ้อนในสภาพจริง เช่น แรงเฉือน แรงดึง หรือการรับแรงแบบวัฏจักรจากการเดินรถไฟ การพัฒนาวิธีการทดสอบที่สะท้อนสภาพการใช้งานจริงมากขึ้นอาจให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่า

การควบคุมสภาวะการทดสอบมีข้อจำกัด เช่น การควบคุมความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่าง การควบคุมอุณหภูมิการอบแห้ง หรือการควบคุมความเร็วการให้แรงกด ซึ่งล้วนมีผลกระทบต่อผลการทดสอบ ความไม่แน่นอนจากปัจจัยเหล่านี้ อาจส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของข้อมูล cementing value

การไม่ได้ศึกษาผลกระทบของสภาพแวดล้อมต่อกระบวนการ cementation เป็นข้อจำกัดสำคัญ เช่น ผลของค่า pH ของน้ำฝน การมีสารละลายต่างๆ ในน้ำใต้ดิน หรือผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวัฏจักร ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยที่พบในสภาพจริงและอาจส่งผลกระทบต่อความเร็วและลักษณะของการเกิด cementation

### 5.3.4 ข้อจำกัดของแบบจำลอง Machine Learning

การใช้ feature extraction แบบ histogram อาจไม่สามารถจับลักษณะเฉพาะที่ซับซ้อนของ radargram ได้ครบถ้วน โดยเฉพาะรูปแบบเชิงพื้นที่ (spatial patterns) ที่อาจมีความสำคัญต่อการจำแนกประเภท การใช้เทคนิค deep learning ที่สามารถเรียนรู้ feature โดยอัตโนมัติอาจให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า

ปัญหาการจำแนกข้อมูลประเภท Moderate ที่ไม่สำเร็จเลยแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของแบบจำลองในการแยกแยะข้อมูลที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ซึ่งอาจต้องการการปรับปรุงทั้งในด้านการเพิ่มข้อมูล การปรับปรุงเทคนิค feature extraction หรือการใช้อัลกอริทึมที่เหมาะสมกว่า

ขาดการใช้เทคนิค cross-validation ที่ซับซ้อนมากขึ้น เช่น stratified k-fold ที่คำนึงถึงการกระจายตัวของข้อมูลในแต่ละคลาส หรือการใช้ time-based splitting ที่เหมาะสมกับข้อมูลที่มีลำดับเวลา การใช้ simple k-fold อาจไม่เหมาะสมกับข้อมูลที่มีการกระจายตัวไม่สมดุล

การไม่ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึม machine learning หลายแบบเป็นข้อจำกัดสำคัญ การศึกษานี้ใช้เพียงแบบจำลองเดียว แต่การเปรียบเทียบระหว่าง SVM, Random Forest, Neural Networks, หรือ ensemble methods อาจให้ข้อมูลที่มีประโยชน์ในการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด

การขาดการใช้เทคนิค hyperparameter optimization ที่เป็นระบบ เช่น grid search หรือ Bayesian optimization เป็นข้อจำกัดที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของแบบจำลอง การปรับพารามิเตอร์อย่างเป็นระบบอาจช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพได้มากขึ้น

### 5.3.5 ข้อจำกัดด้านการประยุกต์ใช้งาน

การนำผลการศึกษาไปใช้ในทางปฏิบัติมีข้อจำกัดด้านความพร้อมของบุคลากรและอุปกรณ์ การใช้ GPR ต้องการความเชี่ยวชาญในการติดตั้ง การสำรวจ และการตีความผล ซึ่งอาจต้องการการฝึกอบรมเพิ่มเติมสำหรับเจ้าหน้าที่ของการรถไฟแห่งประเทศไทย

ต้นทุนการลงทุนในอุปกรณ์ GPR และระบบ machine learning อาจเป็นอุปสรรคในการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะสำหรับการใช้งานในเส้นทางสายรองที่มีการจราจรน้อย การวิเคราะห์ cost-benefit ที่ละเอียดจึงจำเป็นสำหรับการตัดสินใจลงทุน

การรวมระบบใหม่เข้ากับระบบการบำรุงรักษาที่มีอยู่เดิมอาจมีความท้าทาย ต้องการการปรับปรุงขั้นตอนการทำงาน การฝึกอบรมบุคลากร และการพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อรองรับข้อมูลใหม่ที่จะได้จากการสำรวจ GPR

ข้อจำกัดด้านเวลาในการประมวลผลและการตีความผลอาจเป็นปัญหาสำหรับการใช้งานแบบเรียลไทม์ แม้ว่าแบบจำลอง machine learning จะสามารถประมวลผลได้เร็ว แต่การเตรียมข้อมูล การประมวลผลเบื้องต้นของ radargram และการตีความผลยังต้องใช้เวลาและความเชี่ยวชาญ

## 5.4 ข้อเสนอแนะ

### 5.4.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อเนื่อง

การขยายขนาดและความหลากหลายของข้อมูล ควรดำเนินการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมจากหลายเส้นทางรถไฟในภูมิภาคต่างๆ เพื่อเพิ่มความหลากหลายทางภูมิศาสตร์และสภาพแวดล้อม การเพิ่มขนาดตัวอย่างจะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลอง machine learning โดยเฉพาะในการจำแนกข้อมูลประเภท Moderate ที่มีปัญหาในการศึกษา

การใช้ GPR หลายความถี่ การทดลองใช้ GPR หลายความถี่พร้อมกัน เช่น 200 MHz, 400 MHz, และ 800 MHz จะช่วยให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมระดับความลึกที่แตกต่างกันและมีความละเอียดที่หลากหลาย การบูรณาการข้อมูลจากหลายความถี่อาจปรับปรุงความแม่นยำในการตรวจจับ fouling ในระดับที่แตกต่างกัน

การพัฒนาแบบจำลอง Deep Learning การนำเทคนิค deep learning เช่น Convolutional Neural Networks (CNN) มาใช้กับ radargram แบบเต็มรูปภาพอาจให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการใช้ histogram-based features แบบจำลอง CNN สามารถเรียนรู้คุณลักษณะเฉพาะที่ซับซ้อนจาก radargram โดยอัตโนมัติและอาจสามารถจำแนกข้อมูลประเภท Moderate ได้ดีกว่า

### 5.4.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการประยุกต์ใช้งาน

การพัฒนาระบบตรวจสอบแบบเรียลไทม์ ควรพัฒนาระบบที่สามารถประมวลผลข้อมูล GPR และให้ผลการประเมินความสกปรกแบบเรียลไทม์ระหว่างการสำรวจ ระบบดังกล่าวจะช่วยให้สามารถตัดสินใจด้านการบำรุงรักษาได้ทันทีและเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการหินโรย

ทาง ระบบนี้ควรประกอบด้วยส่วนประมวลผลข้อมูลบนรถสำรวจ การแสดงผลแบบทันที และระบบเตือนภัยเมื่อพบพื้นที่ที่มีปัญหาสูง

การรวม Cementing Value เข้าในมาตรฐานการทดสอบ การรถไฟแห่งประเทศไทย ควรพิจารณาการทดสอบ cementing value เข้าเป็นส่วนหนึ่งของมาตรฐานการทดสอบหินโรยทาง เพื่อให้สามารถประเมินความเสี่ยงการเกิด fouling ได้ตั้งแต่ขั้นตอนการเลือกหิน ซึ่งจะช่วยลดปัญหาในระยะยาว การกำหนดเกณฑ์ cementing value สูงสุดที่ยอมรับได้ เช่น  $< 0.5$  MPa ตามที่เสนอโดย Boucher & Selig (1987) จะช่วยในการคัดเลือกหินที่เหมาะสม

การพัฒนาแนวทางการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ผลการศึกษาสามารถนำไปพัฒนาแนวทางการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่เหมาะสมกับชนิดหินและระดับความสกปรก เช่น การกำหนดรอบการตรวจสอบที่แตกต่างกันตามค่า cementing value ของหิน หรือการเลือกวิธีการทำความสะอาดที่เหมาะสมกับลักษณะการเกิด fouling สำหรับหินที่มี cementing value สูง ควรมีการตรวจสอบบ่อยขึ้นและใช้วิธีการทำความสะอาดที่รุนแรงกว่า

การพัฒนาระบบแผนที่ดิจิทัลสำหรับการจัดการหินโรยทาง ควรพัฒนาระบบแผนที่ดิจิทัลที่บันทึกข้อมูลความสกปรกของหินโรยทางตลอดเส้นทาง พร้อมด้วยข้อมูลประกอบเช่น ชนิดหิน อายุการใช้งาน ประวัติการบำรุงรักษา และปัจจัยสิ่งแวดล้อม ระบบนี้จะช่วยในการวางแผนการบำรุงรักษาและการจัดสรรทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ

การพัฒนาโปรโตคอลการสำรวจมาตรฐาน ควรพัฒนาโปรโตคอลการสำรวจด้วย GPR ที่เป็นมาตรฐานสำหรับการรถไฟแห่งประเทศไทย ครอบคลุมขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์ การสำรวจ การประมวลผลข้อมูล และการตีความผล เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สม่ำเสมอและเปรียบเทียบได้ระหว่างเส้นทางและช่วงเวลาต่างๆ

การจัดทำระบบการฝึกอบรมบุคลากร ควรจัดทำหลักสูตรการฝึกอบรมสำหรับบุคลากรที่รับผิดชอบการใช้ GPR และการตีความผล ครอบคลุมทั้งทฤษฎีและการปฏิบัติ เพื่อให้สามารถใช้เทคโนโลยีนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย การมีบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญจะเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จของการนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้งาน

### 5.4.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยี

การผสมผสานเทคโนโลยี Multi-sensor การรวมเทคนิค GPR กับเทคโนโลยีอื่นๆ เช่น LiDAR สำหรับการวัดรูปร่างพื้นผิวทาง Thermal imaging สำหรับการตรวจจับการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิที่อาจบ่งชี้ถึงปัญหาการระบายน้ำ หรือ Acoustic sensing สำหรับการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงของหินโรยทาง การบูรณาการข้อมูลจากหลายเซนเซอร์จะให้ภาพรวมที่ครอบคลุมมากขึ้นและเพิ่มความแม่นยำในการประเมินสภาพหินโรยทาง

การพัฒนาอัลกอริทึม Adaptive Learning แบบจำลองที่สามารถเรียนรู้และปรับตัวตามข้อมูลใหม่ที่เข้ามาจะช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยเฉพาะเมื่อมีข้อมูลจากพื้นที่หรือสภาพแวดล้อมใหม่ๆ การใช้เทคนิค online learning หรือ incremental learning จะช่วยให้แบบจำลองสามารถปรับปรุงตัวเองได้โดยไม่ต้องฝึกใหม่ทั้งหมด

การพัฒนาระบบแจ้งเตือนอัจฉริยะ ระบบที่สามารถคาดการณ์แนวโน้มการเสื่อมสภาพของหินโรยทางและแจ้งเตือนล่วงหน้าจะช่วยให้การวางแผนการบำรุงรักษาและจัดสรรทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบนี้ควรใช้เทคนิค time series analysis และ predictive modeling เพื่อทำนายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความสึกปรก

การพัฒนาเทคนิค Deep Learning สำหรับ Radargram การใช้ Convolutional Neural Networks (CNN) หรือ Recurrent Neural Networks (RNN) สำหรับการวิเคราะห์ radargram อาจให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการใช้ histogram-based features เทคนิค deep learning สามารถเรียนรู้ลักษณะเฉพาะที่ซับซ้อนจาก radargram โดยอัตโนมัติและอาจช่วยแก้ปัญหาการจำแนกข้อมูลประเภท Moderate

การพัฒนาแบบจำลอง Ensemble การรวมแบบจำลองหลายแบบเข้าด้วยกัน เช่น Random Forest, Support Vector Machine, และ Neural Networks อาจให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการใช้แบบจำลองเดี่ยว เทคนิค ensemble learning สามารถลดความไม่แน่นอนและเพิ่มความแม่นยำของการทำนาย

การพัฒนาระบบการประมวลผลแบบกระจาย สำหรับการจัดการข้อมูล GPR ขนาดใหญ่จากการสำรวจหลายเส้นทาง การใช้ cloud computing หรือ edge computing จะช่วยให้สามารถประมวลผลข้อมูลได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

#### 5.4.4 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยระดับนานาชาติ

การพัฒนาฐานข้อมูลร่วมสากล ควรมีการพัฒนาฐานข้อมูลร่วมระหว่างประเทศ สำหรับข้อมูล GPR และการประเมินความสปรกของหินรอยทาง เพื่อให้ นักวิจัยทั่วโลกสามารถ แบ่งปันข้อมูลและพัฒนาแบบจำลองที่มีความแม่นยำสูงขึ้น การมีข้อมูลจากหลายประเทศที่มี สภาพภูมิอากาศและลักษณะทางธรณีวิทยาแตกต่างกันจะช่วยให้แบบจำลองมีความทั่วไปมากขึ้น

การจัดตั้งเครือข่ายการวิจัยร่วม ควรมีการจัดตั้งเครือข่ายการวิจัยระหว่าง มหาวิทยาลัย องค์กรวิจัย และบริษัทรถไฟในประเทศต่างๆ เพื่อแบ่งปันความรู้ เทคโนโลยี และ ประสบการณ์ในการใช้ GPR สำหรับการประเมินหินรอยทาง การร่วมมือในระดับนานาชาติจะช่วย เร่งการพัฒนาเทคโนโลยีและลดค่าใช้จ่ายในการวิจัย

การพัฒนามาตรฐานสากล ควรมีการพัฒนามาตรฐานสากลสำหรับการใช้ GPR ในการประเมินหินรอยทาง ครอบคลุมวิธีการสำรวจ การประมวลผลข้อมูล และการตีความผล มาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากลจะช่วยให้ผลการศึกษาศึกษาสามารถเปรียบเทียบและนำไปใช้ได้ ในประเทศต่างๆ

การจัดประชุมวิชาการเฉพาะทาง ควรมีการจัดประชุมวิชาการนานาชาติเฉพาะ เรื่องการใช้ GPR ในงานรถไฟอย่างสม่ำเสมอ เพื่อแลกเปลี่ยนความรู้ ประสบการณ์ และนวัตกรรม ใหม่ ๆ การมีเวทีสำหรับการนำเสนอผลงานวิจัยและการสร้างเครือข่ายจะช่วยส่งเสริมการพัฒนา เทคโนโลยีในด้านนี้

#### 5.4.5 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย

การปรับปรุงนโยบายการจัดซื้อหินรอยทาง หน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรปรับปรุง นโยบายการจัดซื้อหินรอยทางให้รวมการประเมิน cementing value เป็นเกณฑ์หนึ่ง การกำหนด ราคาที่สะท้อนถึงคุณภาพระยะยาวของหิน รวมถึงต้นทุนการบำรุงรักษาที่คาดว่าจะเกิดขึ้น จะช่วย ให้การตัดสินใจเลือกซื้อมีประสิทธิภาพมากขึ้น

การสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา รัฐบาลควรให้การสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา เทคโนโลยี GPR สำหรับงานโครงสร้างพื้นฐาน ทั้งในด้านงบประมาณ การสร้างแรงจูงใจทางภาษี และการสนับสนุนการร่วมมือระหว่างภาคการศึกษาและภาคเอกชน

การพัฒนาภาวะเทียบและข้อกำหนดทางเทคนิค ควรมีการพัฒนาภาวะเทียบ และข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการใช้ GPR ในงานตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐาน รวมถึง มาตรฐานความปลอดภัย คุณสมบัติของผู้ปฏิบัติงาน และขั้นตอนการรับรองผลการตรวจสอบ การส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีในภาคเอกชน ควรมีนโยบายส่งเสริมให้บริษัทเอกชนที่ดำเนินธุรกิจ เกี่ยวกับการก่อสร้างและบำรุงรักษาทางรถไฟนำเทคโนโลยี GPR มาใช้ เช่น การให้สิทธิประโยชน์ ทางภาษี การสนับสนุนเงินทุน หรือการจัดอบรมเชิงปฏิบัติการ

## 5.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

### 5.5.1 ประโยชน์ทางวิชาการ

การวิจัยนี้สร้างองค์ความรู้ใหม่ในด้านการเข้าใจกลไกการเกิด fouling ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติ cementing potential ของหิน ซึ่งเป็นมุมมองที่แตกต่างจากการศึกษาที่ผ่านมาที่ มุ่งเน้นเพียงการตรวจจับหรือวัดปริมาณ fouling การเข้าใจกลไกนี้เปิดโอกาสสำหรับการพัฒนา วิธีการป้องกันและควบคุม fouling ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

การพัฒนาเทคนิคการใช้ GPR ร่วมกับ machine learning สำหรับการประเมิน ความสกปรกของหินรอยทางเป็นการผสมผสานองค์ความรู้จากหลายสาขา ได้แก่ วิศวกรรมโยธา ธรณีวิทยา ธรณีฟิสิกส์ และวิทยาการคอมพิวเตอร์ วิธีการนี้สามารถเป็นต้นแบบสำหรับการ ประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างใต้ผิวดินอื่นๆ

การสร้างฐานข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางแร่วิทยาของหินกับ พฤติกรรมการเกิด fouling เป็นสิ่งที่มีคุณค่าทางวิชาการสูง ข้อมูลนี้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนา ทฤษฎีการเลือกวัสดุสำหรับงานก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานในสภาพแวดล้อมที่คล้ายคลึงกัน

การพัฒนาวิธีการประเมิน cementing potential ที่ปรับปรุงจากงานของ Raymond (1979) และ Boucher & Selig (1987) ให้เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทยเป็นการสร้างองค์ความรู้ที่มี เอกลักษณะและสามารถถ่ายทอดไปยังประเทศในภูมิภาคที่มีสภาพภูมิอากาศและลักษณะทาง ธรณีวิทยาคล้ายคลึงกัน

การศึกษานี้ยังสร้างแนวทางการวิจัยใหม่ในด้านการใช้ histogram-based feature extraction สำหรับข้อมูล geophysical ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาอื่นๆ ในสาขาธรณีฟิสิกส์ เช่น การสำรวจน้ำใต้ดิน การตรวจจذبโพรงใต้ดิน หรือการประเมินคุณภาพของฐานรากอาคาร

### 5.5.2 ประโยชน์ด้านการประยุกต์ใช้งาน

การรถไฟแห่งประเทศไทยจะได้เครื่องมือใหม่ในการตรวจสอบสภาพหินโรยทางแบบไม่ทำลาย ที่สามารถให้ข้อมูลอย่างต่อเนื่องตลอดเส้นทาง ซึ่งจะปรับปรุงประสิทธิภาพการบำรุงรักษาและลดต้นทุนในระยะยาว การสามารถระบุพื้นที่ที่มีปัญหาได้ล่วงหน้าจะช่วยให้การวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

การนำผลการศึกษาไปใช้ในการเลือกหินโรยทางจะช่วยลดปัญหาการเกิด fouling ตั้งแต่ต้น โดยเฉพาะการหลีกเลี่ยงการใช้หินที่มี cementing value สูงในพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการเกิด fouling ซึ่งจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและเพิ่มความปลอดภัยในการเดินรถไฟ

การพัฒนากระบวนการประเมินความสกปรกแบบอัตโนมัติจะช่วยลดภาระงานของบุคลากรและเพิ่มความสม่ำเสมอในการตรวจสอบ ระบบนี้สามารถทำงานได้ตลอด 24 ชั่วโมงและไม่ต้องหยุดการจราจร ทำให้สามารถตรวจสอบได้บ่อยขึ้นโดยไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งาน

การมีข้อมูลความสกปรกแบบต่อเนื่องจะช่วยให้พัฒนาแบบจำลองการคาดการณ์อายุการใช้งานของหินโรยทาง ซึ่งจะช่วยให้การวางแผนงบประมาณและการจัดซื้อวัสดุทดแทนล่วงหน้า

ประโยชน์สำคัญอีกประการหนึ่งคือการเพิ่มความปลอดภัยในการเดินรถไฟ การตรวจจذبปัญหา fouling ได้เร็วขึ้นจะช่วยป้องกันการเกิดอุบัติเหตุที่อาจเกิดจากการยุบตัวของทางหรือการเคลื่อนตัวของราง

### 5.5.3 ประโยชน์ด้านเศรษฐกิจและสังคม

การปรับปรุงประสิทธิภาพระบบหินรอยทางจะส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของระบบขนส่งทางรางและลดความล่าช้าในการเดินรถไฟ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการค้าการลงทุนและคุณภาพชีวิตของประชาชน การลดต้นทุนการบำรุงรักษาจะช่วยให้สามารถจัดสรรงบประมาณไปยังการพัฒนาาระบบขนส่งในด้านอื่นๆ ได้

การพัฒนาเทคโนโลยีภายในประเทศจะช่วยลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศและสร้างความเชี่ยวชาญทางเทคนิคที่สามารถถ่ายทอดไปยังองค์กรและประเทศอื่นๆ ในภูมิภาคได้ นอกจากนี้ยังเป็นการเสริมสร้างขีดความสามารถในการวิจัยและพัฒนาของประเทศไทยในด้านเทคโนโลยีการขนส่งทางราง

การวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้เทคโนโลยี GPR และ machine learning เป็นเครื่องมือในการจัดการโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างพื้นฐานอื่นๆ เช่น ทางหลวง สนามบิน หรือเขื่อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำรุงรักษาและยืดอายุการใช้งาน

ด้านการจ้างงาน การนำเทคโนโลยีนี้มาใช้จะสร้างความต้องการบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยี geophysical และ data science ซึ่งจะช่วยสร้างตำแหน่งงานใหม่ที่มีคุณภาพสูงในตลาดแรงงาน

การลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบรางจะช่วยให้การรถไฟสามารถลดค่าโดยสารหรือปรับปรุงคุณภาพการให้บริการได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อประชาชนโดยตรง นอกจากนี้ระบบขนส่งทางรางที่มีประสิทธิภาพสูงจะช่วยลดการใช้รถยนต์ส่วนบุคคลและลดปัญหาการจราจรในเมืองใหญ่

### 5.5.4 ประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม

การปรับปรุงประสิทธิภาพการบำรุงรักษาหินรอยทางจะช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ โดยการยืดอายุการใช้งานของหินที่มีอยู่และลดการขุดหินใหม่ ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกิจกรรมการเหมืองหิน

การใช้เทคนิค GPR แทนการขุดเก็บตัวอย่างจะช่วยลดการรบกวนระบบนิเวศและลดการผลิตขยะจากการทดสอบ เทคนิคนี้เป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (non-destructive testing) ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

การป้องกันปัญหา fouling ได้อย่างมีประสิทธิภาพจะช่วยลดความจำเป็นในการทำความสะอาดหินรอยทางด้วยสารเคมี ซึ่งอาจปนเปื้อนลงสู่ดินและแหล่งน้ำ การบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่มีประสิทธิภาพจะช่วยลดการใช้น้ำและพลังงานในกระบวนการทำความสะอาด

การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบขนส่งทางรางจะช่วยส่งเสริมการใช้น้ำมันอากาศยาน ซึ่งจะลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้รถยนต์ส่วนบุคคล ระบบรางที่มีความน่าเชื่อถือสูงจะดึงดูดผู้โดยสารให้เปลี่ยนมาใช้บริการมากขึ้น

การลดการเกิดอุบัติเหตุจากปัญหาทางรางจะช่วยลดการปล่อยมลพิษจากการจราจรติดขัดและการกักขังที่อาจเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการรั่วไหลของสารเคมีหรือน้ำมันจากรถไฟบรรทุกสินค้าที่อาจเกิดขึ้นจากการเกิดอุบัติเหตุ

### 5.5.5 ประโยชน์ด้านการพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรม

การวิจัยนี้เป็นการสร้างนวัตกรรมในการรวมเทคโนโลยี geophysics เข้ากับ artificial intelligence ซึ่งเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงสำหรับการพัฒนาต่อไปในอนาคต การสร้างความเชี่ยวชาญในด้านนี้จะช่วยให้ประเทศไทยสามารถเป็นผู้นำในภูมิภาคด้านเทคโนโลยีการตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐาน

ผลการวิจัยสามารถนำไปต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ เช่น ซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล GPR หรือระบบฮาร์ดแวร์สำหรับการสำรวจแบบอัตโนมัติ ซึ่งสามารถส่งออกไปยังประเทศอื่นๆ และสร้างรายได้ให้กับประเทศ

การพัฒนาแบบจำลอง machine learning ที่เฉพาะเจาะจงสำหรับข้อมูล GPR เป็นการสร้างทรัพย์สินทางปัญญาที่มีคุณค่า ซึ่งสามารถนำไปจดสิทธิบัตรและสร้างมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจ

ประสบการณ์และความเชี่ยวชาญที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถถ่ายทอดสู่ การศึกษาในระดับอุดมศึกษา โดยการพัฒนาหลักสูตรที่ผสานระหว่าง geophysics และ data science ซึ่งจะช่วยผลิตบุคลากรที่มีความสามารถตรงตามความต้องการของตลาดงานในอนาคต

## 5.6 อนาคตของการวิจัยและการพัฒนา

### 5.6.1 แนวโน้มเทคโนโลยี GPR ในอนาคต

เทคโนโลยี GPR กำลังมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในหลายด้าน การพัฒนาเสาอากาศแบบ phased array จะช่วยให้สามารถควบคุมทิศทางของลำคลื่นได้และเพิ่มความละเอียดในการสแกน การใช้ multi-frequency GPR ที่สามารถส่งสัญญาณหลายความถี่พร้อมกัน จะให้ข้อมูลที่ครอบคลุมมากขึ้น

การพัฒนาเซนเซอร์ขนาดเล็กและการประมวลผลแบบ real-time จะทำให้สามารถติดตั้ง GPR บนยานไร้คนขับ (UAV) หรือหุ่นยนต์สำหรับการสำรวจในพื้นที่ที่เข้าถึงยาก การผสานเทคโนโลยี IoT เข้ากับ GPR จะช่วยให้สามารถตรวจสอบสภาพโครงสร้างได้อย่างต่อเนื่องและส่งข้อมูลไปยังศูนย์ควบคุมแบบ real-time

### 5.6.2 การพัฒนา Artificial Intelligence สำหรับข้อมูล Geophysical

การพัฒนาเทคนิค deep learning โดยเฉพาะ convolutional neural networks ที่ออกแบบมาเฉพาะสำหรับข้อมูล geophysical จะช่วยปรับปรุงความแม่นยำในการตีความข้อมูล การใช้ transformer architectures ที่ประสบความสำเร็จในด้านการประมวลผลภาษาธรรมชาติ อาจสามารถประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ time series จากข้อมูล GPR ได้

การพัฒนาเทคนิค federated learning จะช่วยให้สามารถฝึกแบบจำลองจากข้อมูลที่กระจายอยู่ในหลายองค์กรได้โดยไม่ต้องรวมข้อมูลเข้าด้วยกัน ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาการรักษาความลับของข้อมูลและเพิ่มขนาดของข้อมูลที่ใช้ในการฝึกแบบจำลอง

### 5.6.3 การบูรณาการกับเทคโนโลยีอื่น ๆ

การรวม GPR เข้ากับเทคโนโลยี digital twin จะช่วยให้สามารถสร้างแบบจำลองดิจิทัลของระบบทางรถไฟที่สามารถคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงและวางแผนการบำรุงรักษาได้อย่างแม่นยำ การใช้ blockchain สำหรับการจัดเก็บและรับรองข้อมูลการตรวจสอบจะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือและป้องกันการปลอมแปลงข้อมูล

การผสมผสานเทคโนโลยี augmented reality (AR) กับการตีความข้อมูล GPR จะช่วยให้เจ้าหน้าที่สามารถเห็นภาพสามมิติของสภาพใต้ดินได้ในขณะที่ทำการสำรวจ ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดสินใจและลดความผิดพลาดในการตีความ

## 5.7 บทสรุป

การวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพิสูจน์ให้เห็นว่าการผสมผสานเทคนิค Ground Penetrating Radar เข้ากับ Machine Learning สามารถใช้เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการประเมินความสกปรกของหินโรยทางรถไฟได้อย่างแม่นยำ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของบทบาท cementing potential ของหินต่อการเกิด fouling ซึ่งเป็นมุมมองใหม่ที่แตกต่างจากการศึกษาที่ผ่านมา

ความสัมพันธ์เชิงลบที่แข็งแกร่งระหว่างลักษณะของ radargram กับระดับความสกปรก ( $r = -0.78$  ถึง  $-0.85$ ) พิสูจน์ให้เห็นถึงศักยภาพของเทคนิค GPR ในการใช้เป็นเครื่องมือตรวจสอบแบบไม่ทำลาย แบบจำลอง Machine Learning ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพโดยรวม 90.9% ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับมาตรฐานสากล

การค้นพบว่าหินปูนมีค่า cementing value สูงกว่าหินอื่นถึง 6.25-12.5 เท่า เป็นข้อมูลสำคัญที่สามารถนำไปใช้ในการเลือกหินโรยทางเพื่อป้องกันปัญหา fouling ตั้งแต่เริ่มต้น การที่หิน Granite แสดงความต้านทานต่อการสะสมสิ่งปนเปื้อนได้ดีกว่าหิน Rhyolite อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เป็นข้อมูลที่มีประโยชน์สำหรับการตัดสินใจในการจัดหาวัด

แม้ว่าการวิจัยนี้จะมีข้อจำกัดในด้านขนาดตัวอย่างและความหลากหลายของข้อมูล แต่ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาระบบการประเมินความสกปรกแบบอัตโนมัติที่มีประสิทธิภาพ การบูรณาการข้อมูลจากห้องปฏิบัติการและสนามผ่านเทคนิค machine learning เป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงสำหรับการพัฒนาต่อไปในอนาคต

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้ครอบคลุมหลายมิติ ตั้งแต่การสร้างองค์ความรู้ใหม่ทางวิชาการ การพัฒนาเครื่องมือใหม่สำหรับการปฏิบัติงาน ไปจนถึงการสร้างผลกระทบเชิงบวกต่อเศรษฐกิจและสังคม การลดต้นทุนการบำรุงรักษา การเพิ่มความปลอดภัยในการเดินรถไฟ และการส่งเสริมการใช้ขนส่งสาธารณะที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อเนื่องเน้นไปที่การขยายขนาดและความหลากหลายของข้อมูล การพัฒนาเทคนิค deep learning สำหรับการวิเคราะห์ radargram และการผสมผสานเทคโนโลยี multi-sensor เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความครอบคลุมของการตรวจสอบ การพัฒนาระบบแบบ real-time และการใช้เทคนิค adaptive learning จะช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และสามารถปรับตัวตามสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้

สำหรับการประยุกต์ใช้งาน การนำผลการศึกษานี้ไปใช้ในทางปฏิบัติต้องการพัฒนาระบบการฝึกอบรมบุคลากร การจัดทำโปรโตคอลการปฏิบัติงานที่เป็นมาตรฐาน และการปรับปรุงนโยบายการจัดการหिनรอยทางให้รวมการพิจารณา cementing value เป็นเกณฑ์หนึ่ง

การวิจัยนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการใช้เทคโนโลยี artificial intelligence ในการจัดการโครงสร้างพื้นฐานการขนส่งของประเทศไทย หากได้รับการพัฒนาต่อไปอย่างต่อเนื่อง จะสามารถนำไปสู่การปฏิวัติวิธีการบำรุงรักษาโครงสร้างพื้นฐานจากแบบเดิมที่เป็น corrective maintenance ไปสู่ preventive maintenance ที่มีประสิทธิภาพและความยั่งยืนมากขึ้น

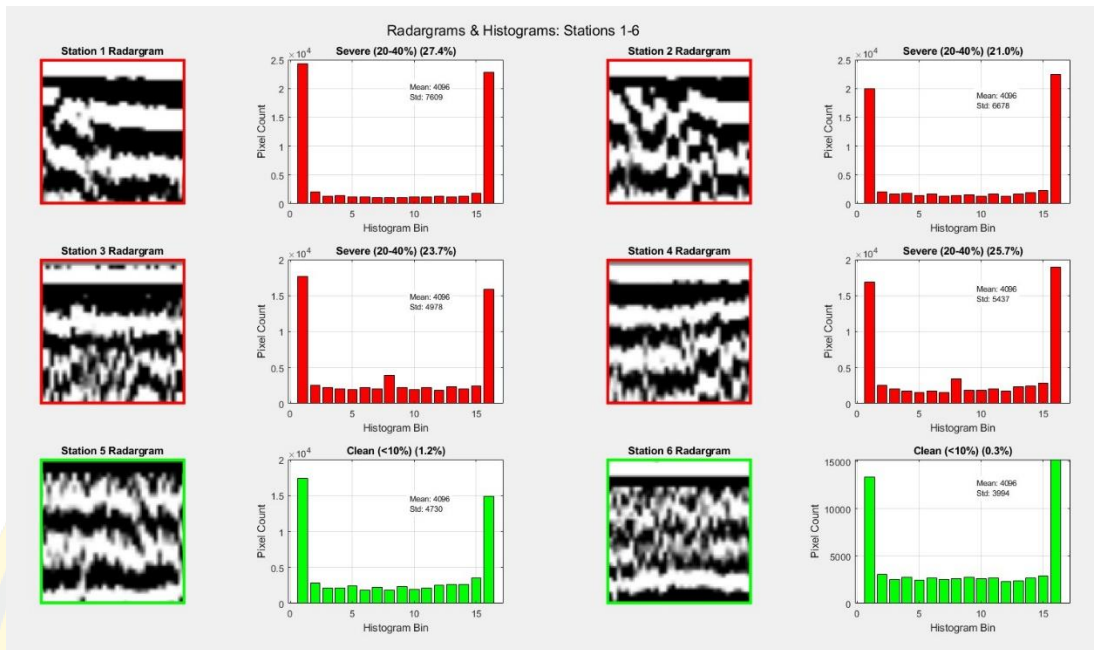
ในขณะที่โลกกำลังเผชิญกับความท้าทายด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและความจำเป็นในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การมีระบบขนส่งทางรางที่มีประสิทธิภาพและน่าเชื่อถือจึงมีความสำคัญมากขึ้น การวิจัยนี้มีส่วนสำคัญในการสนับสนุนการพัฒนาระบบขนส่งที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อสังคมไทยและสังคมโลกในระยะยาว

ความสำเร็จของการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของประเทศไทยในการพัฒนาเทคโนโลยีขั้นสูง และการสร้างนวัตกรรมที่สามารถแข่งขันได้ในระดับสากล การสร้างความร่วมมือระหว่างภาค การศึกษา ภาคเอกชน และหน่วยงานราชการในการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ต่อไปจะเป็นกุญแจสำคัญ ในการเปลี่ยนผลการวิจัยให้เป็นประโยชน์ที่เป็นรูปธรรมต่อสังคม

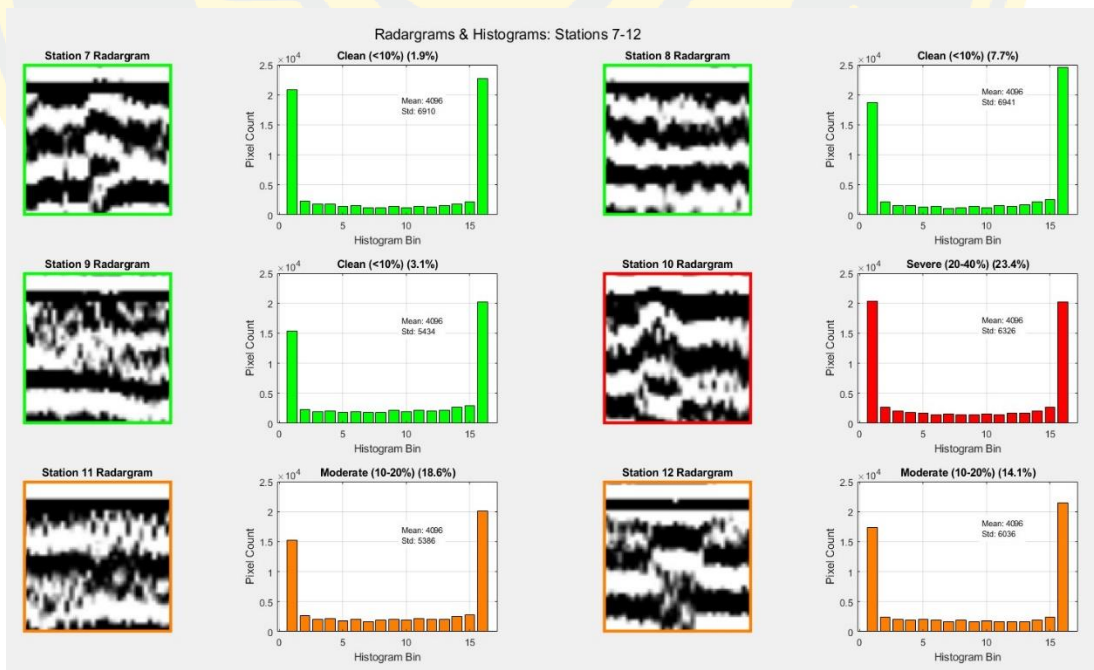
สุดท้ายนี้ การวิจัยดังกล่าวเป็นเพียงก้าวแรกในการสร้างระบบการจัดการโครงสร้าง พื้นฐานที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลและปัญญาประดิษฐ์ ความก้าวหน้าที่จะเกิดขึ้นในอนาคตจากการ ต่อยอดงานวิจัยนี้จะช่วยให้ประเทศไทยก้าวสู่การเป็นผู้นำในด้านเทคโนโลยีการขนส่งทางรางใน ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และสร้างแบบอย่างที่ดีสำหรับประเทศกำลังพัฒนาอื่นๆ ในการใช้ เทคโนโลยีเพื่อยกระดับการจัดการโครงสร้างพื้นฐาน



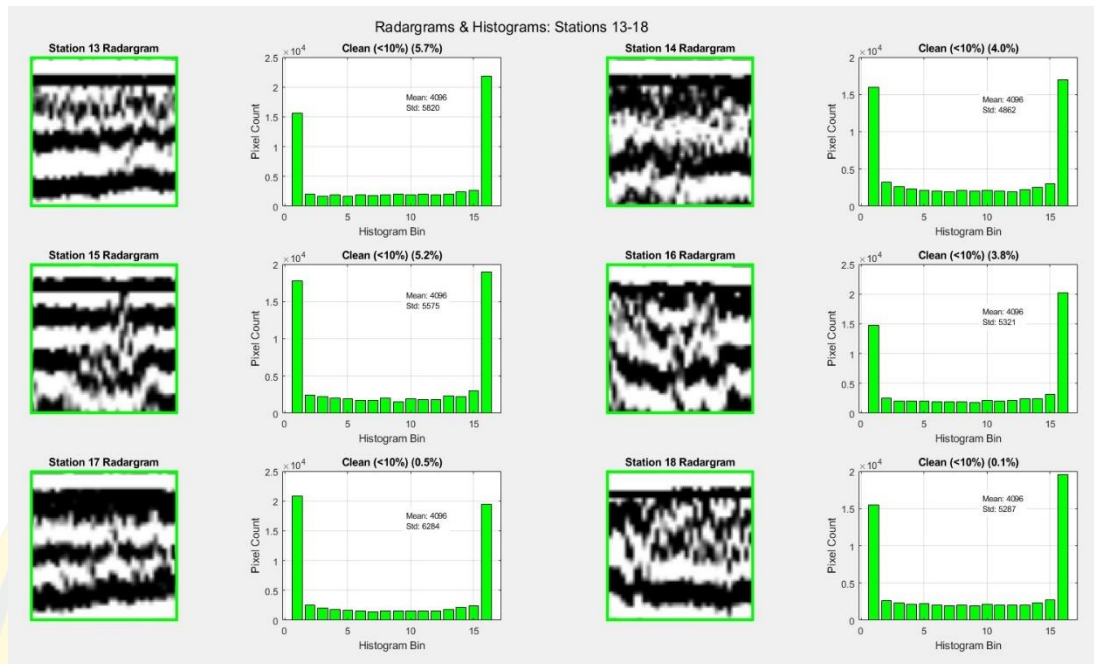
ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์ การสกัด Radargram ไปยัง Histograms



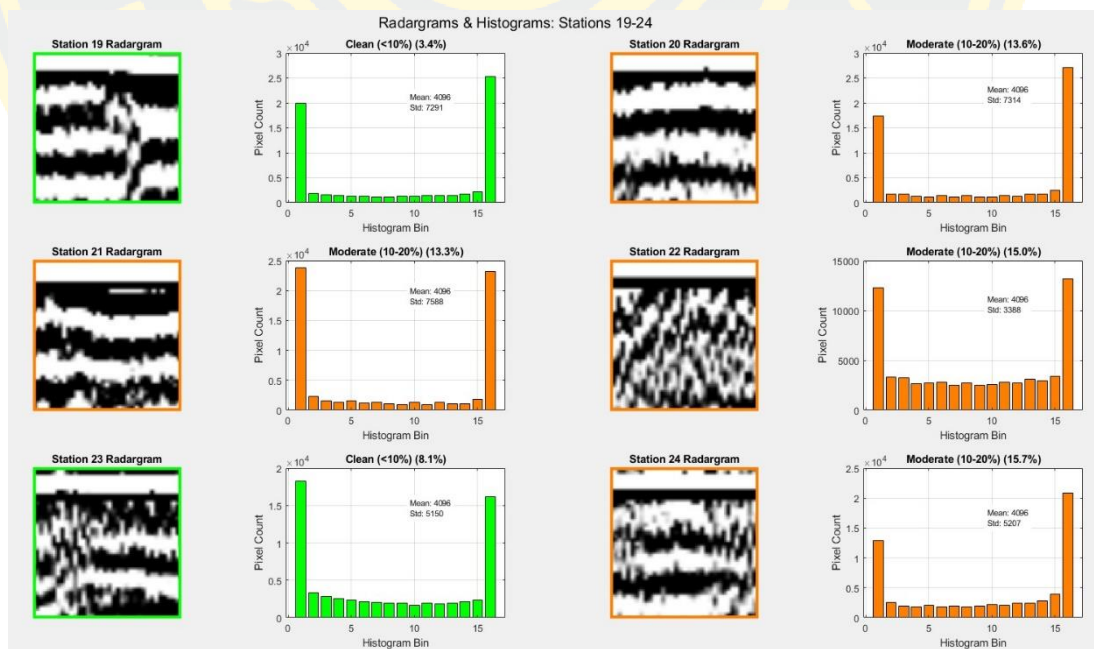
การสกัด Radargram ไปยัง Histograms ของตัวอย่างที่ 1-6



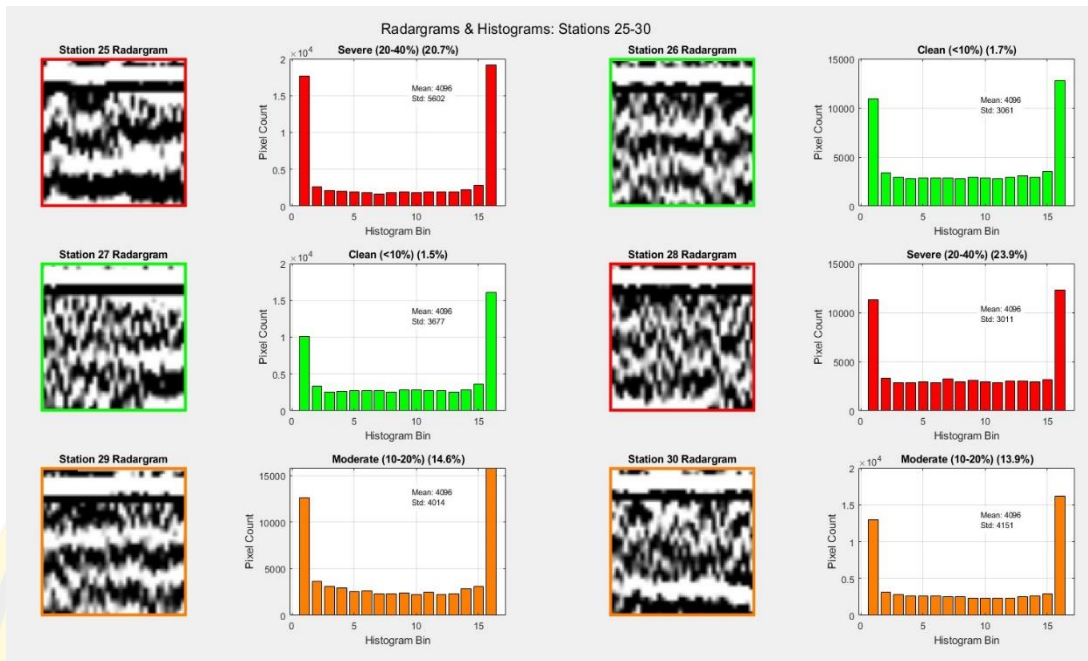
การสกัด Radargram ไปยัง Histograms ของตัวอย่างที่ 7-12



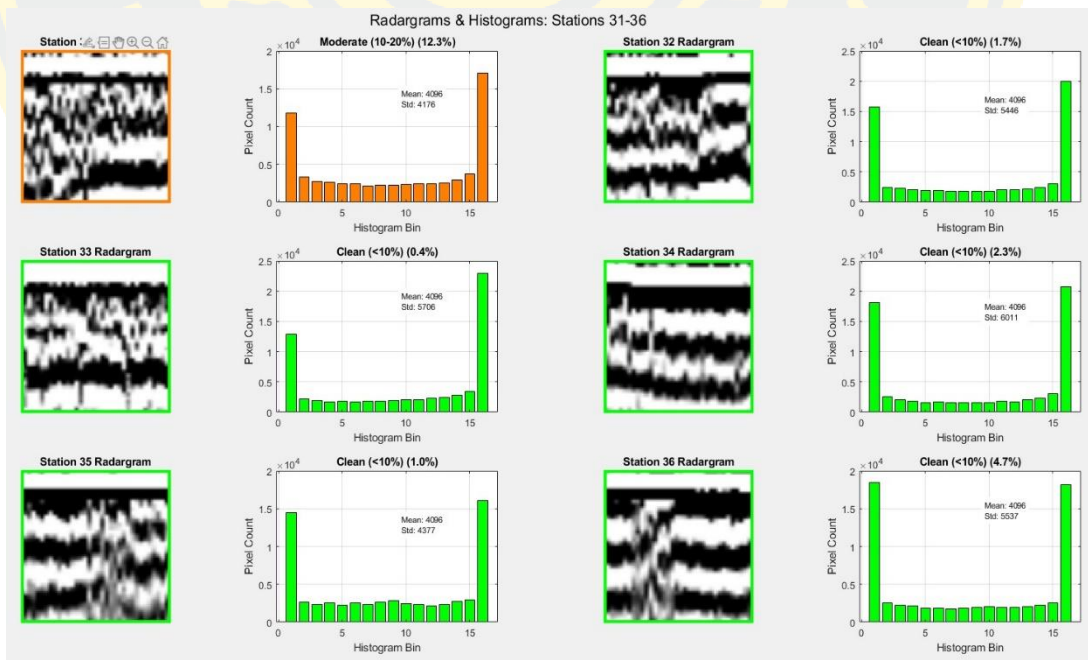
การสกัด Radargram ไปยัง Histograms ของตัวอย่างที่ 13-18



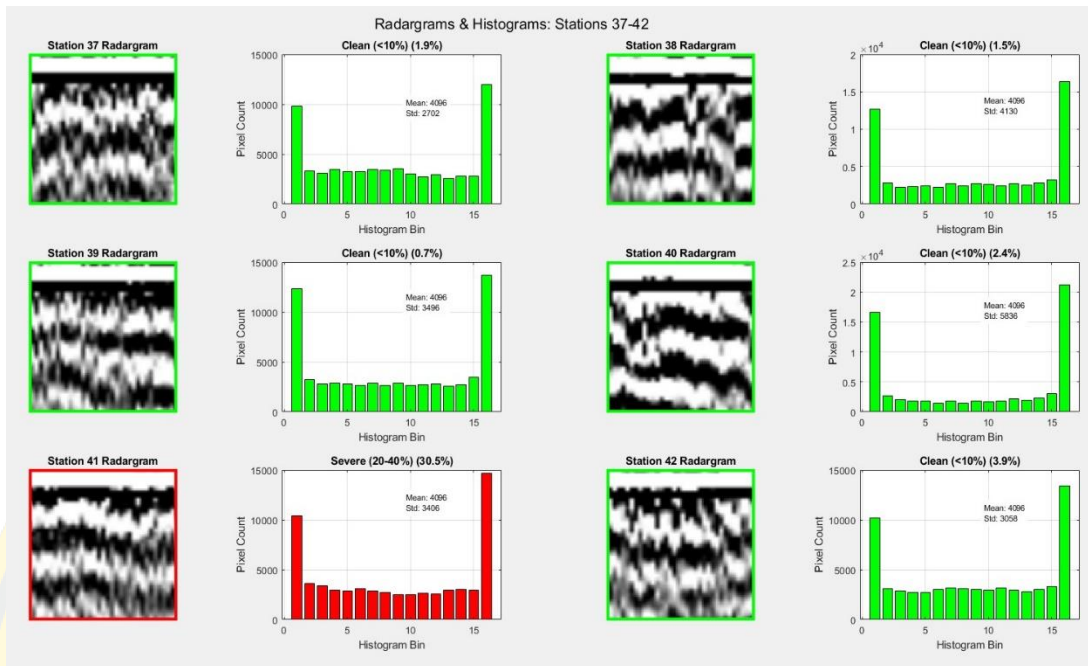
การสกัด Radargram ไปยัง Histograms ของตัวอย่างที่ 19-24



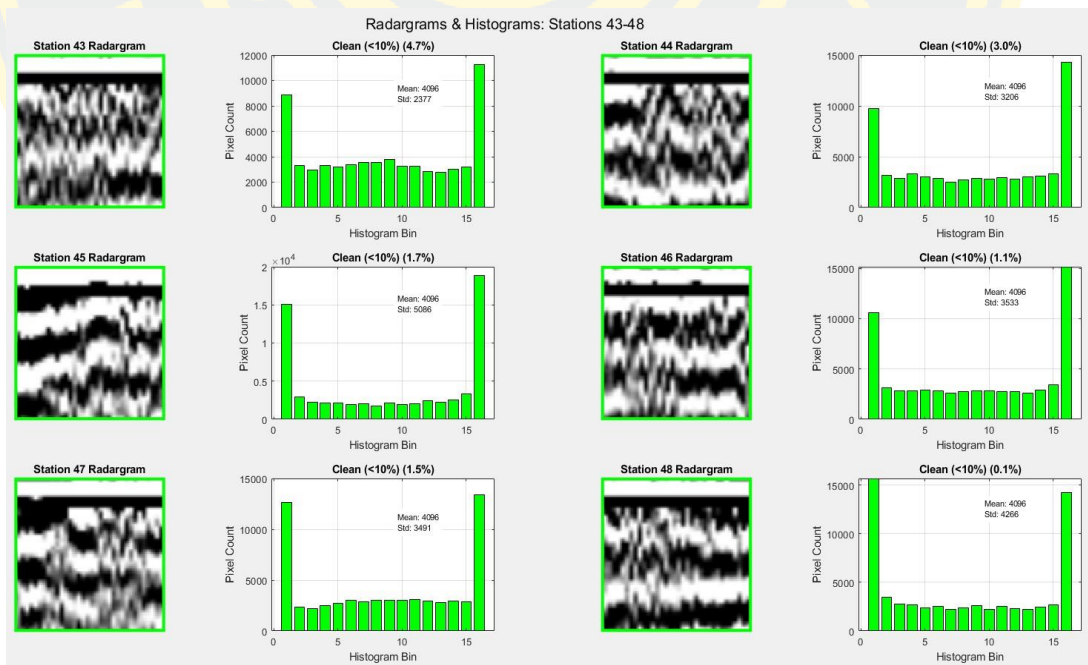
การสกัด Radargram ไปยัง Histograms ของตัวอย่างที่ 25-30



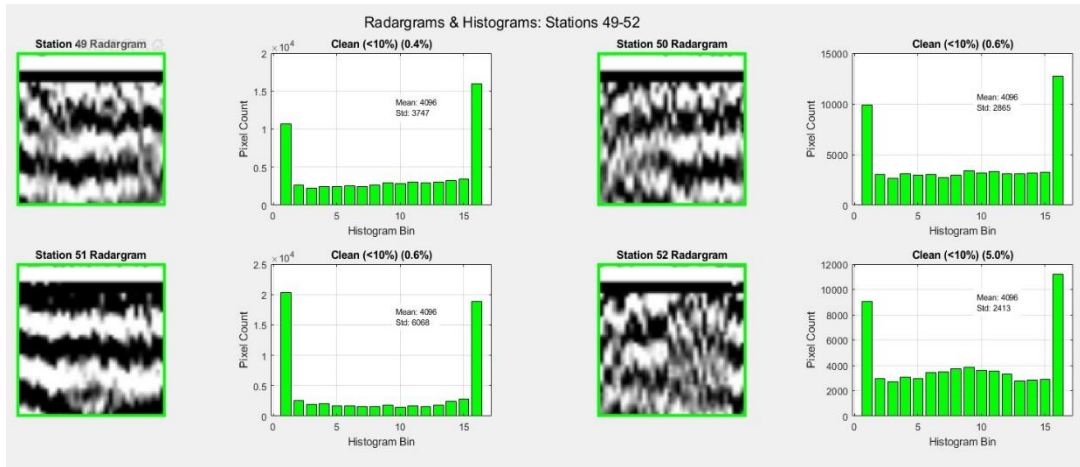
การสกัด Radargram ไปยัง Histograms ของตัวอย่างที่ 31-36



การสกัด Radargram ไปยัง Histograms ของตัวอย่างที่ 37-42



การสกัด Radargram ไปยัง Histograms ของตัวอย่างที่ 43-48

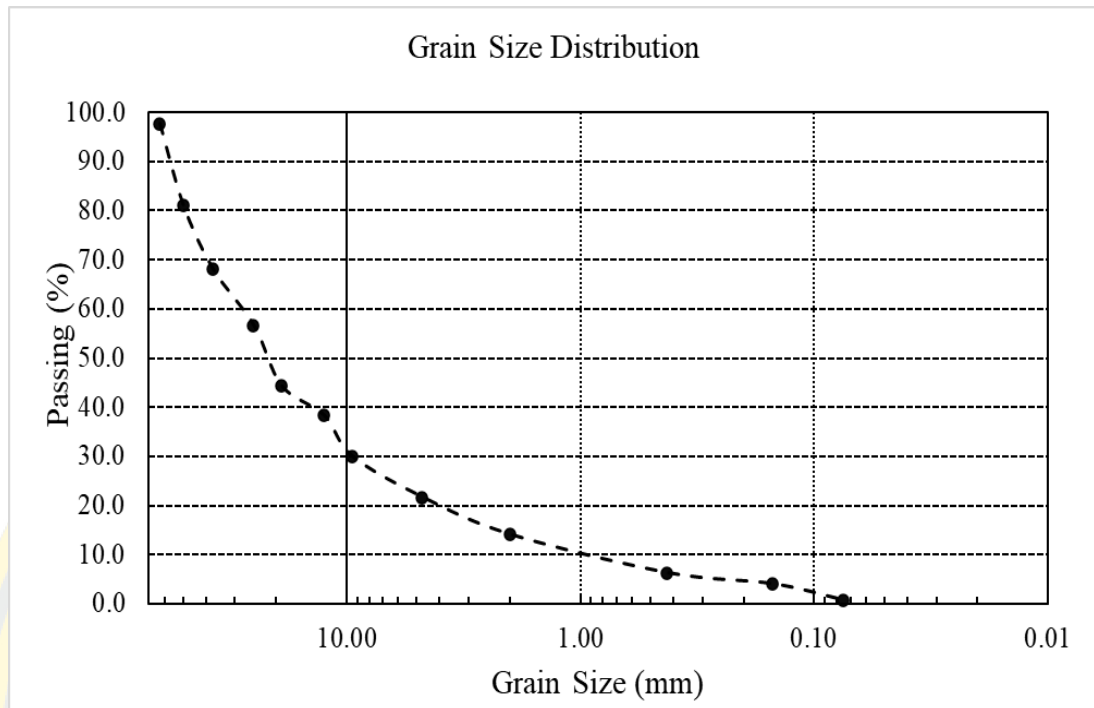


การสกัด Radargram ไปยัง Histograms ของตัวอย่างที่ 49-52

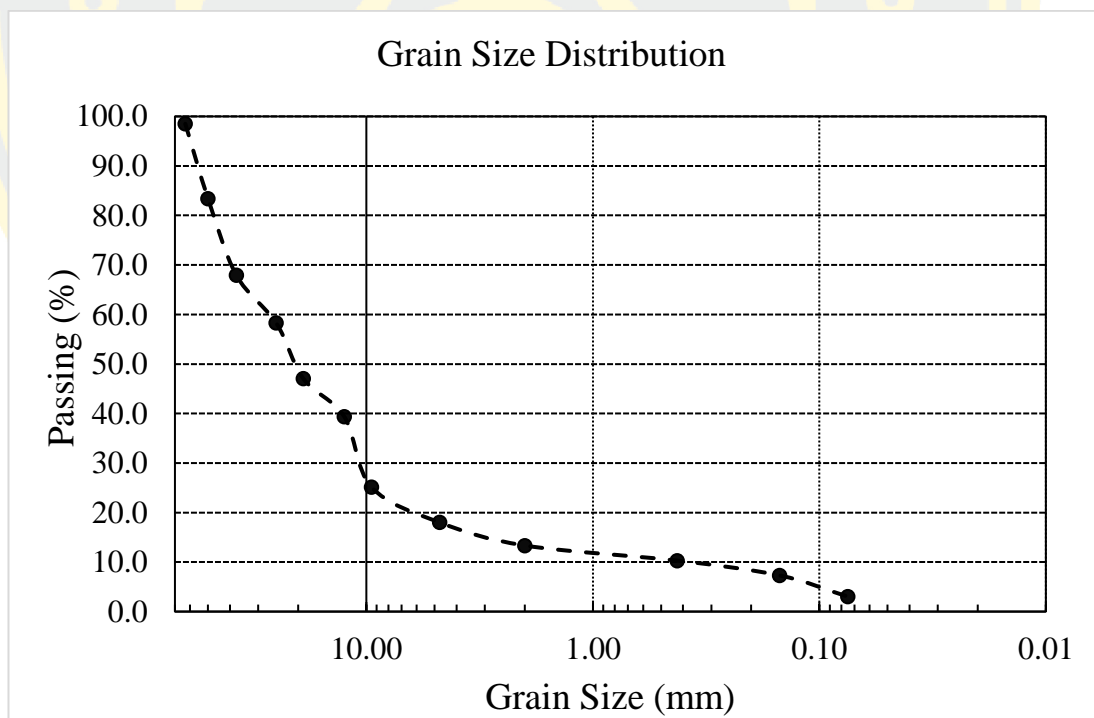




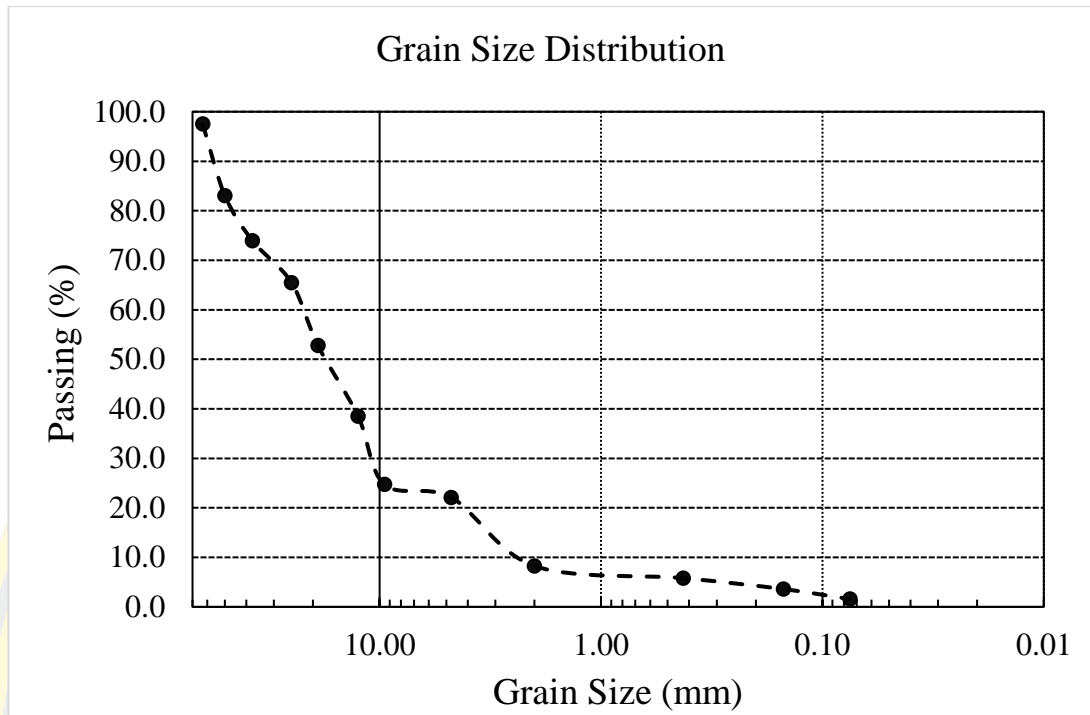
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์การปนเปื้อนของหินโรยทางจากห้องปฏิบัติการ



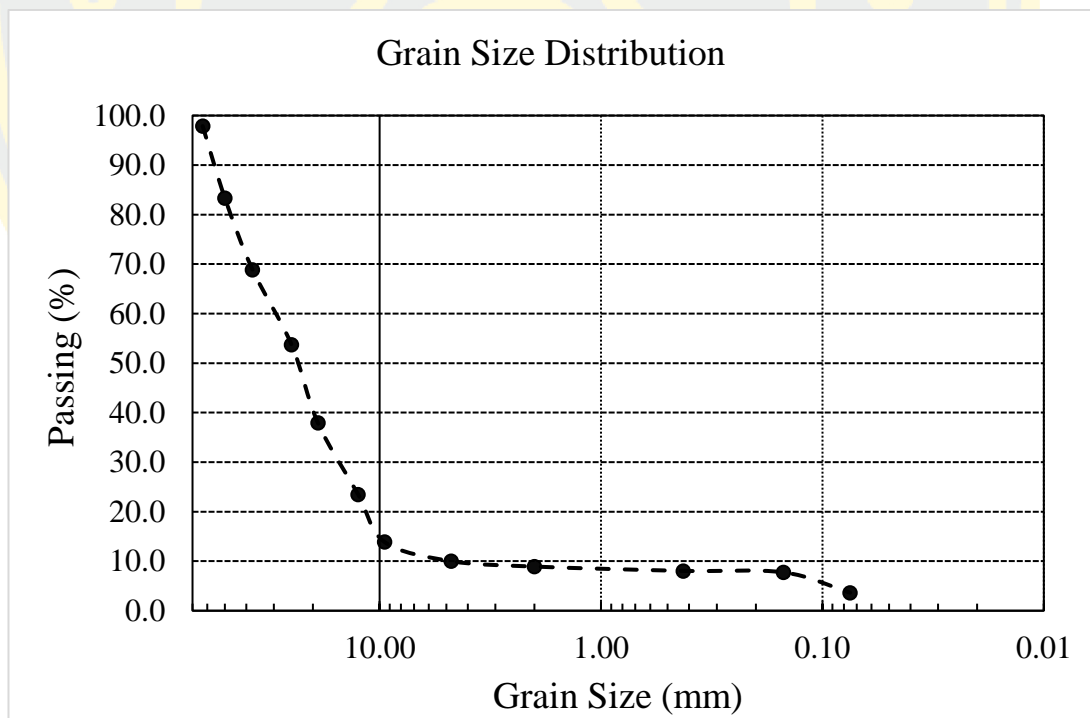
ตำแหน่งที่ 1 กม.5+419



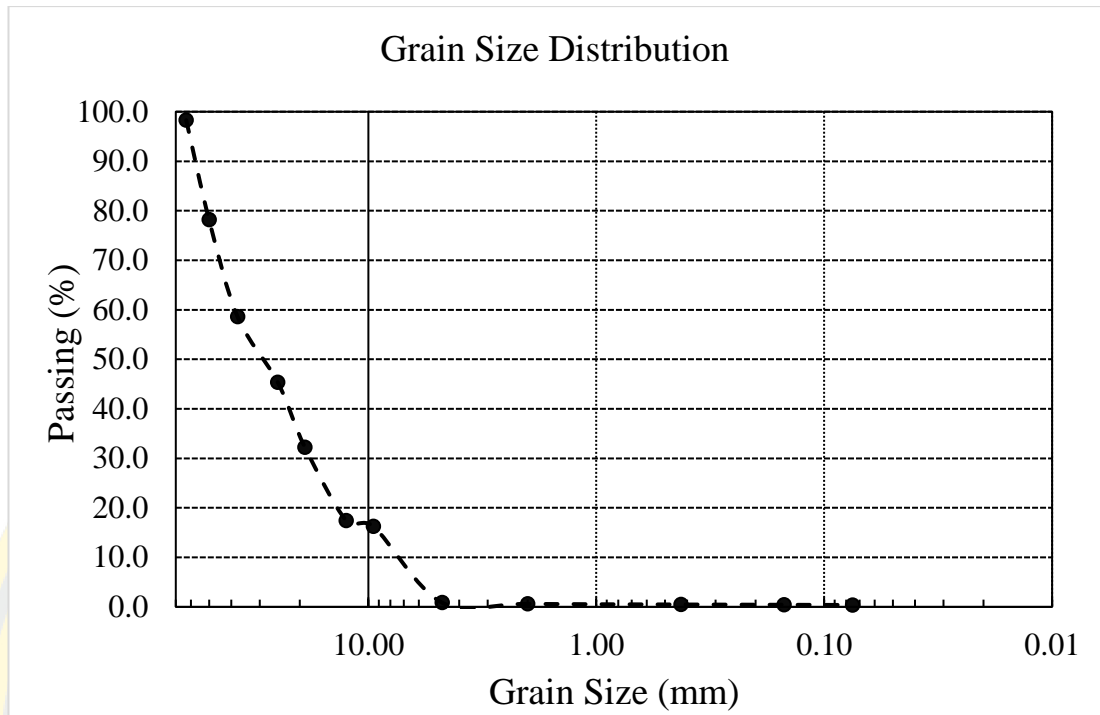
ตำแหน่งที่ 2 กม.7+401



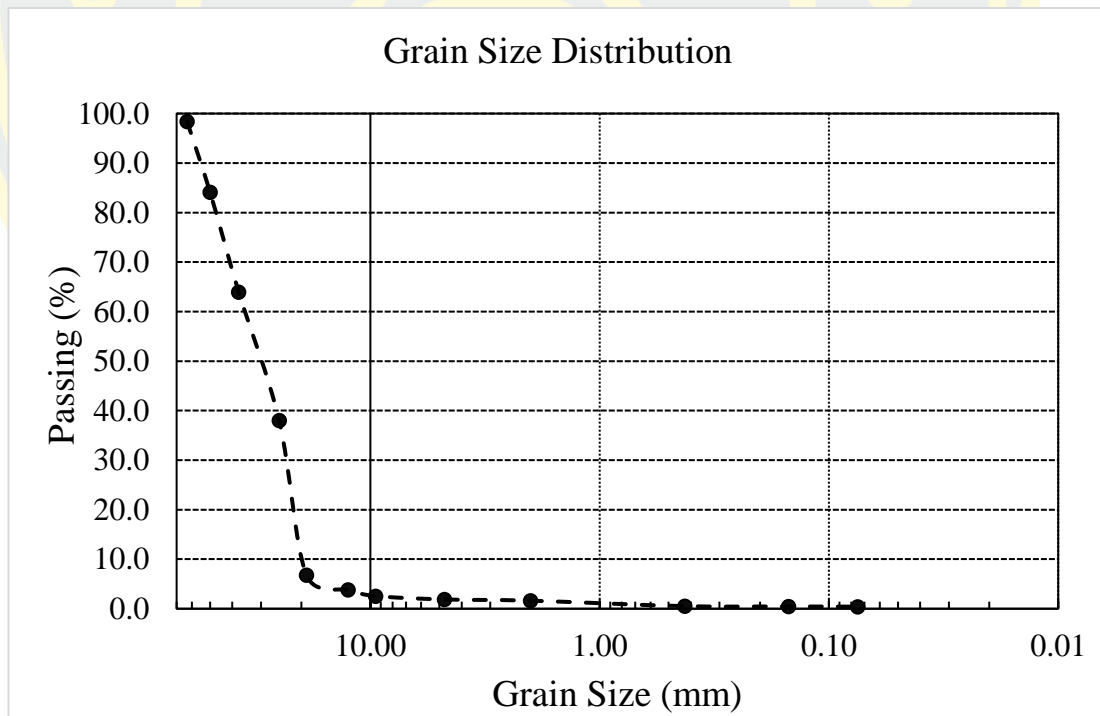
ตำแหน่งที่ 3 กม.10+028



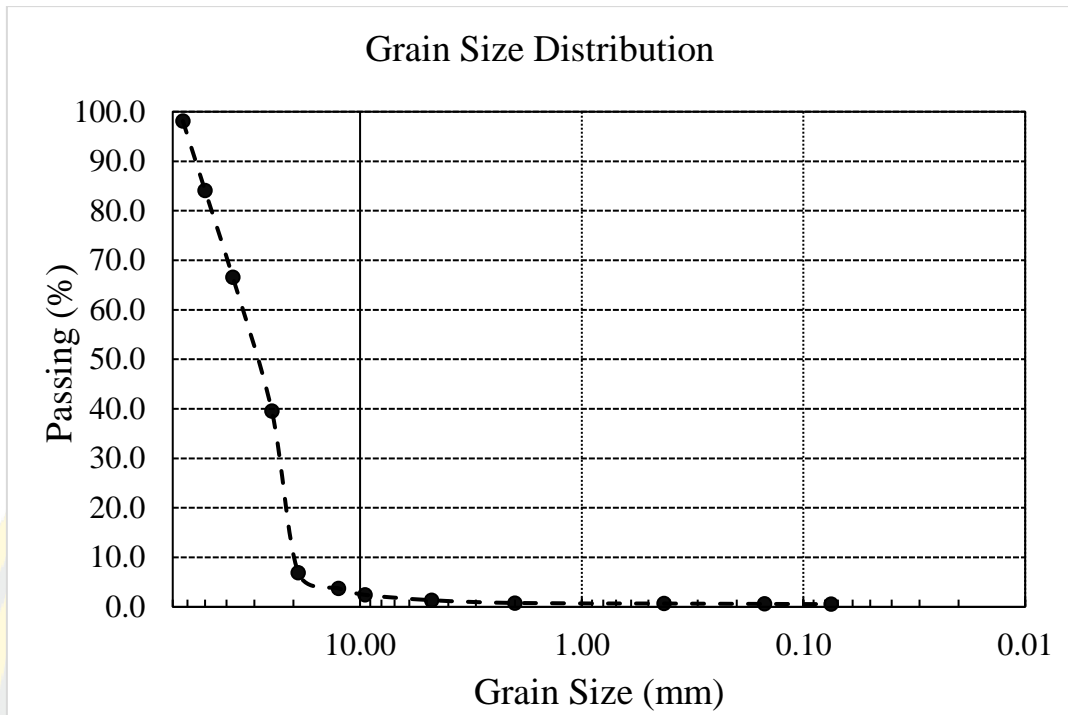
ตำแหน่งที่ 4 กม.11+578



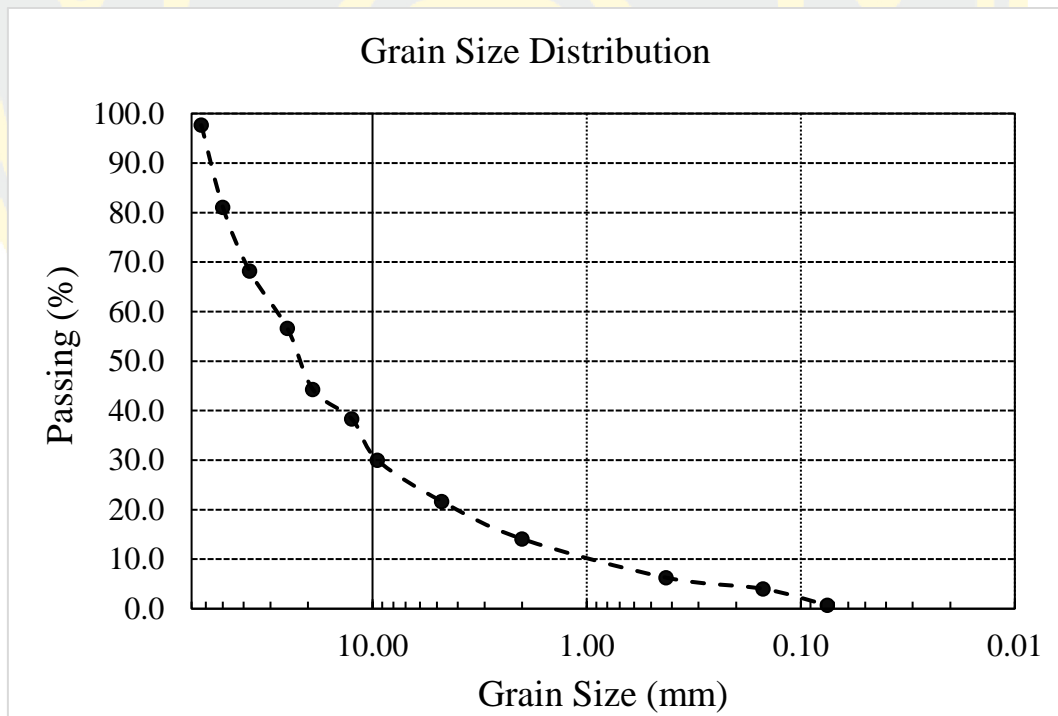
ตำแหน่งที่ 5 กม.16+690



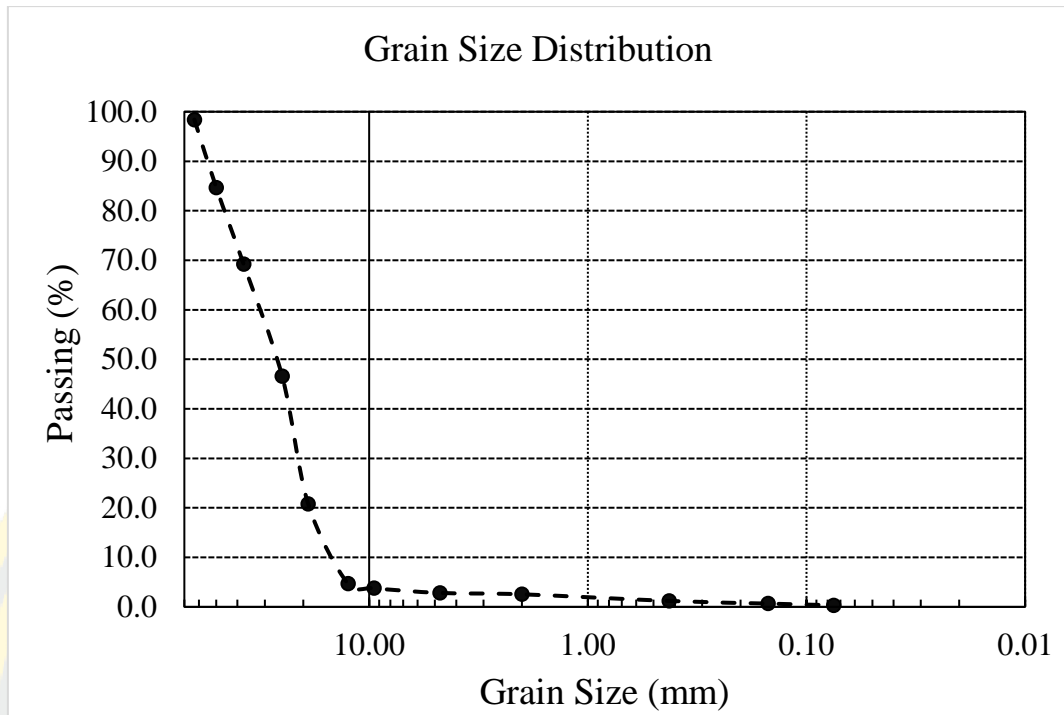
ตำแหน่งที่ 6 กม.18+264



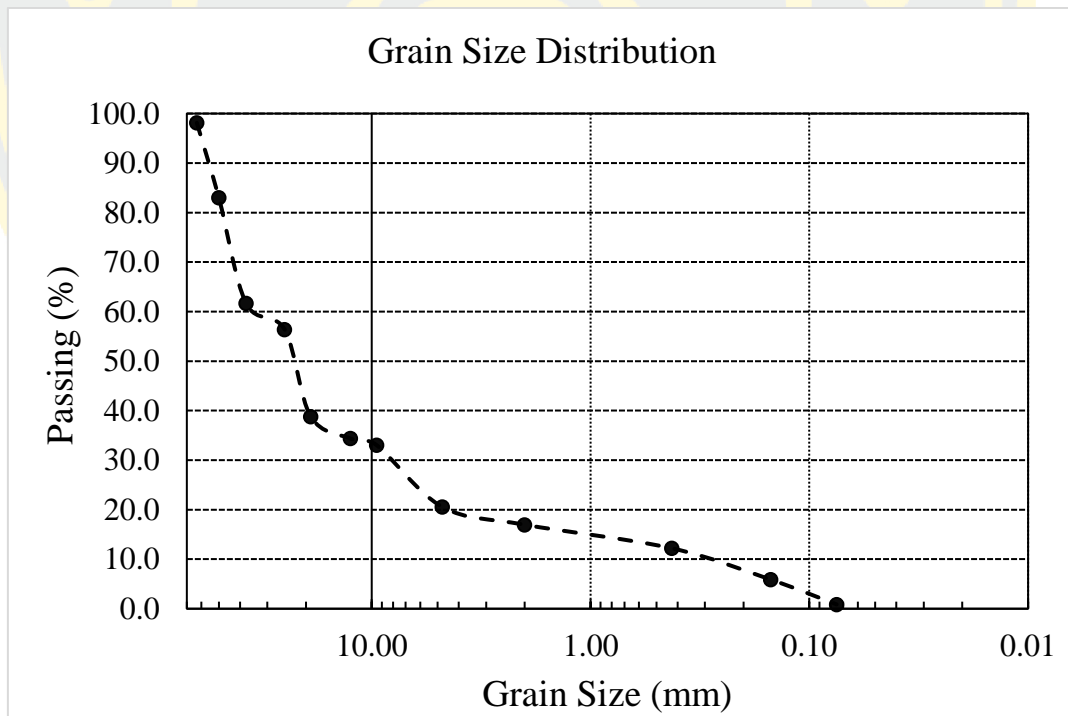
ตำแหน่งที่ 7 กม.21+029



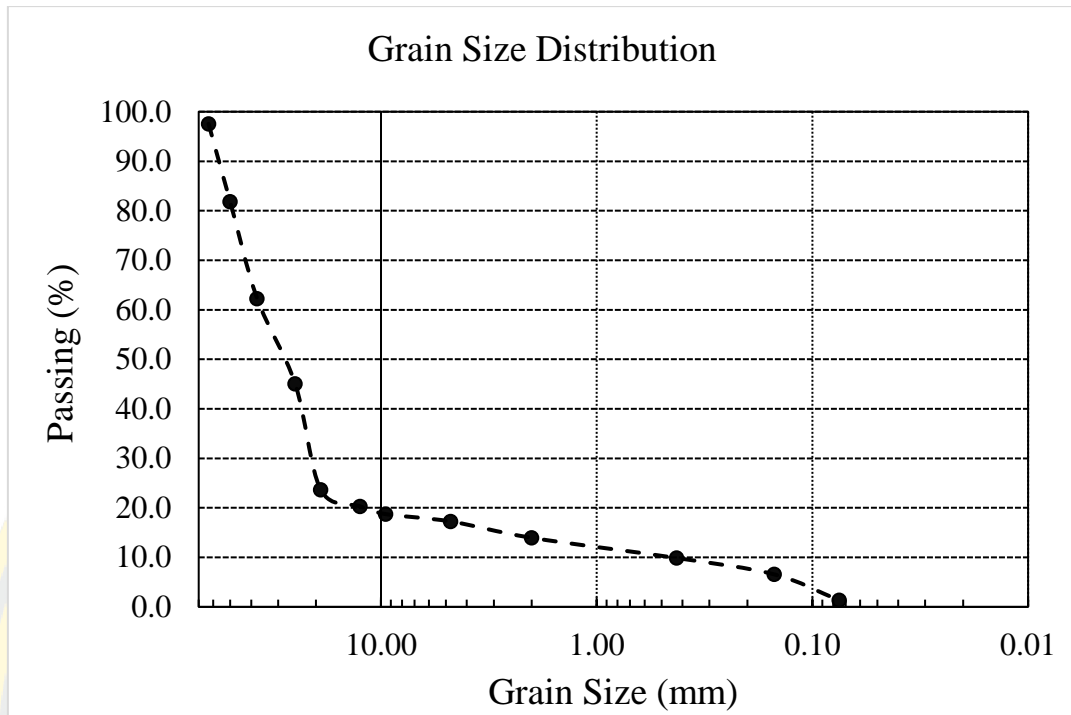
ตำแหน่งที่ 8 กม.22+458



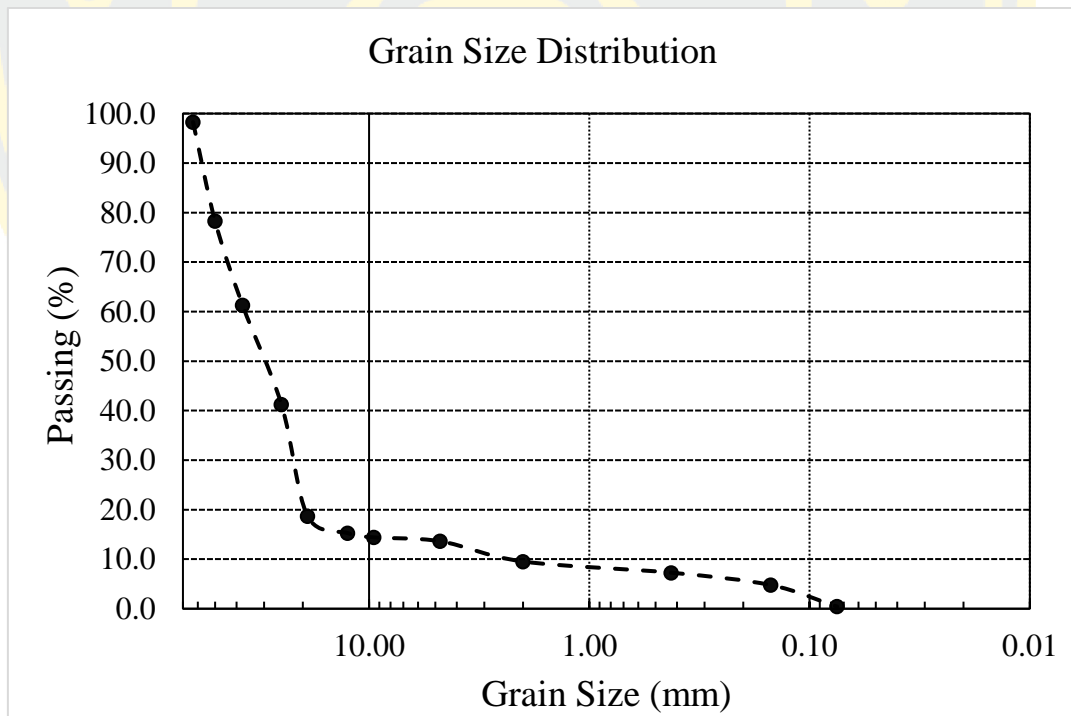
ตำแหน่งที่ 9 กม.25+329



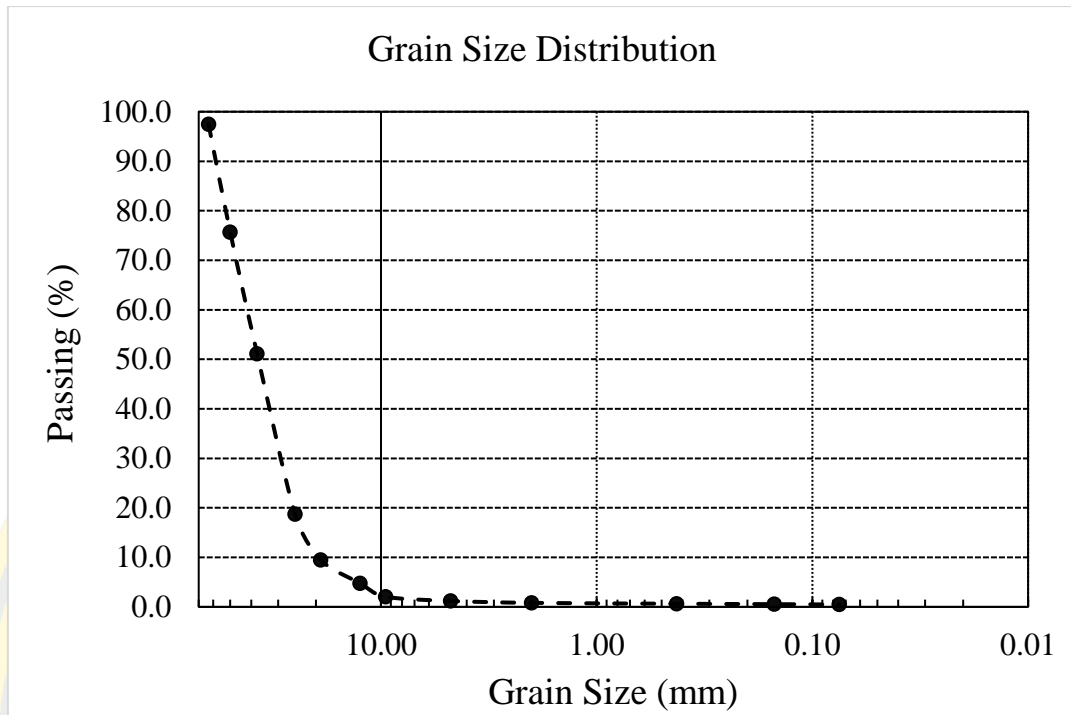
ตำแหน่งที่ 10 กม.26+929



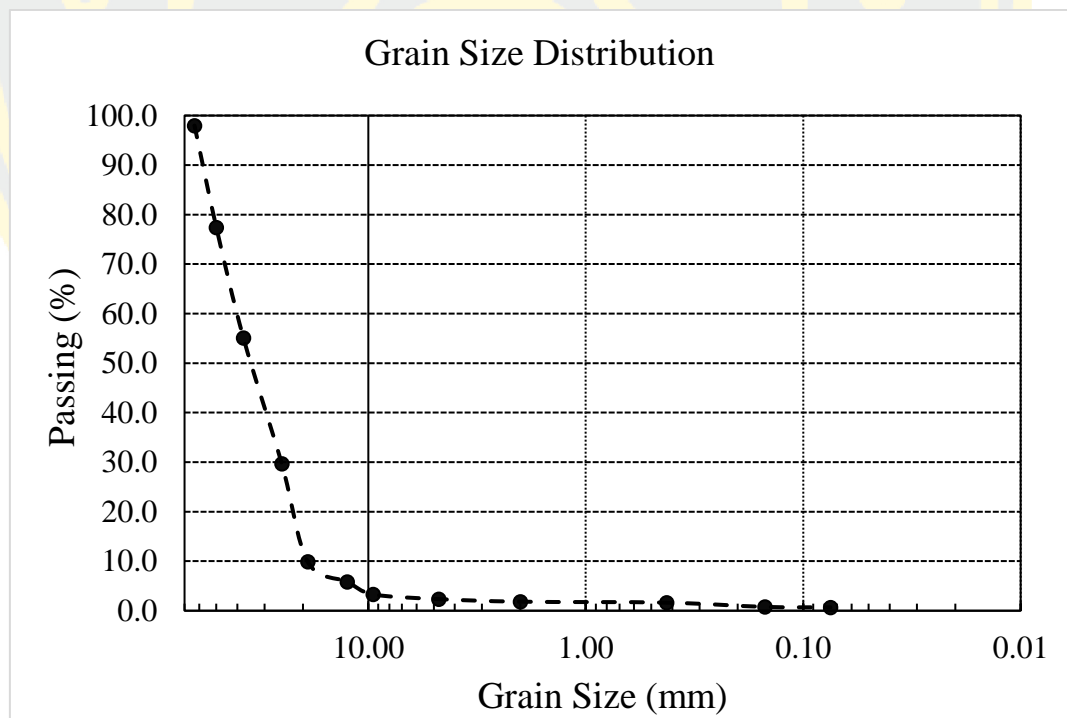
ตำแหน่งที่ 11 กม.30+115



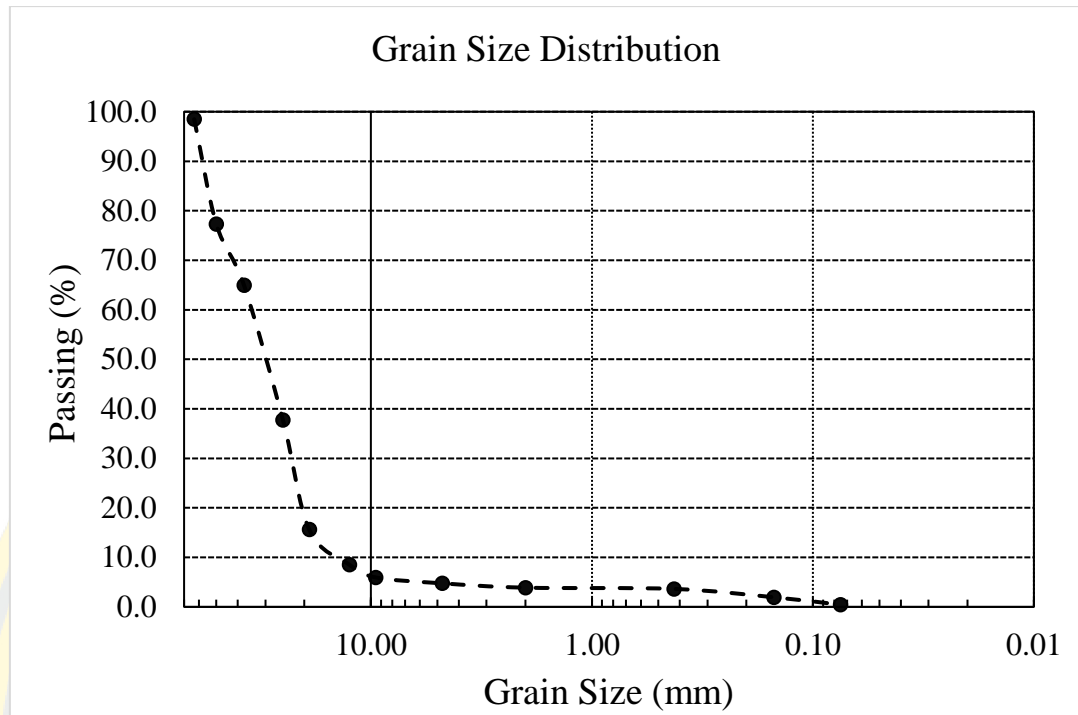
ตำแหน่งที่ 12 กม.30+737



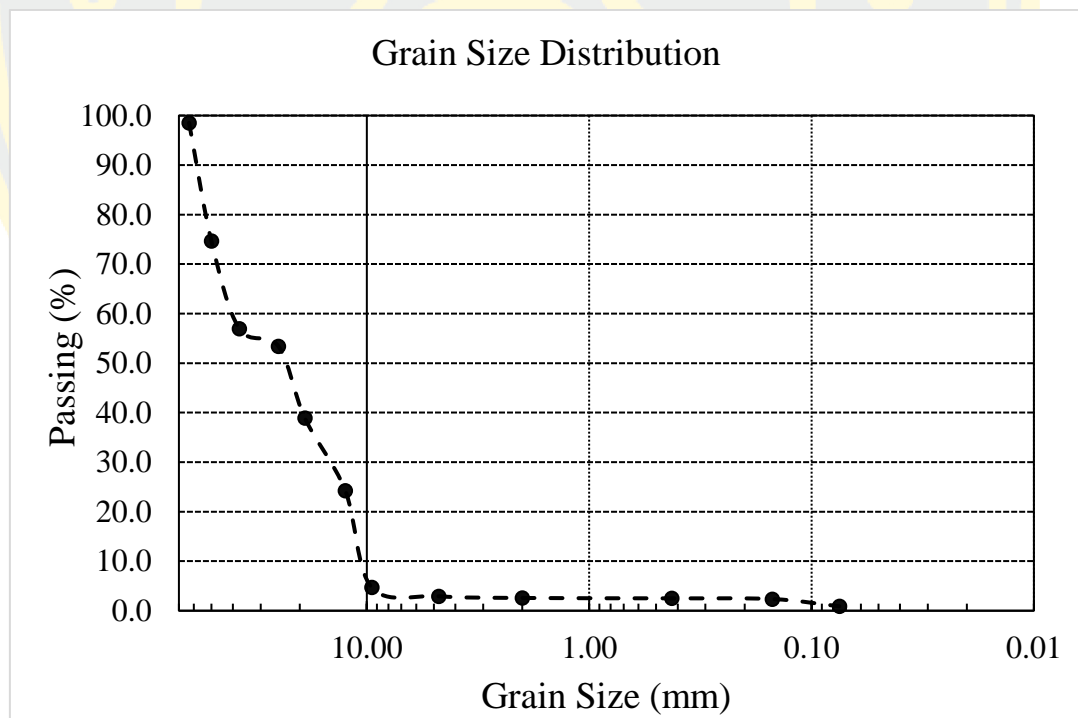
ตำแหน่งที่ 13 กม.34+037



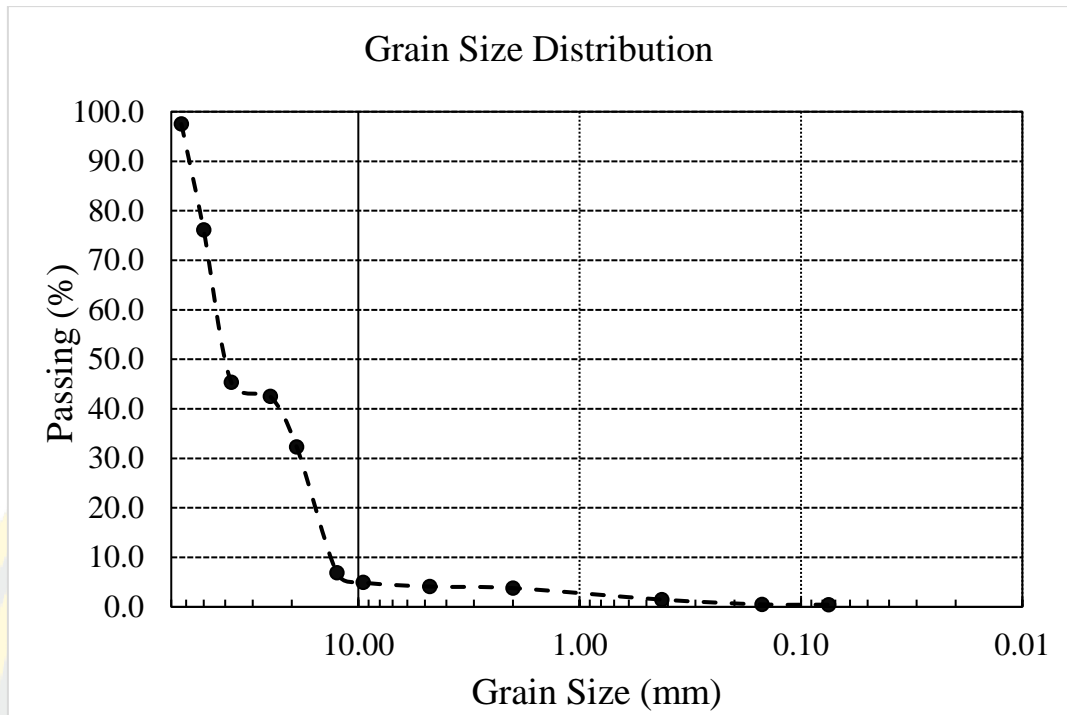
ตำแหน่งที่ 14 กม.35+088



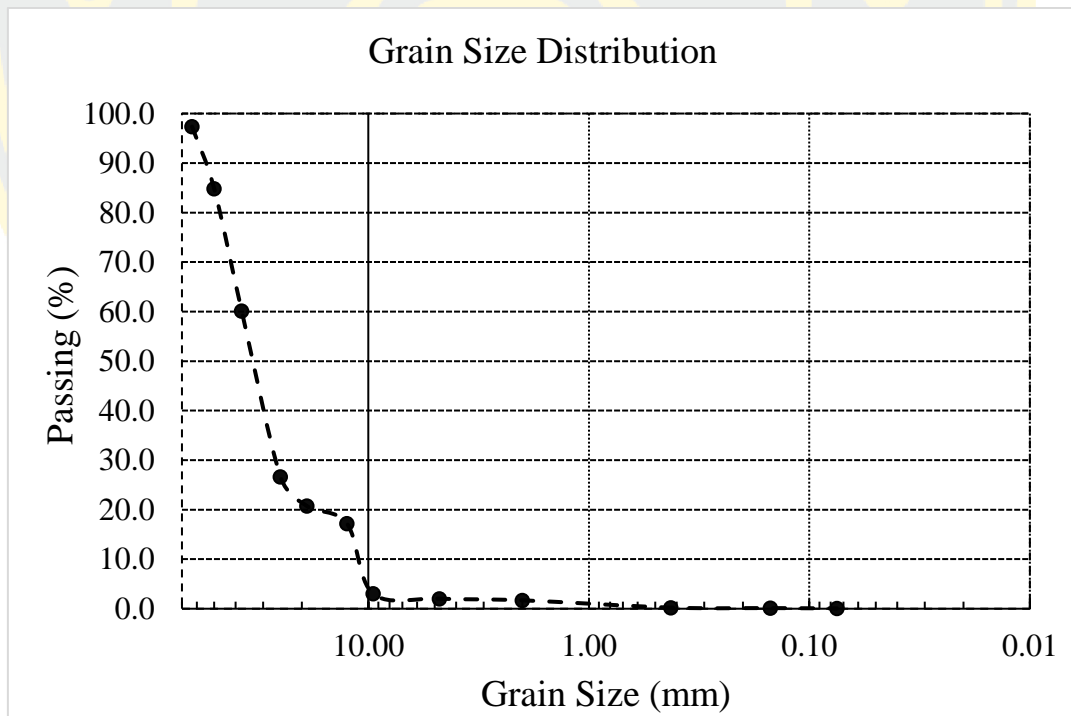
ตำแหน่งที่ 15 กม.37+688



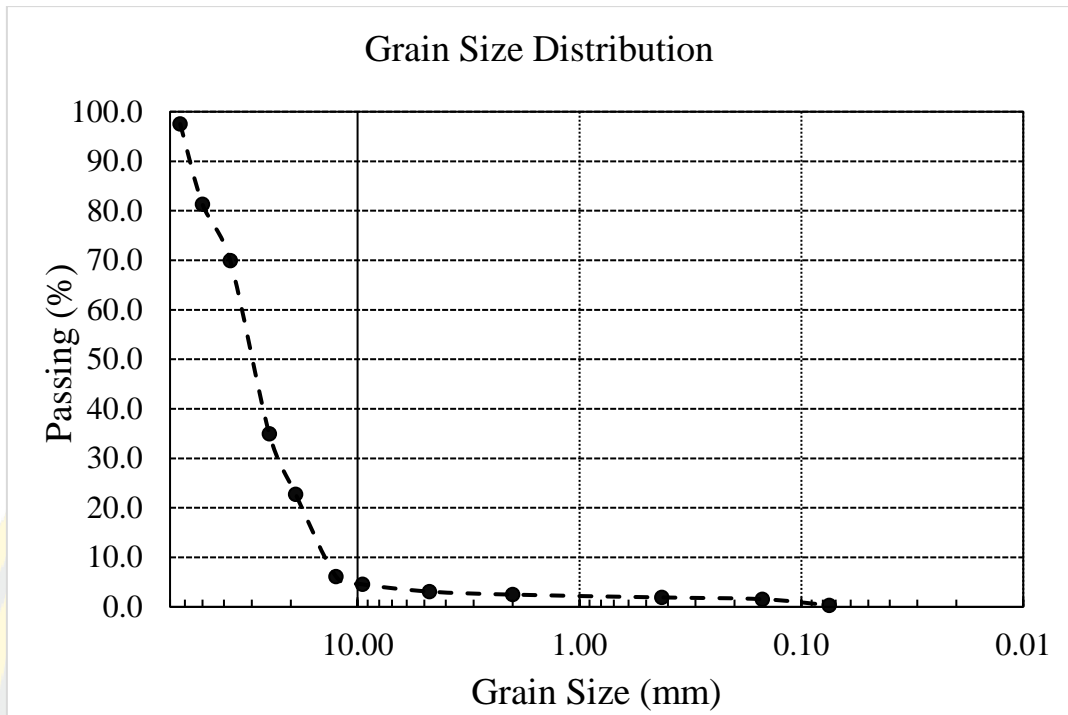
ตำแหน่งที่ 16 กม.39+979



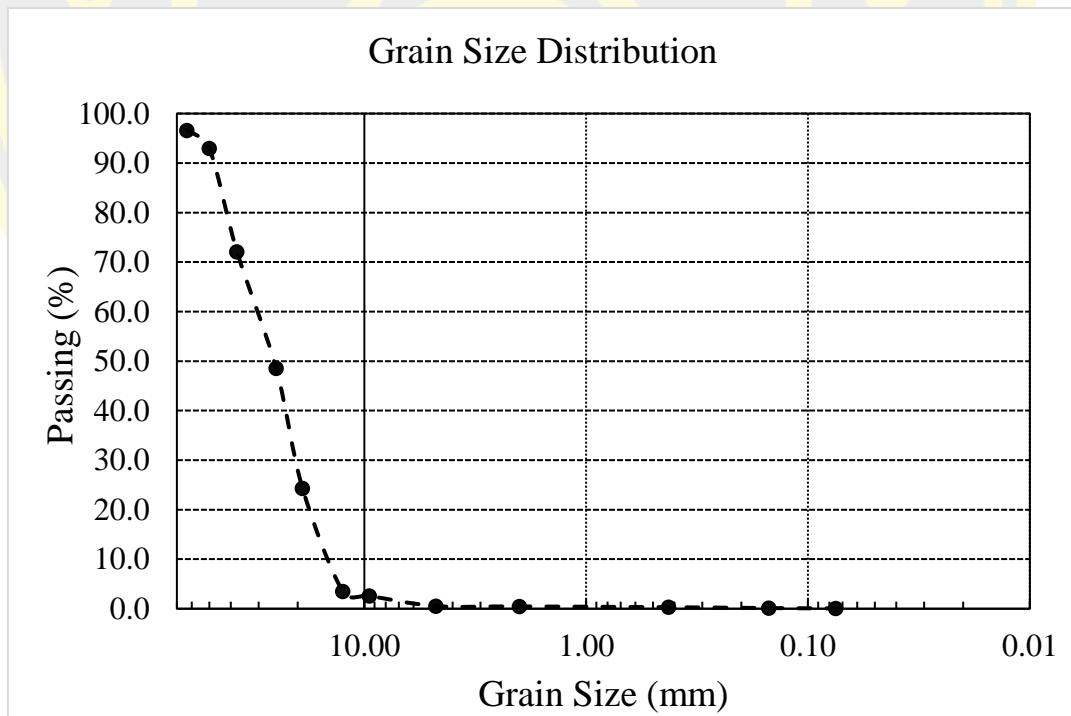
ตำแหน่งที่ 17 กม.40+288



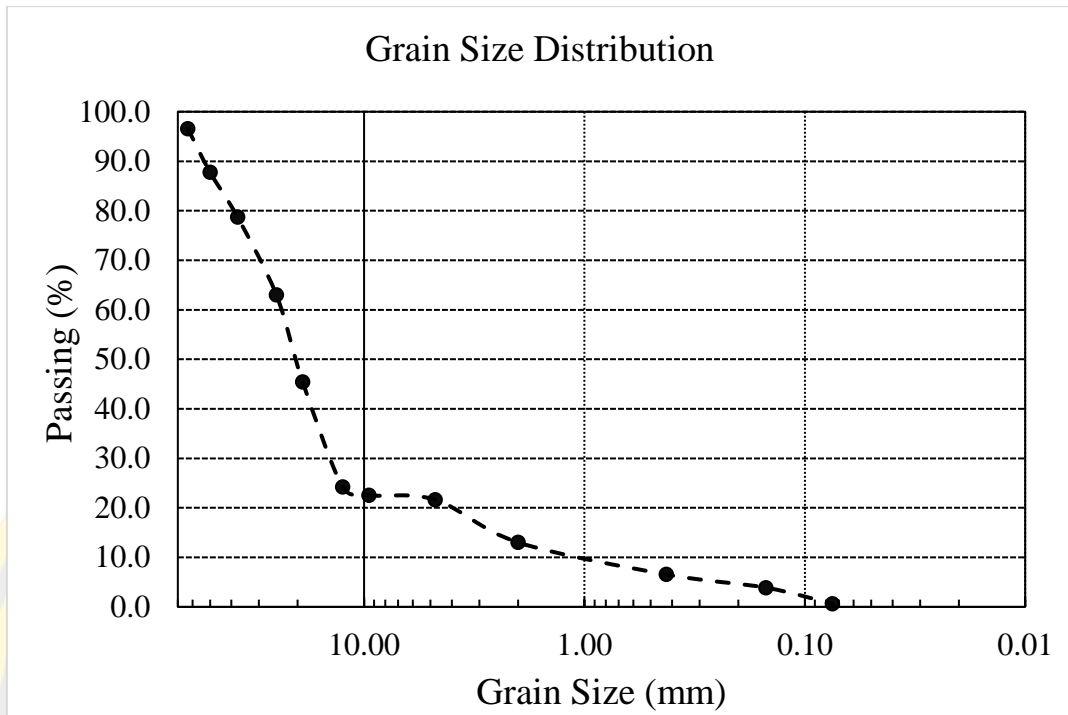
ตำแหน่งที่ 18 กม.43+234



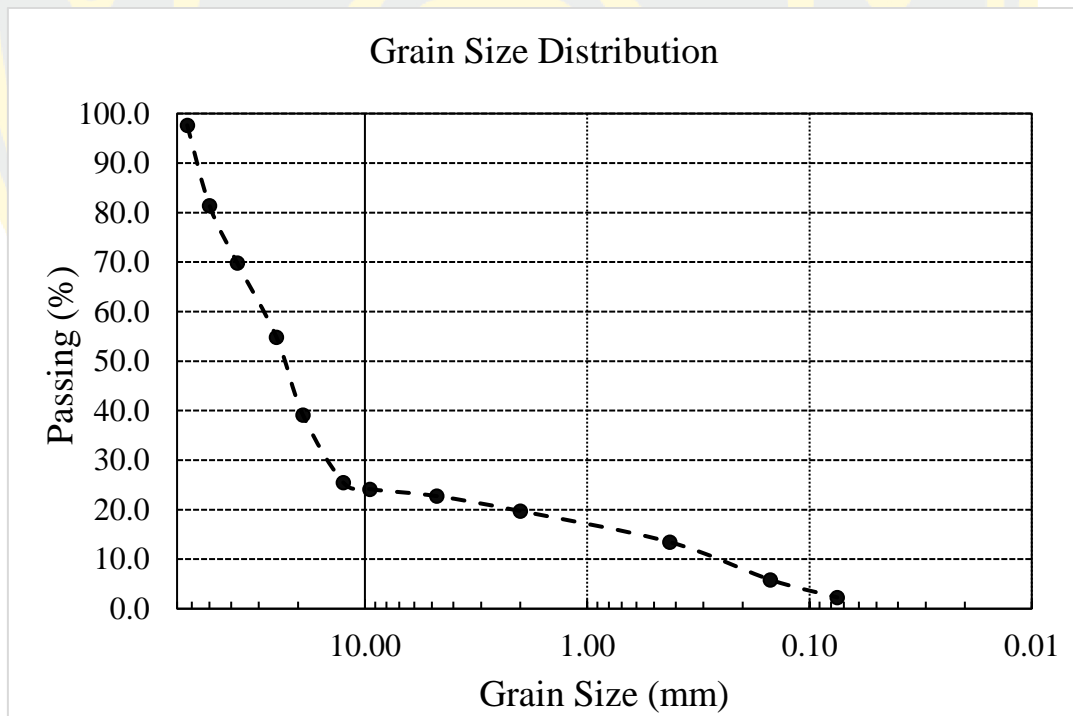
ตำแหน่งที่ 19 กม.45+434



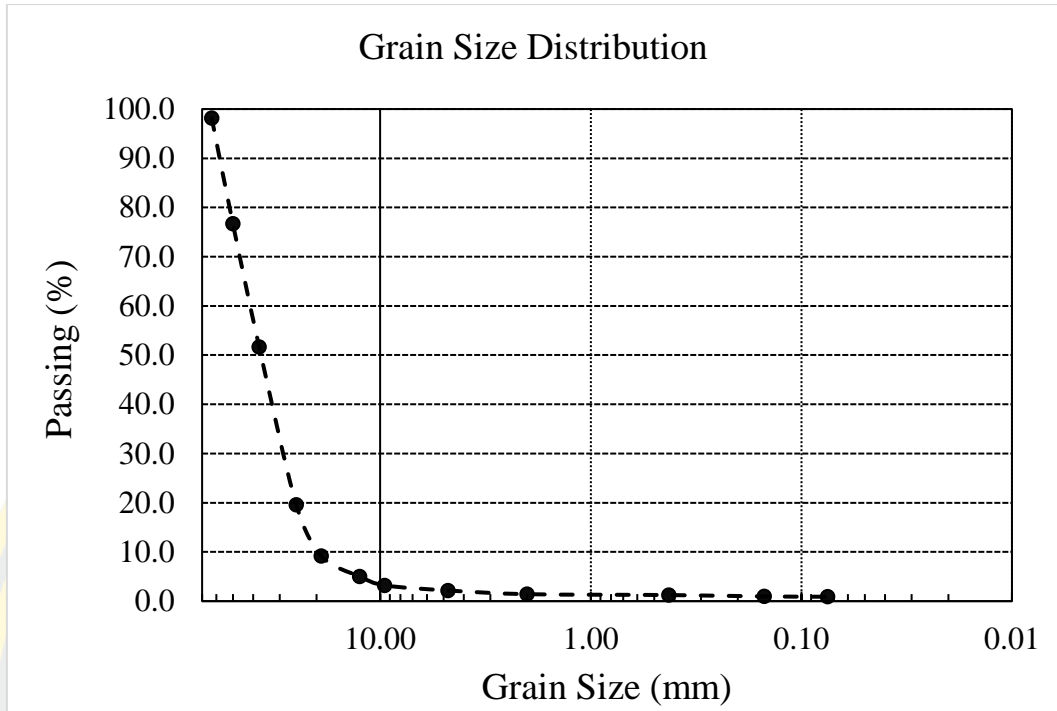
ตำแหน่งที่ 20 กม.60+160



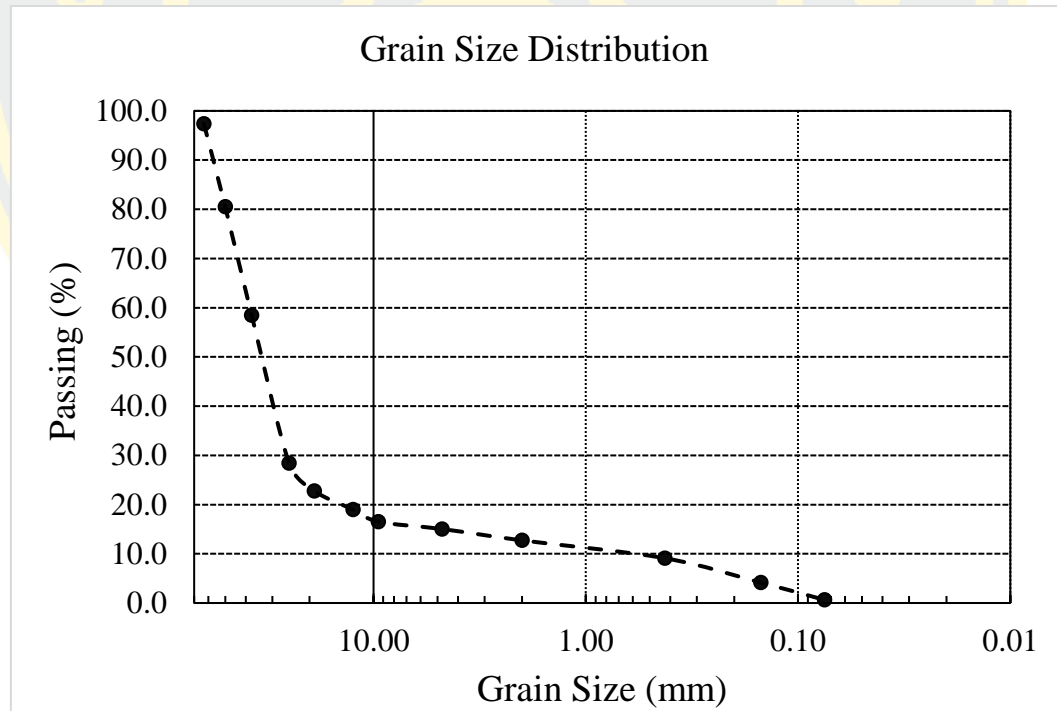
ตำแหน่งที่ 21 กม.61+285



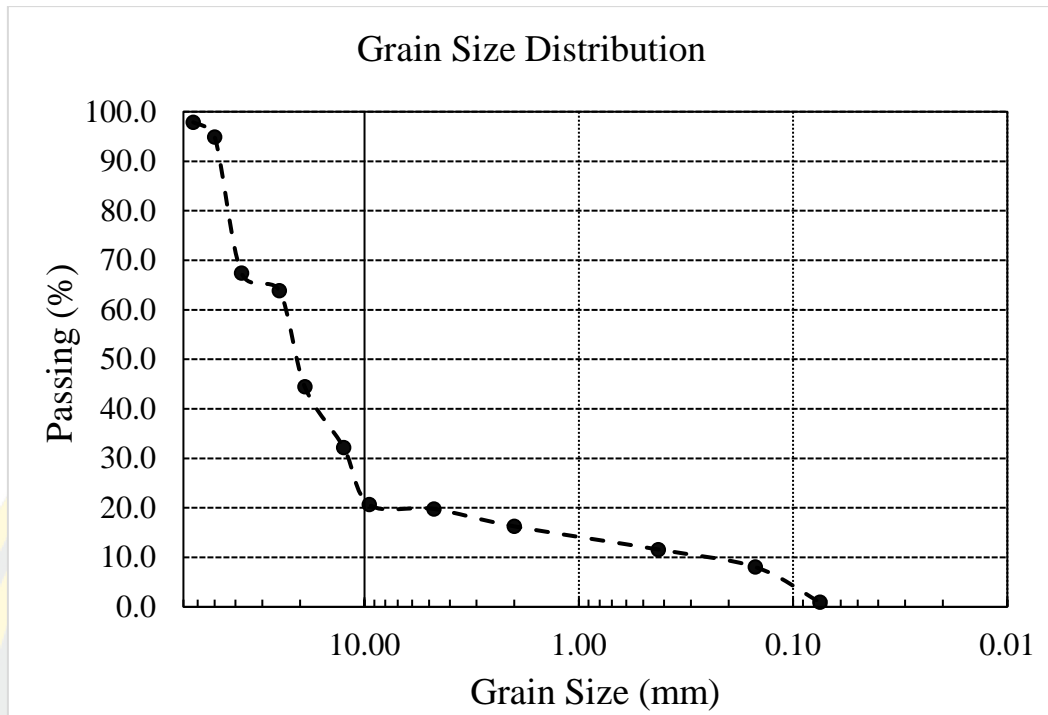
ตำแหน่งที่ 22 กม.62+435



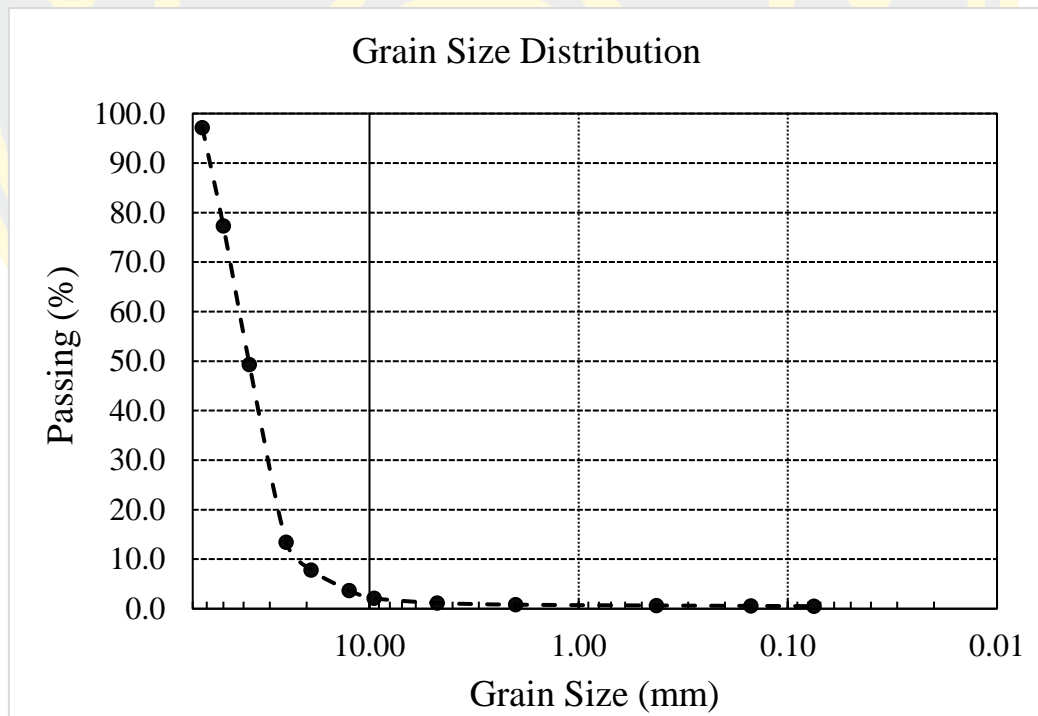
ตำแหน่งที่ 23 กม.64+935



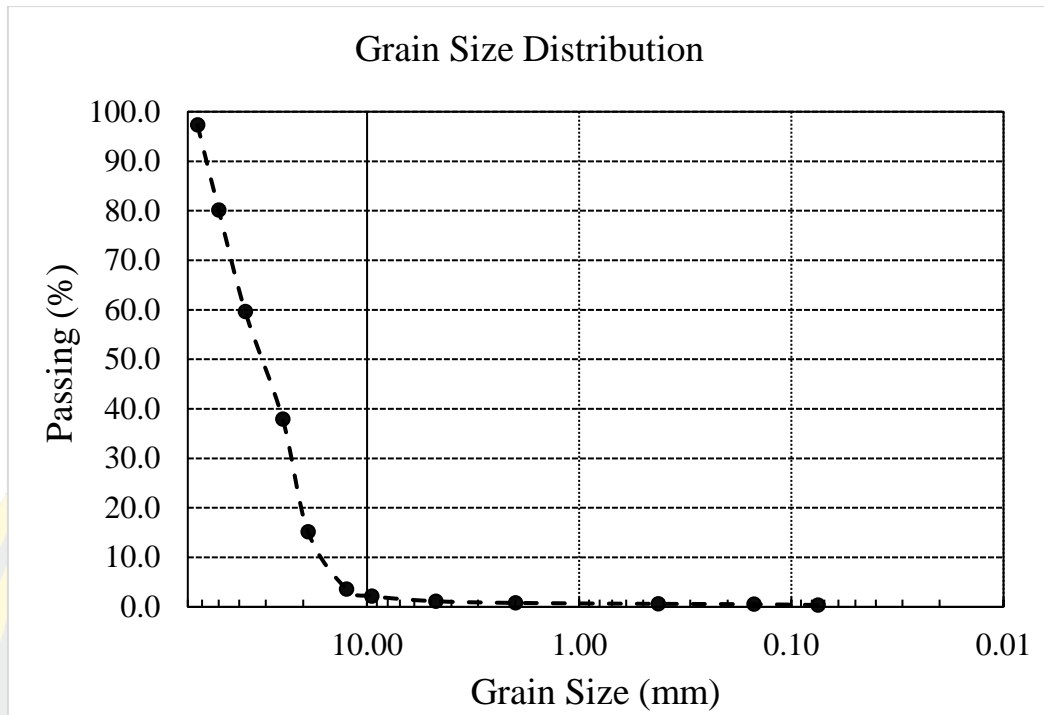
ตำแหน่งที่ 24 กม.68+435



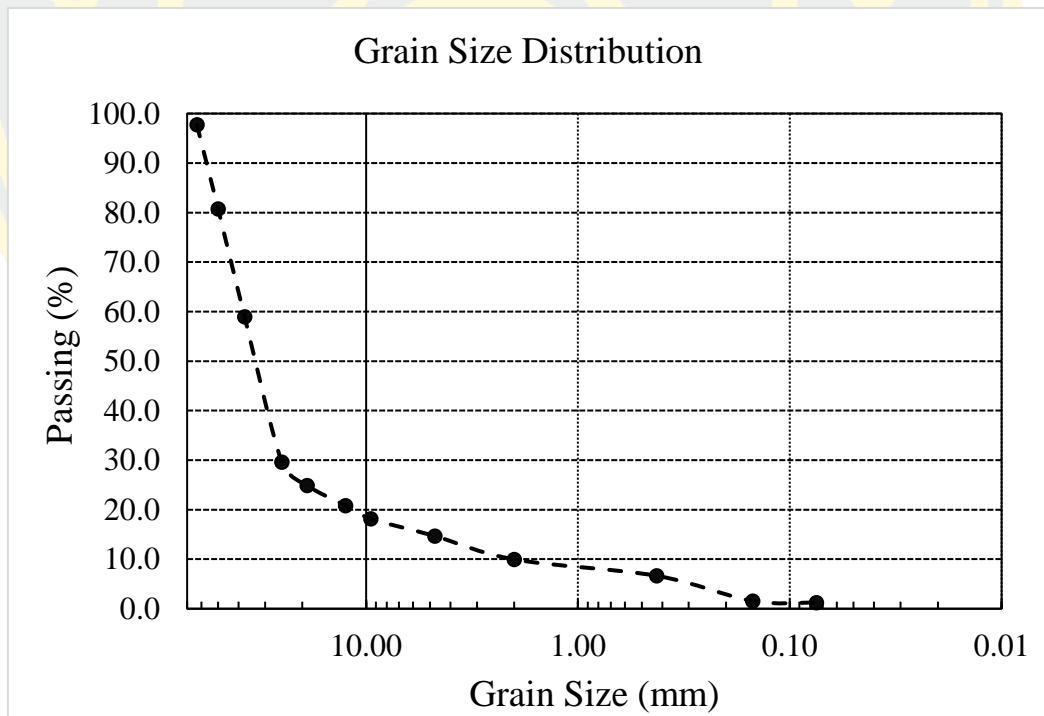
ตำแหน่งที่ 25 กม.69+535



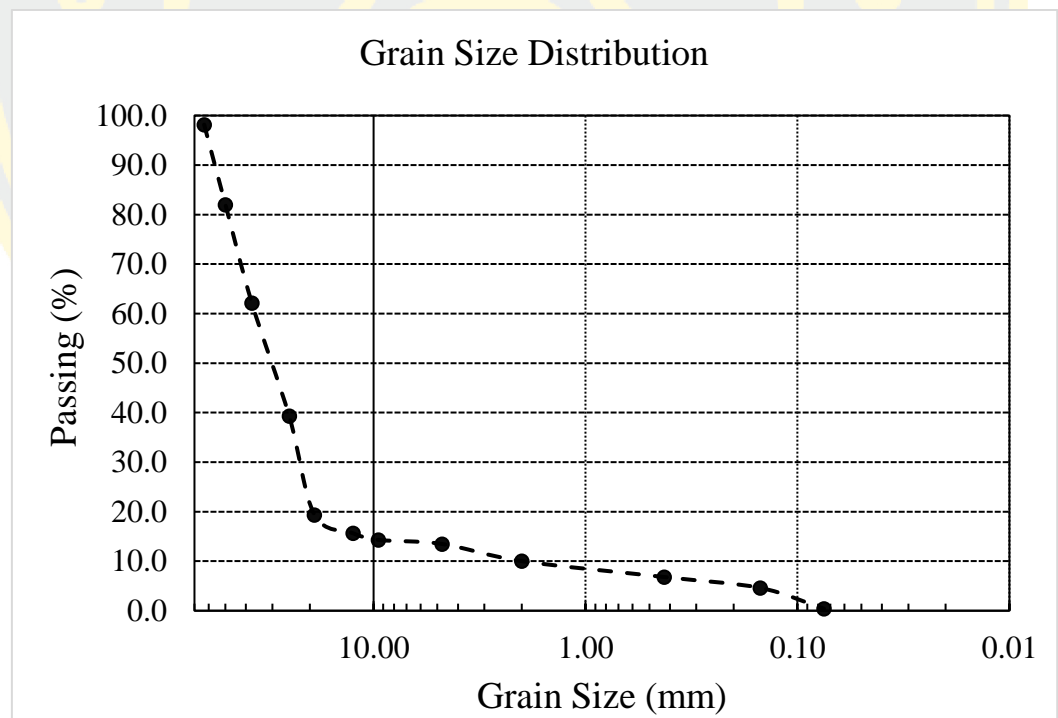
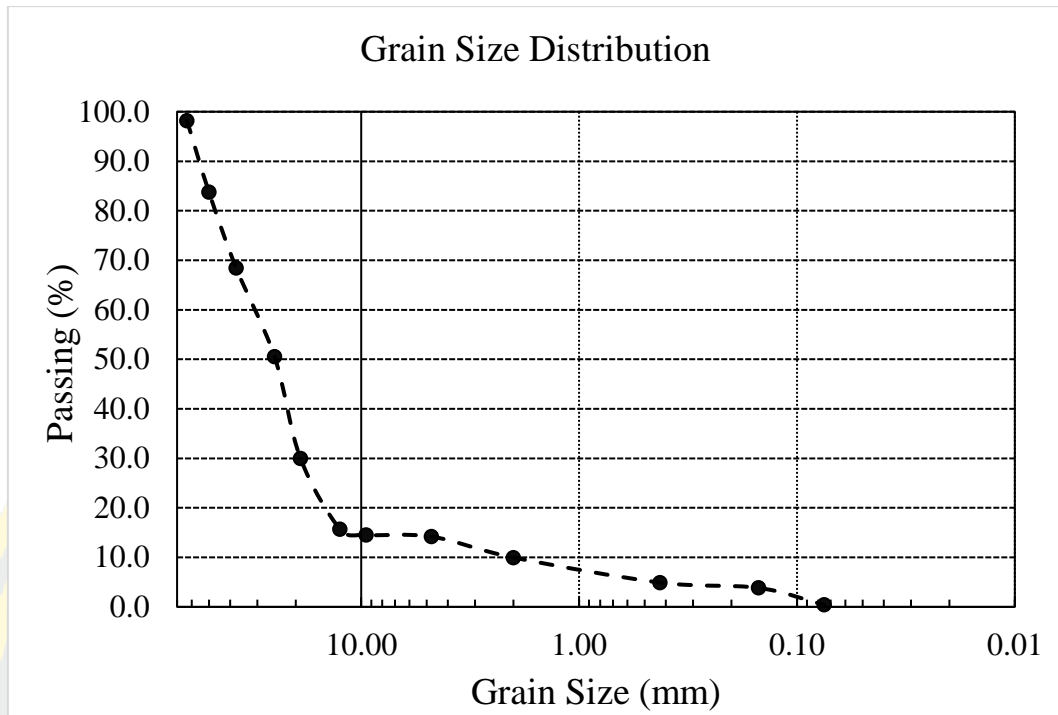
ตำแหน่งที่ 26 กม.70+535

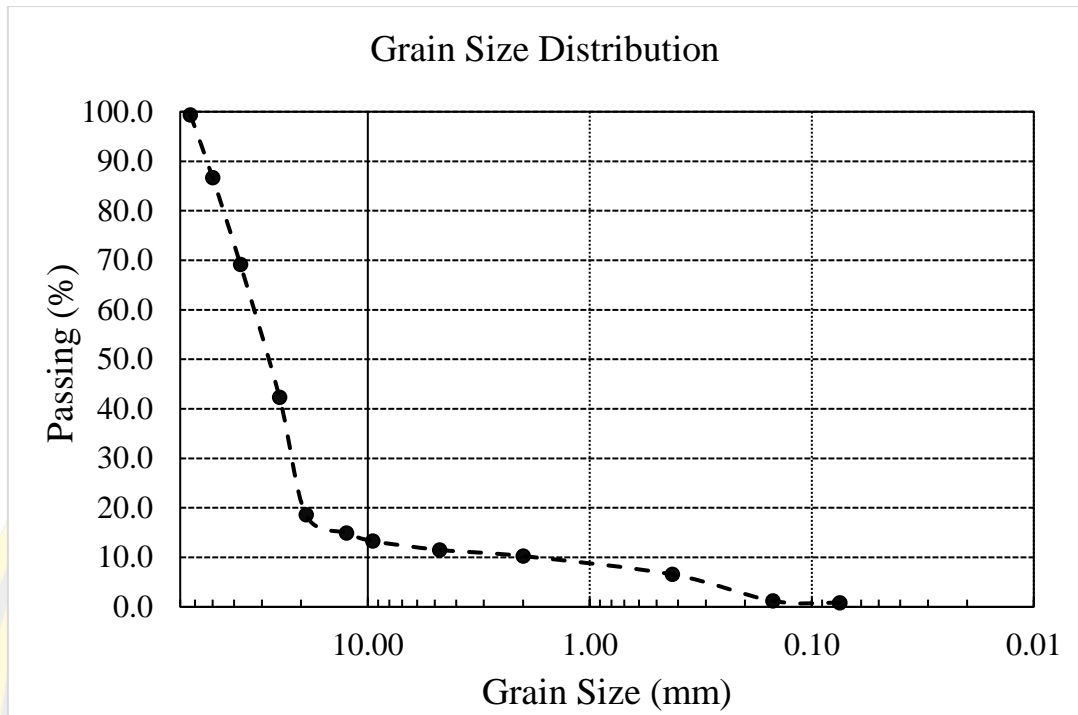


ตำแหน่งที่ 27 กม.72+835

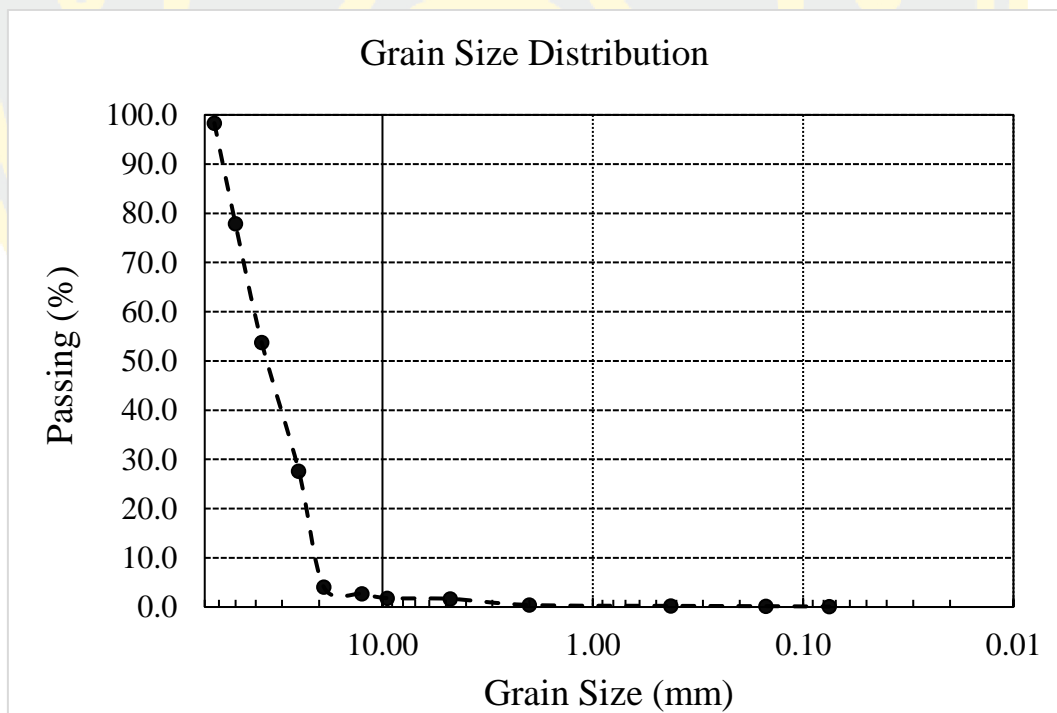


ตำแหน่งที่ 28 กม.75+335

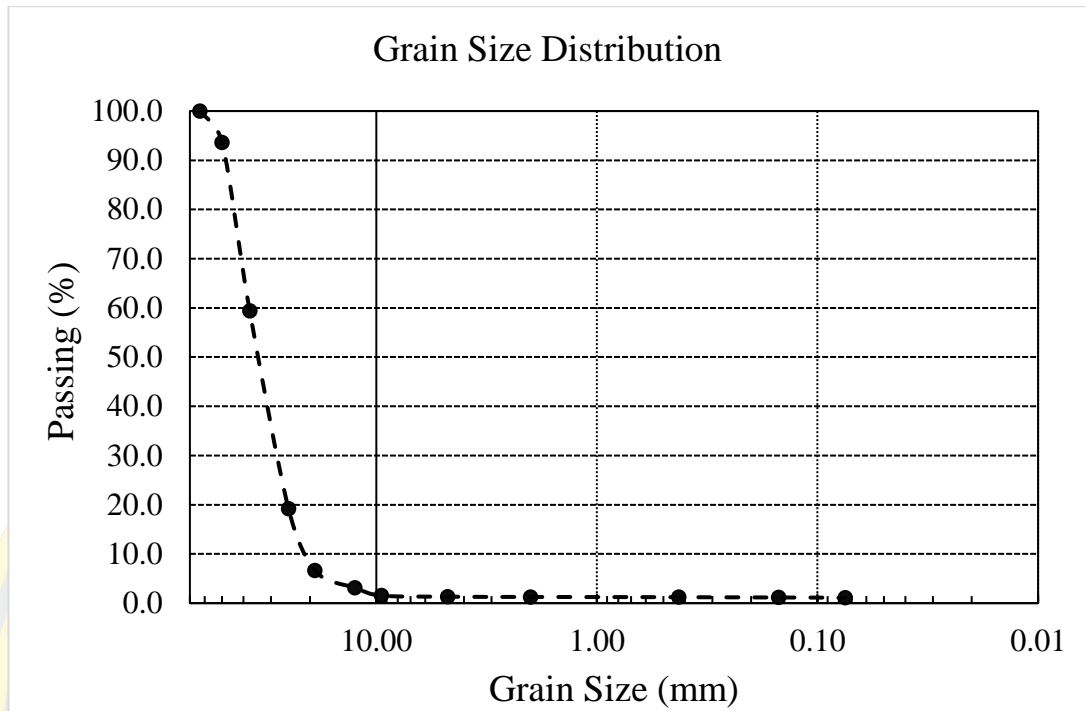




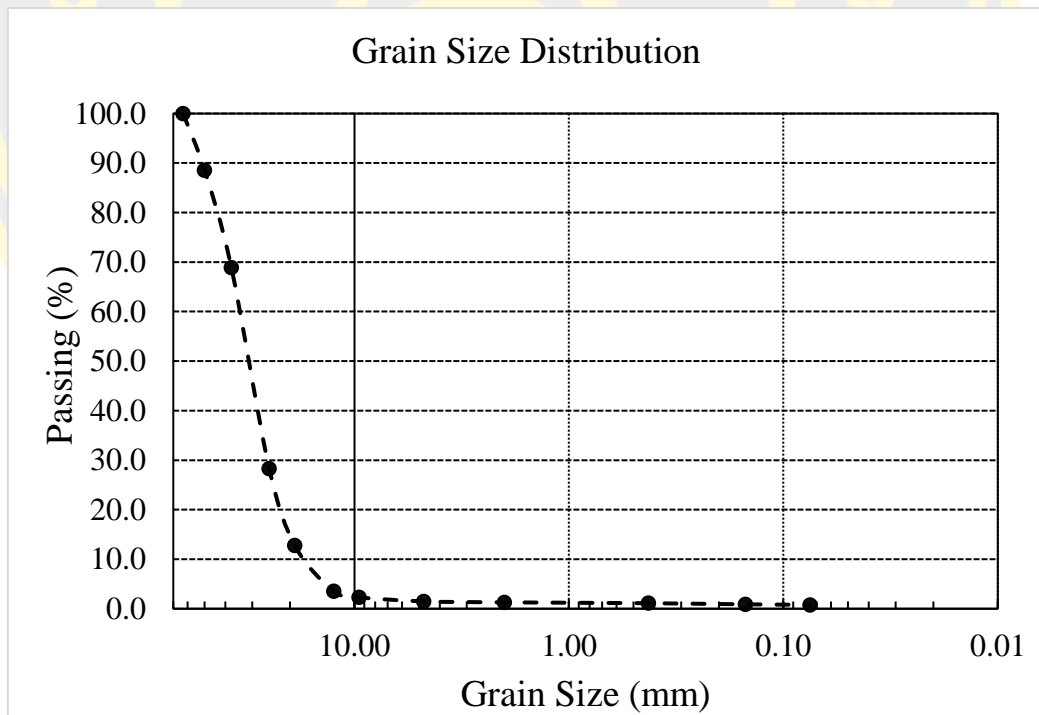
ตำแหน่งที่ 31 กม.82+435



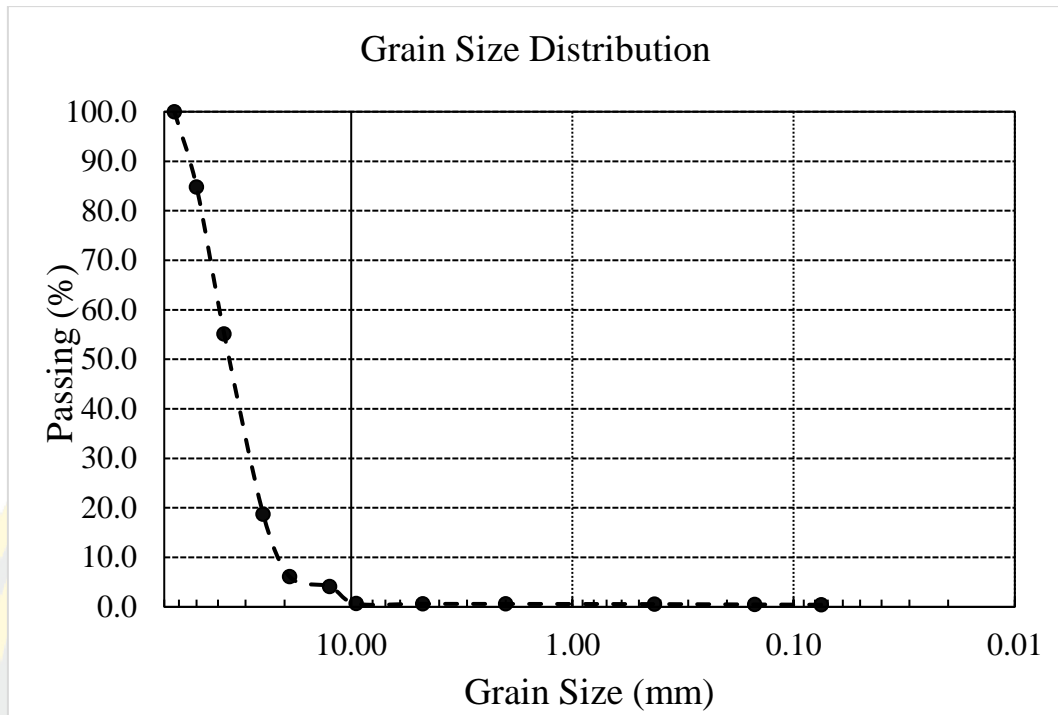
ตำแหน่งที่ 32 กม.84+335



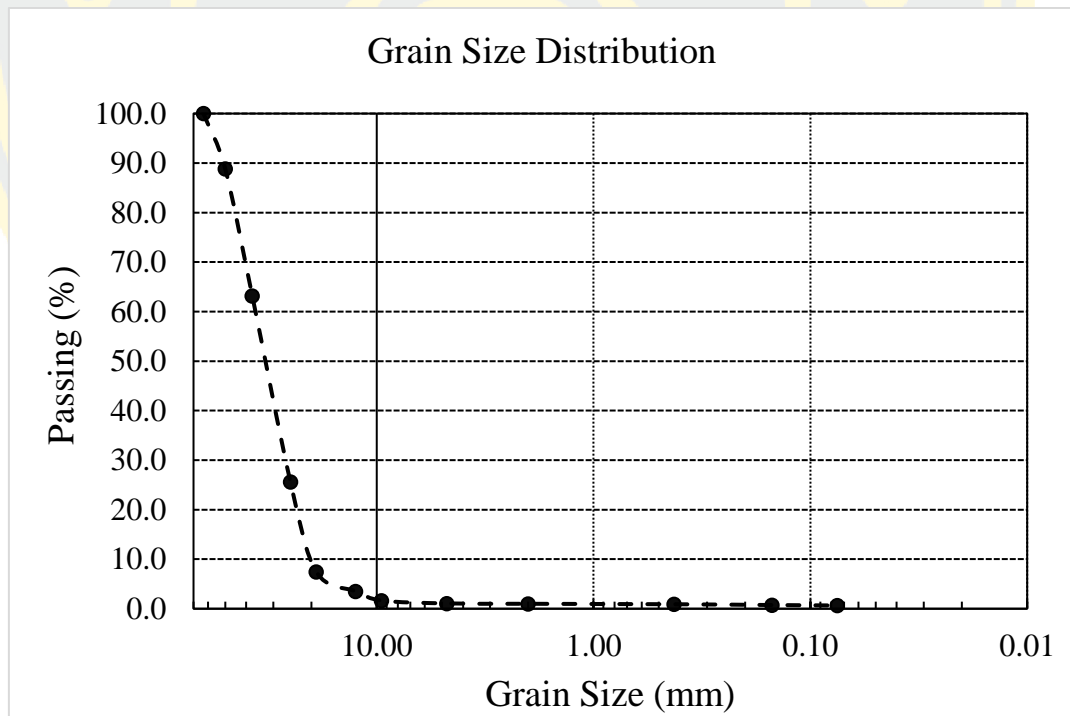
ตำแหน่งที่ 33 กม.85+335



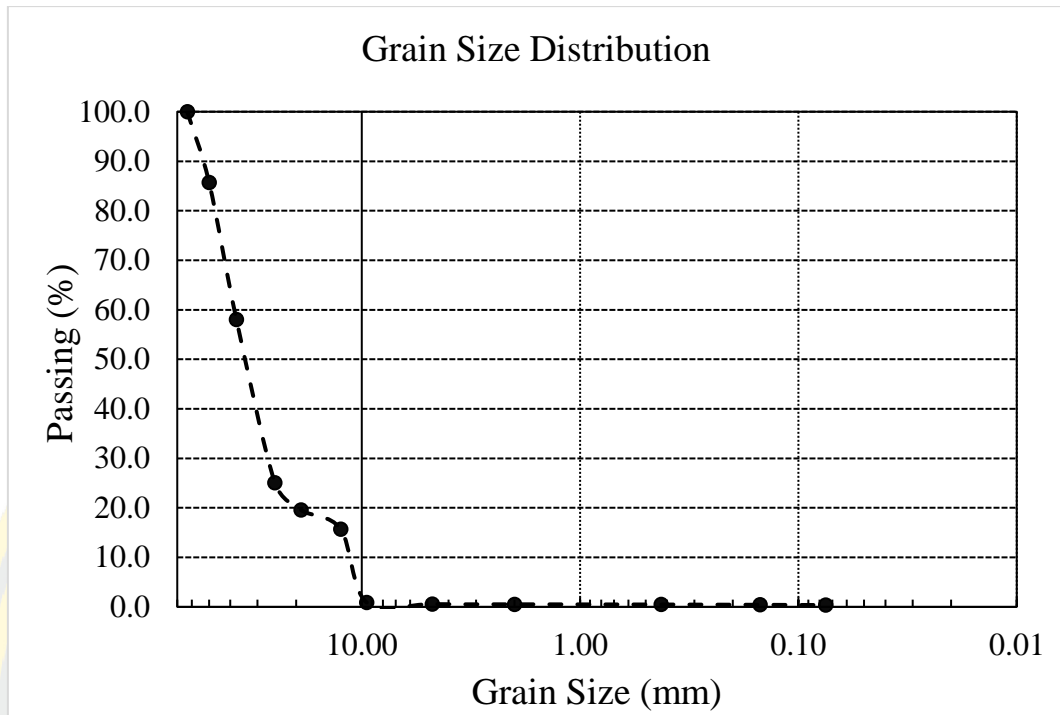
ตำแหน่งที่ 34 กม.87+435



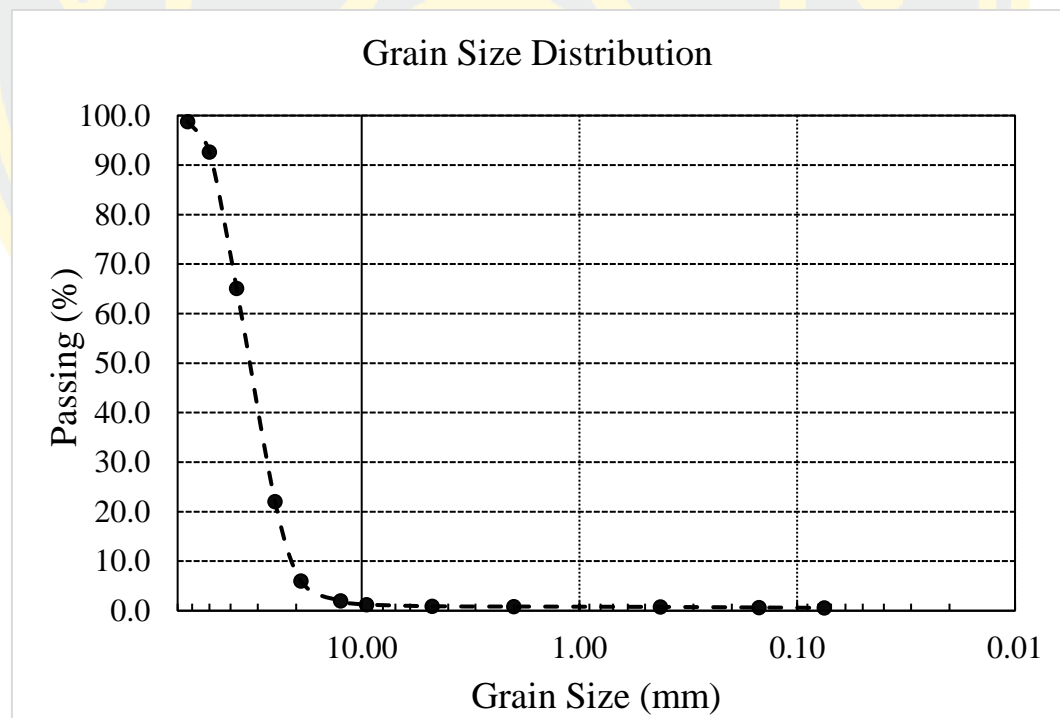
ตำแหน่งที่ 35 กม.89+435



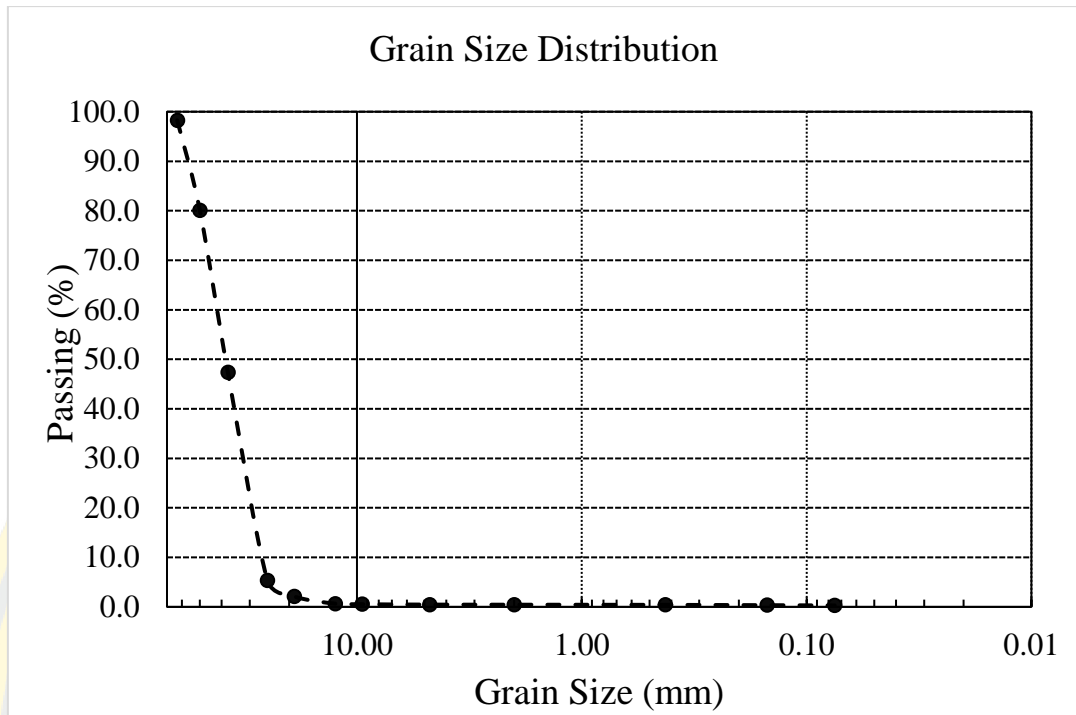
ตำแหน่งที่ 36 กม.91+335



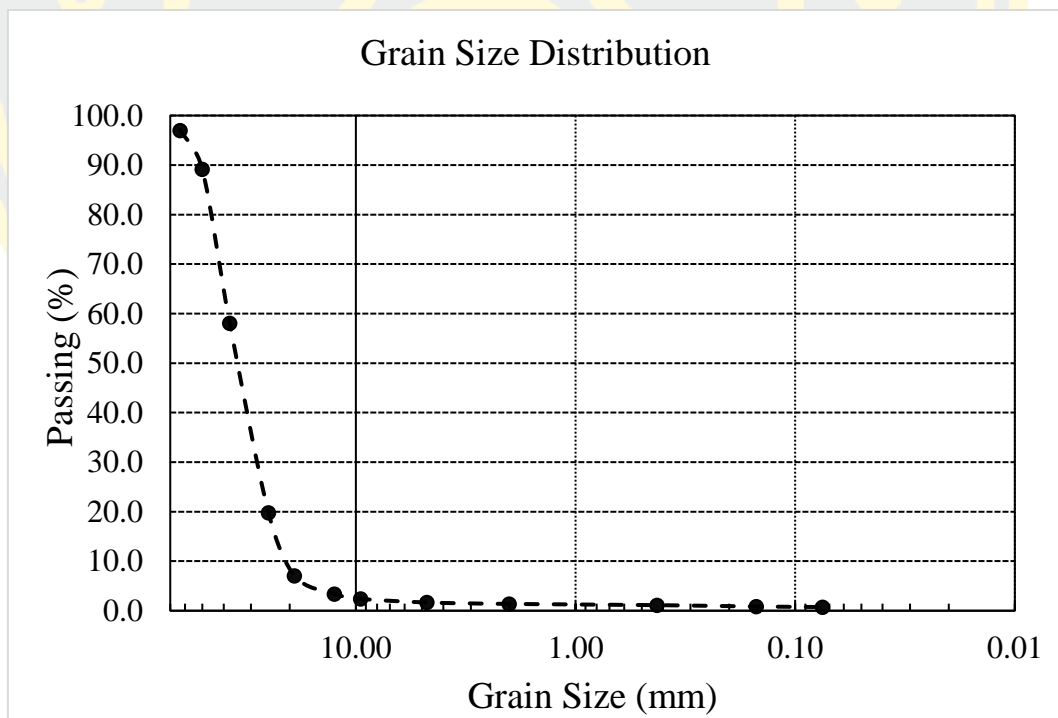
ตำแหน่งที่ 37 กม.93+835



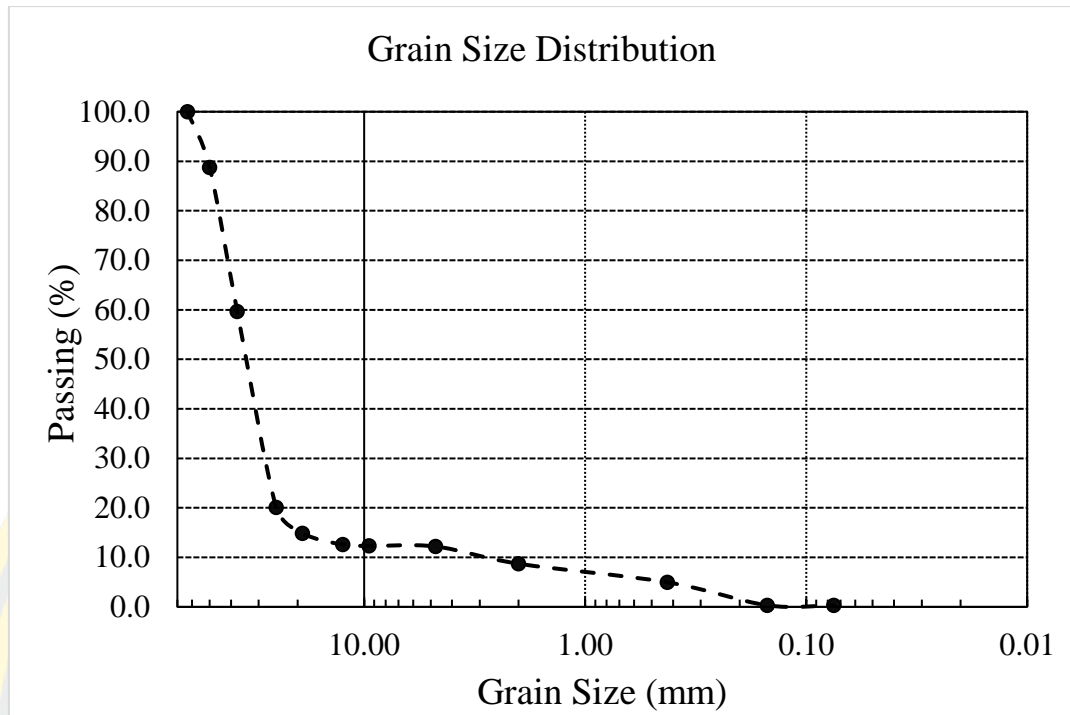
ตำแหน่งที่ 38 กม.96+135



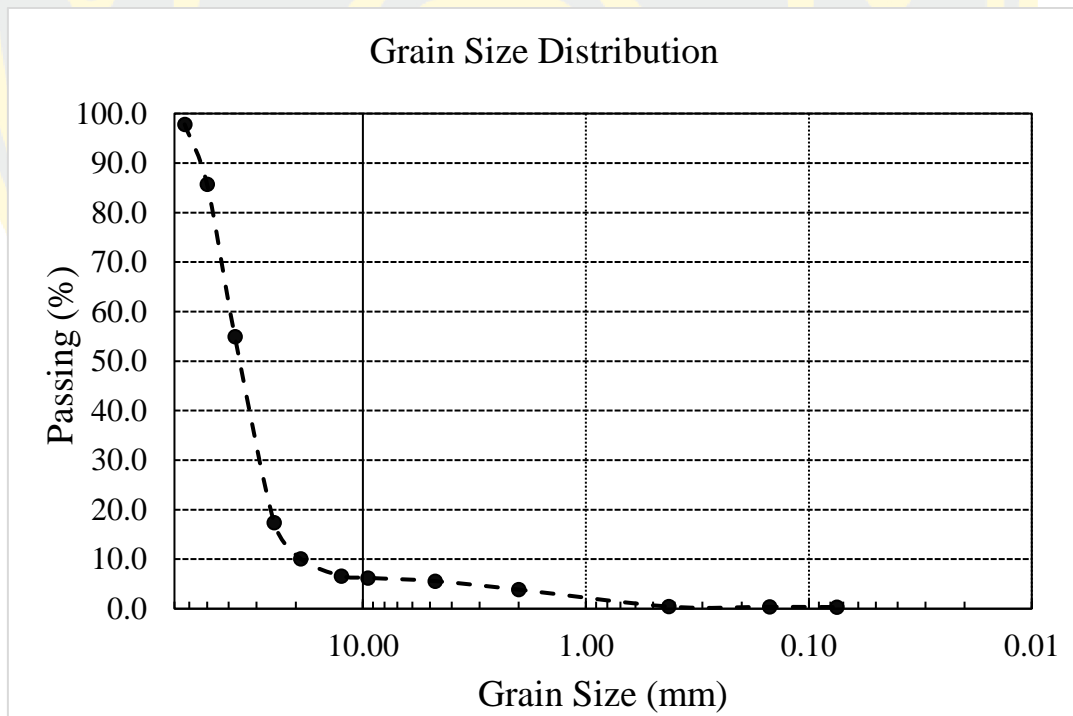
ตำแหน่งที่ 39 กม.98+435



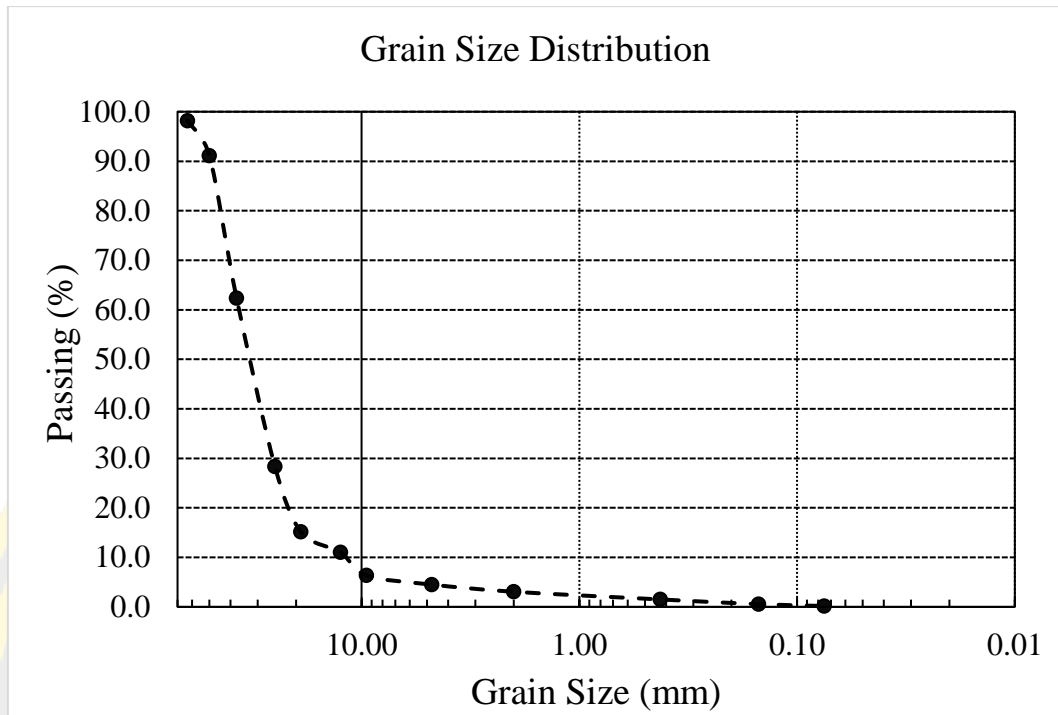
ตำแหน่งที่ 40 กม.100+435



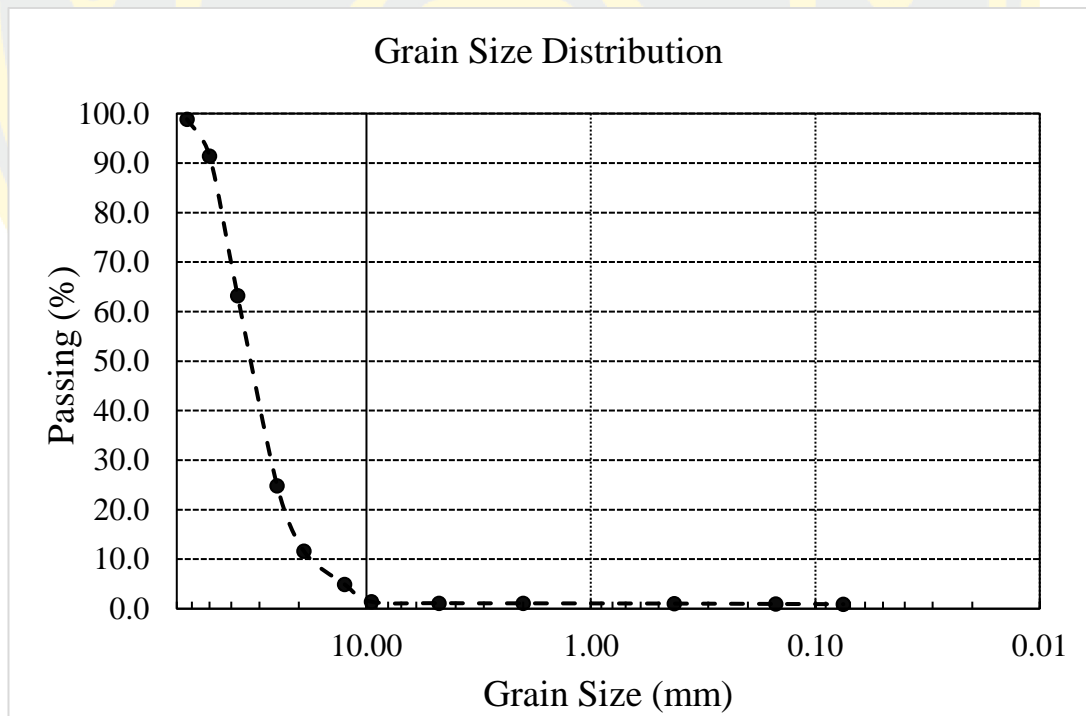
ตำแหน่งที่ 41 กม.101+542



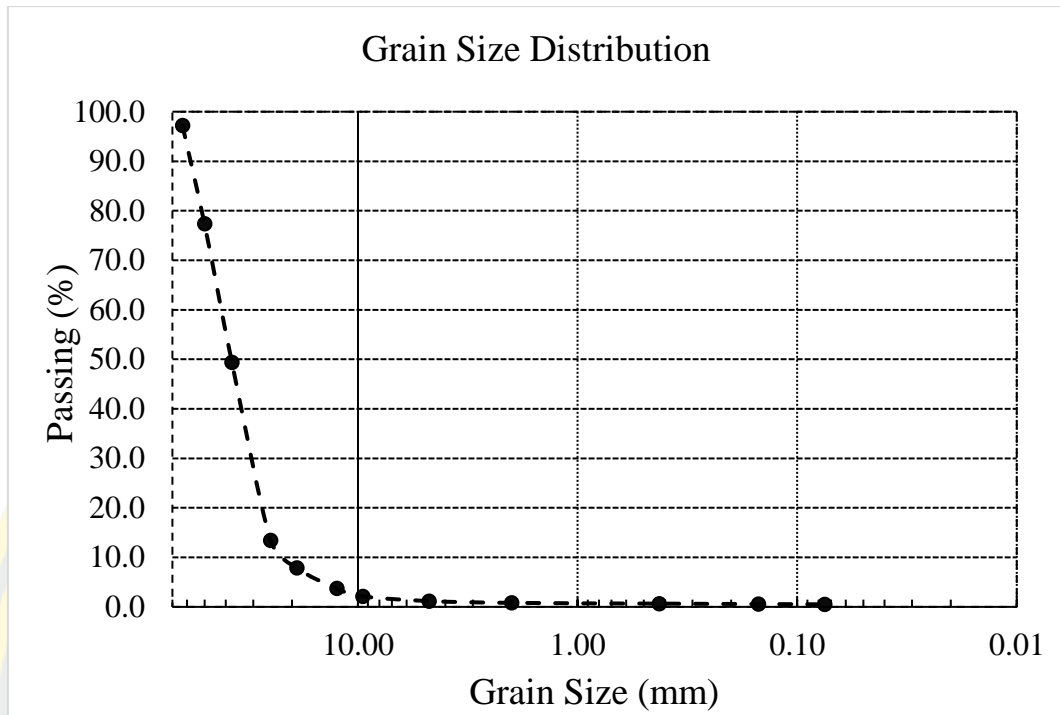
ตำแหน่งที่ 42 กม.104+335



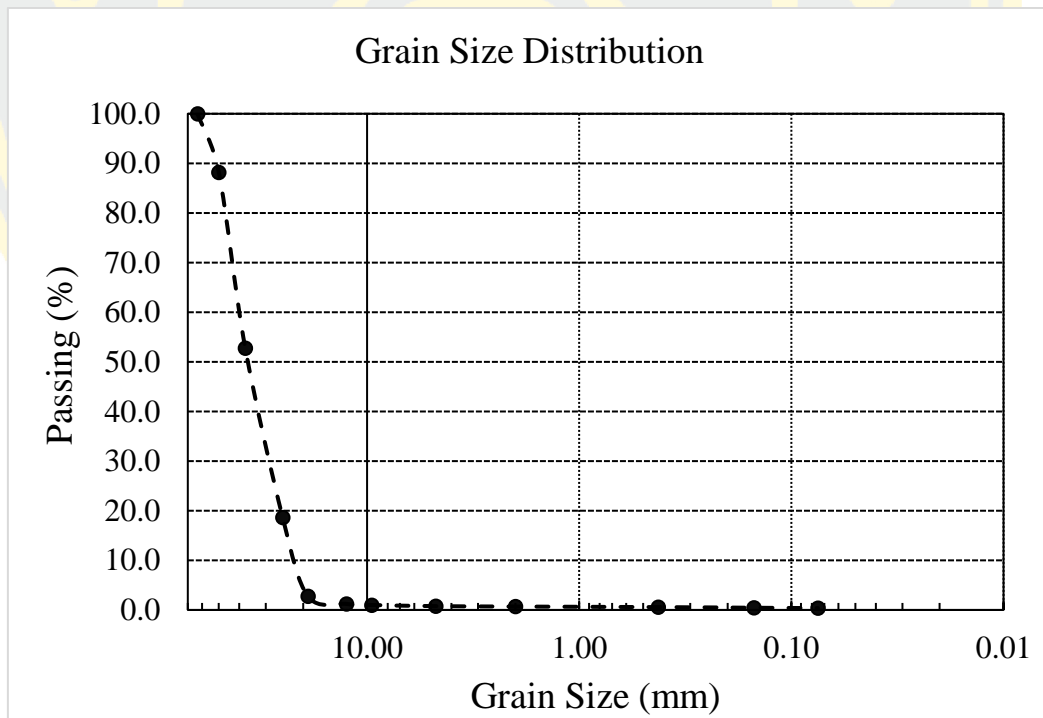
ตำแหน่งที่ 43 กม.105+435



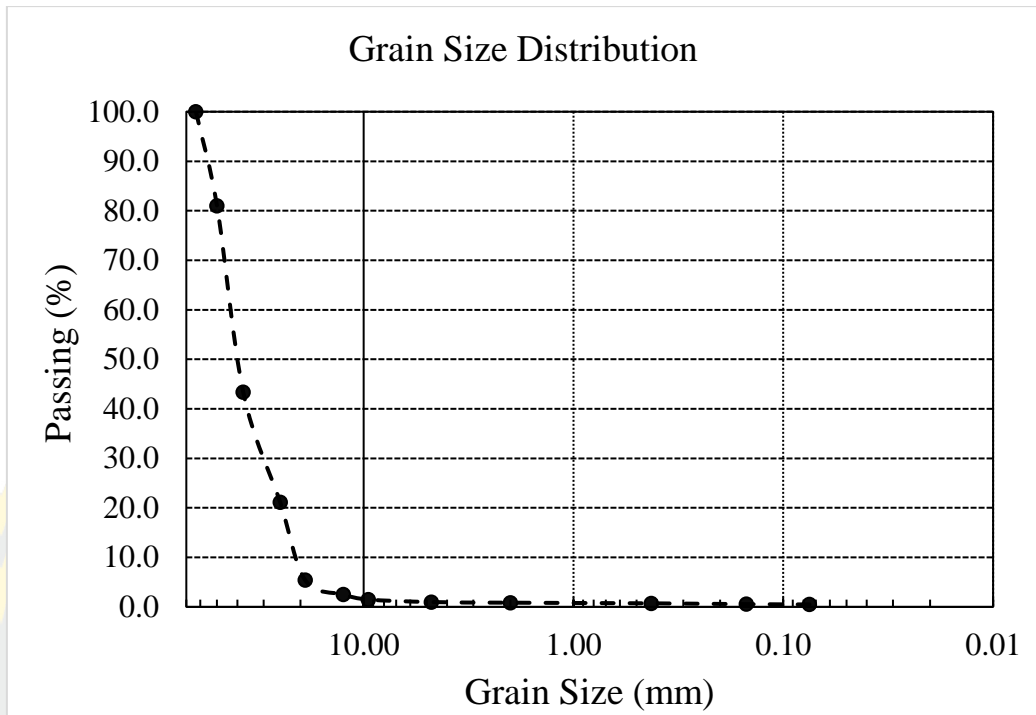
ตำแหน่งที่ 44 กม.



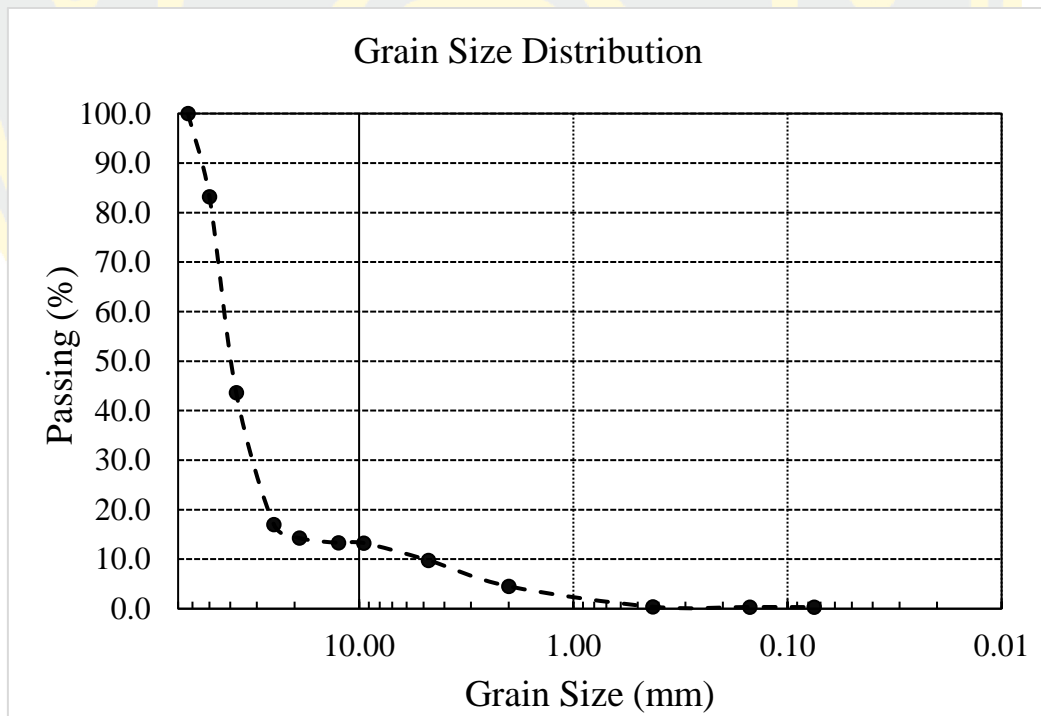
ตำแหน่งที่ 45 กม.109+335



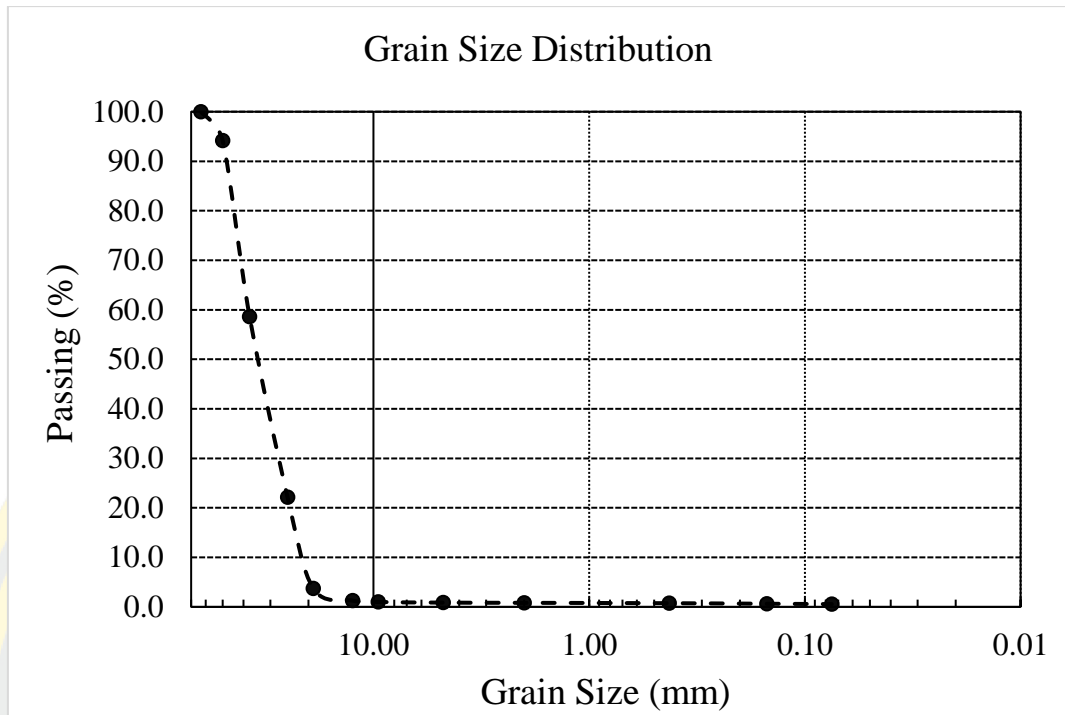
ตำแหน่งที่ 46 กม.112+535



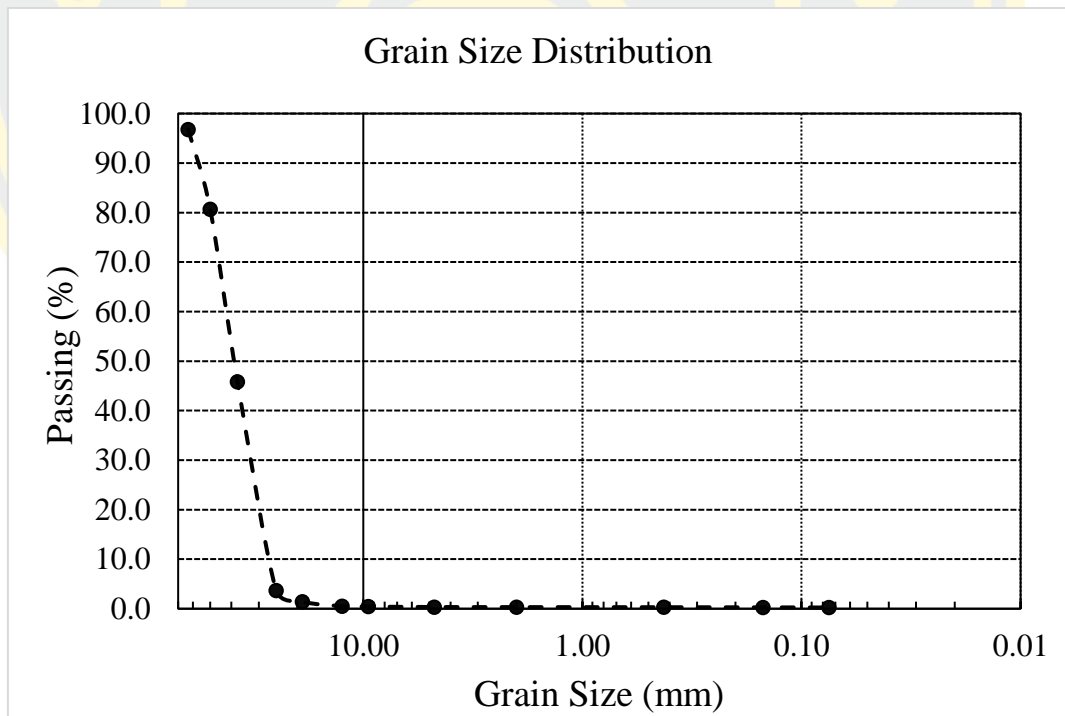
ตำแหน่งที่ 47 กม.114+535



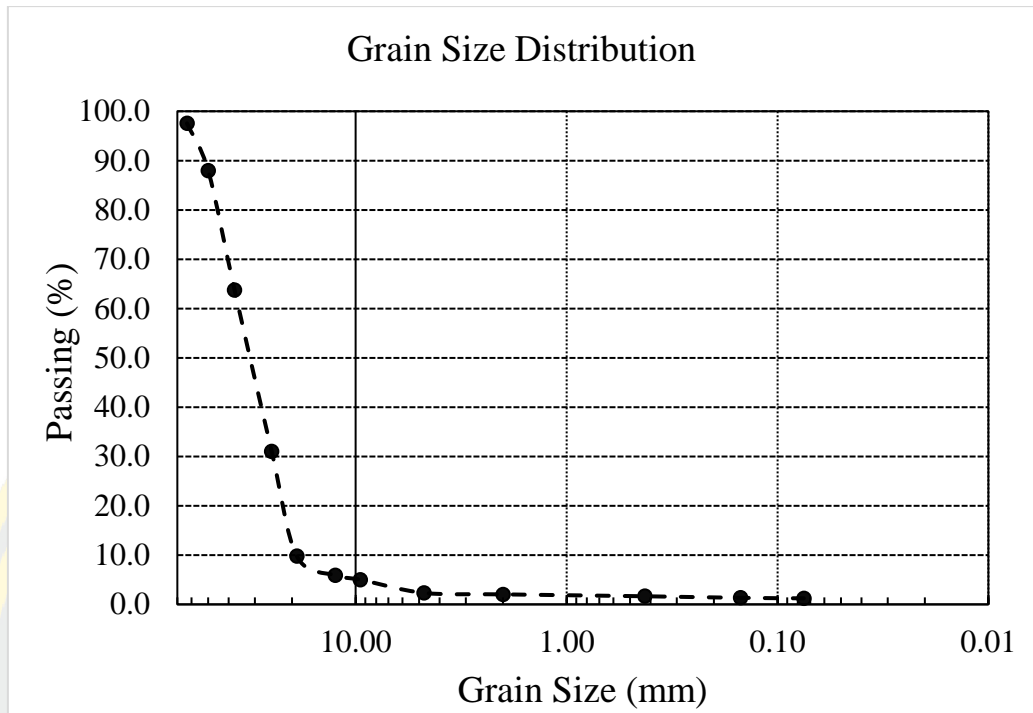
ตำแหน่งที่ 48 กม.116+535



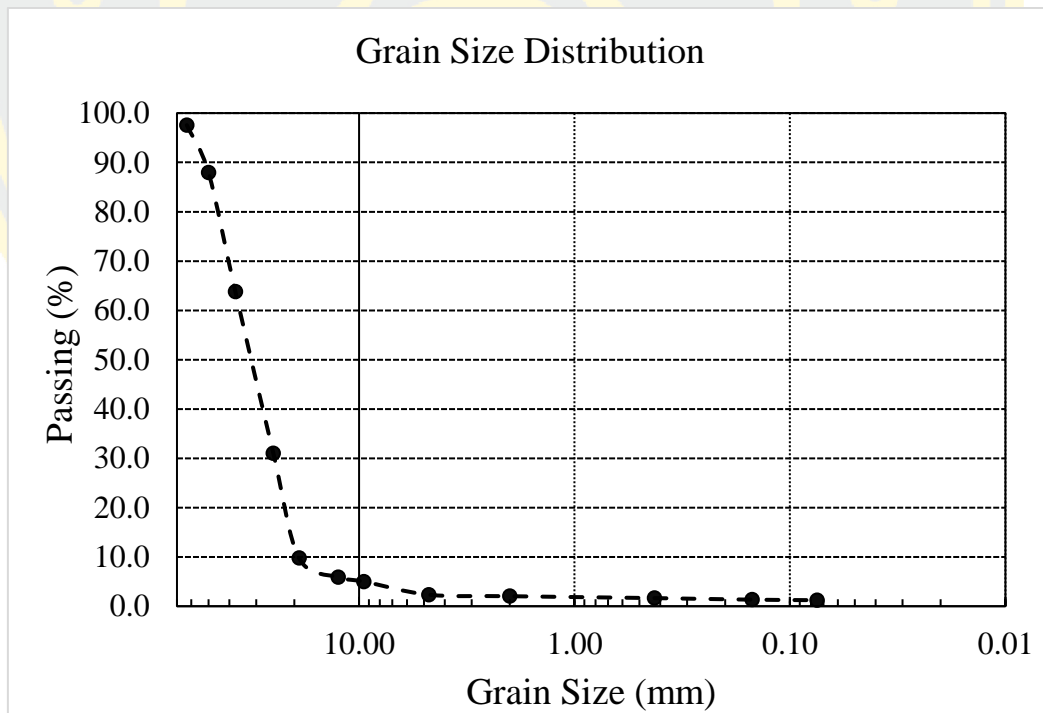
ตำแหน่งที่ 49 กม.117+935



ตำแหน่งที่ 50 กม.119+835



ตำแหน่งที่ 51 กม.121+535



ตำแหน่งที่ 2 กม.122+035



## บรรณานุกรม

- Achal, V., Mukherjee, A., & Reddy, M. S. (2011). Microbial Concrete: Way to Enhance the Durability of Building Structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(6), 730-734. doi:doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000159
- Airey, D. W., & Fahey, M. (1991). Cyclic response of calcareous soil from the North-West Shelf of Australia. *Géotechnique*, 41(1), 101-121. doi:10.1680/geot.1991.41.1.101
- Al-Qadi, I., Xie, W., & Roberts, R. (2010). Optimization of antenna configuration in multiple-frequency ground penetrating radar system for railroad substructure assessment. *NDT & E International*, 43(1), 20-28. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.08.006>
- Al-Qadi, I. L., Xie, W., & Roberts, R. (2008). Scattering analysis of ground-penetrating radar data to quantify railroad ballast contamination. *NDT & E International*, 41(6), 441-447. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.03.004>
- Alzubaidi, L., Chlaib, H. K., Fadhel, M. A., Chen, Y., Bai, J., Albahri, A. S., & Gu, Y. (2024). Reliable deep learning framework for the ground penetrating radar data to locate the horizontal variation in levee soil compaction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 129, 107627. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107627>
- Anbazhagan, P., Chandran, D., & Burman, S. (2013). Investigation of Soil Compaction Homogeneity in a Finished Building Using Ground Penetrating Radar. In *Forensic Engineering 2012* (pp. 773-782).
- Anbazhagan, P., Srinivas, S., & Chandran, D. (2012). Classification of road damage due to earthquakes. *Natural Hazards*, 60(2), 425-460. doi:10.1007/s11069-011-0025-0
- Annan, A. P. (2009). Chapter 1 - Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar. In H. M. Jol (Ed.), *Ground Penetrating Radar Theory and Applications* (pp. 1-40). Amsterdam: Elsevier.
- Association), A. A. R. E. a. M.-o.-W. (2019). Manual for railway engineering.
- ASTM D5821: Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate. (2017).

- Aursudkij, B. (2010). A laboratory study of railway ballast behaviour under traffic loading and tamping maintenance.
- Balayssac, J.-P., & Garnier, V. (2017). *Non-destructive testing and evaluation of civil engineering structures*: Elsevier.
- Benedetto, A. (2010). Water content evaluation in unsaturated soil using GPR signal analysis in the frequency domain. *Journal of Applied Geophysics*, 71(1), 26-35. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.03.001>
- Benedetto, A., Manacorda, G., Simi, A., & Tosti, F. (2012). Novel perspectives in bridges inspection using GPR. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 27(3), 239-251. doi:10.1080/10589759.2012.694883
- Benedetto, A., & Pajewski, L. (2015). Civil engineering applications of ground penetrating radar.
- Benedetto, A., Tosti, F., Bianchini Ciampoli, L., Calvi, A., Brancadoro, M. G., & Alani, A. M. (2017). Railway ballast condition assessment using ground-penetrating radar – An experimental, numerical simulation and modelling development. *Construction and Building Materials*, 140, 508-520. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.110>
- Benedetto, A., Tosti, F., Bianchini Ciampoli, L., & D'Amico, F. (2017). An overview of ground-penetrating radar signal processing techniques for road inspections. *Signal Processing*, 132, 201-209. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.05.016>
- Bianchini Ciampoli, L., Tosti, F., Economou, N., & Benedetto, F. (2019). Signal Processing of GPR Data for Road Surveys. *Geosciences*, 9(2), 96. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2076-3263/9/2/96>
- Boggs, S. (1995). Principles of sedimentology and stratigraphy. *Earth-Science Reviews*.
- Boucher, D. L., & Selig, E. T. (1987). Application of petrographic analysis to ballast performance evaluation. *Transportation Research Record*, 1131, 15-25.
- Braga, F., Gigliotti, R., Monti, G., Morelli, F., Nuti, C., Salvatore, W., & Vanzi, I. (2014). Speedup of post earthquake community recovery: the case of precast industrial buildings after the Emilia 2012 earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(5), 2405-2418. doi:10.1007/s10518-014-9583-3

- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32.  
doi:10.1023/A:1010933404324
- Buck, P. E. (1999). Ground-Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists. Lawrence B. Conyers and Dean Goodman. 1997. Altamira Press, Walnut Creek, CA. 232 pp., 58 figures, 15 color plates, 6 tables, references cited, index. \$54.00 (cloth), \$26.95 (paper). *American Antiquity*, 64(1), 183-184. doi:10.2307/2694368
- Budiono, D., McSweeney, T., Dhanasekar, M., & Gurung, N. (2004). *The effect of coal dust fouling on the cyclic behaviour of railtrack ballast*.
- Burland, J. B. (1990). On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique*, 40(3), 329-378. doi:10.1680/geot.1990.40.3.329
- Cao, Q., & Al-Qadi, I. L. (2022). Effect of Moisture Content on Calculated Dielectric Properties of Asphalt Concrete Pavements from Ground-Penetrating Radar Measurements. *Remote Sensing*, 14(1), 34. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/1/34>
- Cascante, G., Vanderkooy, J., & Chung, W. (2005). A new mathematical model for resonant-column measurements including eddy-current effects. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(1), 121-135. doi:10.1139/t04-073
- Chandra, S. (2007). *Railway engineering*: Oxford University.
- Chantasorn, N. (2016). Railway track. In *Introduction to Railway Engineering and Modernization of Thailand's Rail Transportation and Related Industries* (3rd ed., pp. 31-62). Thailand: The National Science and Technology Development Agency.
- Chapuis, R. P. (2004). Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(5), 787-795. doi:10.1139/t04-022
- Chen, L., Xing, M., He, B., Wang, J., Shang, J., Huang, X., & Xu, M. (2021). Estimating Soil Moisture Over Winter Wheat Fields During Growing Season Using Machine-Learning Methods. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 3706-3718. doi:10.1109/JSTARS.2021.3067890

- Chou, L., & Wollast, R. (1984). Study of the weathering of albite at room temperature and pressure with a fluidized bed reactor. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(11), 2205-2217. doi:[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90217-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90217-5)
- Clark, M. R., Gillespie, R., Kemp, T., McCann, D. M., & Forde, M. C. (2001). Electromagnetic properties of railway ballast. *NDT & E International*, 34(5), 305-311. doi:[https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00006-2](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00006-2)
- Clark, M. R., McCann, D. M., & Forde, M. C. (2003). Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. *NDT & E International*, 36(4), 265-275. doi:[https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00060-9)
- Clough, G. W., Sitar, N., Bachus, R. C., & Rad, N. S. (1981). Cemented Sands under Static Loading. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(6), 799-817. doi:doi:10.1061/AJGEB6.0001152
- Cohen, J. (2013). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*: routledge.
- Consoli, N. C., Rosa, F. D., & Fonini, A. (2009). Plate Load Tests on Cemented Soil Layers Overlaying Weaker Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(12), 1846-1856. doi:doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000158
- Coop, M. R., & Atkinson, J. H. (1993). The mechanics of cemented carbonate sands. *Géotechnique*, 43(1), 53-67. doi:10.1680/geot.1993.43.1.53
- Corporation), A. A. R. T. (2018). Track design guidelines.
- Cuccovillo, T., & Coop, M. R. (1999). On the mechanics of structured sands. *Géotechnique*, 49(6), 741-760. doi:10.1680/geot.1999.49.6.741
- Daniels, D. J. (2004). *Ground penetrating radar* (Vol. 1): let.
- DAVIS, J. L., & ANNAN, A. P. (1989). GROUND-PENETRATING RADAR FOR HIGH-RESOLUTION MAPPING OF SOIL AND ROCK STRATIGRAPHY. *Geophysical Prospecting*, 37(5), 531-551. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x>
- de Bold, R. (2011). Non-destructive evaluation of railway trackbed ballast.
- De Bold, R., O'Connor, G., Morrissey, J. P., & Forde, M. C. (2015). Benchmarking large scale GPR experiments on railway ballast. *Construction and Building Materials*, 92, 31-42. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.036>

de Fer, U. I. d. C. (2008). Earthworks and track bed construction for railway lines. In: Leaflet.

DEJONG, J. T., SOGA, K., KAVAZANJIAN, E., BURNS, S., VAN PAASSEN, L. A., AL QABANY, A., . . . WEAVER, T. (2013). Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges. *Géotechnique*, 63(4), 287-301. doi:10.1680/geot.SIP13.P.017

Duong, T. V., Cui, Y.-J., Tang, A. M., Dupla, J.-C., Canou, J., Calon, N., & Robinet, A. (2014). Investigating the mud pumping and interlayer creation phenomena in railway sub-structure. *Engineering Geology*, 171, 45-58. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.12.016>

Esveld, C. (1989). *Modern Railway Track*: MRT Productions.

Feldman, F., & Nissen, D. (2002). *Alternative testing method for the measurement of ballast fouling: percentage void contamination*. Paper presented at the Conference on Railway Engineering (2002: Wollongong, NSW).

Fontul, S., Paixão, A., Solla, M., & Pajewski, L. (2018). Railway Track Condition Assessment at Network Level by Frequency Domain Analysis of GPR Data. *Remote Sensing*, 10(4), 559. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/4/559>

Freund, Y., & Schapire, R. E. (1997). A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting. *Journal of Computer and System Sciences*, 55(1), 119-139. doi:<https://doi.org/10.1006/jcss.1997.1504>

Friedman, J. (2000). Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. *The Annals of Statistics*, 29. doi:10.1214/aos/1013203451

Gallagher, G. P., Leiper, Q., Williamson, R., Clark, M. R., & Forde, M. C. (1999). The application of time domain ground penetrating radar to evaluate railway track ballast. *NDT & E International*, 32(8), 463-468. doi:[https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(99\)00025-0](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(99)00025-0)

Gao, J., Yuan, D., Tong, Z., Yang, J., & Yu, D. (2020). Autonomous pavement distress detection using ground penetrating radar and region-based deep learning. *Measurement*, 164, 108077. doi:<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108077>

- Ghirian, A., & Fall, M. (2013). Coupled thermo-hydro-mechanical–chemical behaviour of cemented paste backfill in column experiments. Part I: Physical, hydraulic and thermal processes and characteristics. *Engineering Geology*, 164, 195-207.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.01.015>
- Goodman, D., & Piro, S. (2013). *GPR remote sensing in archaeology* (Vol. 9): Springer.
- Grandjean, G., Gourry, J. C., & Bitri, A. (2000). Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications: study on a test site. *Journal of Applied Geophysics*, 45(3), 141-156. doi:[https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(00\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00021-5)
- Guo, Y., Xie, J., Fan, Z., Markine, V., Connolly, D. P., & Jing, G. (2022). Railway ballast material selection and evaluation: A review. *Construction and Building Materials*, 344, 128218. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128218>
- Hugenschmidt, J. (2000). Railway track inspection using GPR. *Journal of Applied Geophysics*, 43(2), 147-155. doi:[https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00054-3](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00054-3)
- Hugenschmidt, J. (2002). Concrete bridge inspection with a mobile GPR system. *Construction and Building Materials*, 16(3), 147-154.  
doi:[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00015-6](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00015-6)
- Hugenschmidt, J., & Mastrangelo, R. (2006). GPR inspection of concrete bridges. *Cement and Concrete Composites*, 28(4), 384-392.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.02.016>
- Huisman, J. A., Hubbard, S. S., Redman, J. D., & Annan, A. P. (2003). Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Review. *Vadose Zone Journal*, 2(4), 476-491. doi:<https://doi.org/10.2136/vzj2003.4760>
- Hyslip, J. (2002). Fractal Analysis of Track Geometry Data. *Transportation Research Record*, 1785, 50-57. doi:10.3141/1785-07
- Hyslip, J., Olhoeft, G., Smith, S., & Selig, E. (2005). *Ground penetrating radar for railroad track substructure evaluation*. Retrieved from
- Hyslip, J., Smith, S., Olhoeft, G., & Selig, E. (2003). ASSESSMENT OF RAILWAY TRACK SUBSTRUCTURE CONDITION USING GROUND PENETRATING RADAR.

- Indraratna, B., Ionescu, D., & Christie, H. D. (1998). Shear Behavior of Railway Ballast Based on Large-Scale Triaxial Tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(5), 439-449. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:5(439)
- Indraratna, B., Lackenby, J., & Christie, D. (2005). Effect of confining pressure on the degradation of ballast under cyclic loading. *Géotechnique*, 55(4), 325-328. doi:10.1680/geot.2005.55.4.325
- Indraratna, B., & Nimbalkar, S. (2013). Stress-Strain Degradation Response of Railway Ballast Stabilized with Geosynthetics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(5), 684-700. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000758
- Indraratna, B., Nimbalkar, S., Christie, D., Rujikiatkamjorn, C., & Vinod, J. (2010). Field Assessment of the Performance of a Ballasted Rail Track with and without Geosynthetics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(7), 907-917. doi:doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000312
- Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., & Salim, W. (2023). *Advanced rail geotechnology—ballasted track*: CRC press.
- Indraratna, B., Thakur Pramod, K., & Vinod Jayan, S. (2010). Experimental and Numerical Study of Railway Ballast Behavior under Cyclic Loading. *International Journal of Geomechanics*, 10(4), 136-144. doi:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000055
- International, A. (2016). ASTM C535-16: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. *ASTM Standards*. doi:10.1520/C0535-16
- International, A. (2017). ASTM D5821: Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate. *ASTM Standards*. Retrieved from <https://www.astm.org/d5821-13.html>
- International, A. (2021). ASTM D4914-16: Standard test method for density of soil and rock in place by the sand replacement method in a test pit. *ASTM Standards*. Retrieved from <https://www.astm.org/d4914-16.html>
- Israelachvili, J. N. (2011). *Intermolecular and surface forces*: Academic press.

- Israr, J., & Indraratna, B. (2018). Mechanical response and pore pressure generation in granular filters subjected to uniaxial cyclic loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(12), 1756-1768. doi:10.1139/cgj-2017-0393
- Jahromi, S. H., Filardi, V., Zekavat, S. R., Wang, Z., Thurber, J., Hoffman, D., . . . Petkie, D. (2024, 16-18 Dec. 2024). *Toward Intelligent Adaptive Airborne GPR, Implementation and Data Acquisition*. Paper presented at the 2024 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE).
- Japkowicz, N., & Stephen, S. (2002). The class imbalance problem: A systematic study. *Intell. Data Anal.*, 6(5), 429-449.
- Jol, H. M. (2008). *Ground penetrating radar theory and applications*: elsevier.
- Kenney, T. C., Chahal, R., Chiu, E., Ofoegbu, G. I., Omenge, G. N., & Ume, C. A. (1985). Controlling constriction sizes of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(1), 32-43. doi:10.1139/t85-005
- Koohmishi, M., & Azarhoosh, A. (2020). Assessment of drainage and filtration of sub-ballast course considering effect of aggregate gradation and subgrade condition. *Transportation Geotechnics*, 24, 100378. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100378>
- Koohmishi, M., & Palassi, M. (2018). Effect of gradation of aggregate and size of fouling materials on hydraulic conductivity of sand-fouled railway ballast. *Construction and Building Materials*, 167, 514-523. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.040>
- Kosekt, J., Matsuo, O., & KoGa, Y. (1997). Uplift Behavior of Underground Structures Caused By Liquefaction of Surrounding Soil During Earthquake. *Soils and Foundations*, 37(1), 97-108. doi:<https://doi.org/10.3208/sandf.37.97>
- Leng, J., & Gabr, M. A. (2002). Characteristics of Geogrid-Reinforced Aggregate Under Cyclic Load. *Transportation Research Record*, 1786(1), 29-35. doi:10.3141/1786-04
- Leng, Z., & Al-Qadi, I. (2010). Railroad Ballast Evaluation Using Ground-Penetrating Radar. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2159, 110-117. doi:10.3141/2159-14

- Leng, Z., Al-Qadi, I. L., & Lahouar, S. (2011). Development and validation for in situ asphalt mixture density prediction models. *NDT & E International*, 44(4), 369-375.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.03.002>
- Lesley A. Warren, P. A. M. N. P. F. G. F. (2001). Microbially Mediated Calcium Carbonate Precipitation: Implications for Interpreting Calcite Precipitation and for Solid-Phase Capture of Inorganic Contaminants. *Geomicrobiology Journal*, 18(1), 93-115.  
doi:10.1080/01490450151079833
- Li, D., Hyslip, J., Sussmann, T., & Chrismer, S. (2015). *Railway geotechnics*: Crc Press.
- Li, D., & Selig, E. T. (1998). Method for Railroad Track Foundation Design. I: Development. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(4), 316-322. doi:doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:4(316)
- Liang, J., Liu, X., & Liao, K. (2018). Soil Moisture Retrieval Using UWB Echoes via Fuzzy Logic and Machine Learning. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(5), 3344-3352.  
doi:10.1109/JIOT.2017.2760338
- Lim, W. L. (2004). *Mechanics of railway ballast behaviour*. University of Nottingham Nottingham, UK,
- Liu, G., Tian, S., Xu, G., Zhang, C., & Cai, M. (2023). Combination of effective color information and machine learning for rapid prediction of soil water content. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(9), 2441-2457.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.12.029>
- Liu, H., Lin, C., Cui, J., Fan, L., Xie, X., & Spencer, B. F. (2020). Detection and localization of rebar in concrete by deep learning using ground penetrating radar. *Automation in Construction*, 118, 103279. doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103279>
- Liu, S., Lu, Q., Li, H., & Wang, Y. (2020). Estimation of Moisture Content in Railway Subgrade by Ground Penetrating Radar. *Remote Sensing*, 12(18), 2912. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/18/2912>
- Marone, C., Raleigh, C. B., & Scholz, C. H. (1990). Frictional behavior and constitutive modeling of simulated fault gouge. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B5), 7007-7025. doi:<https://doi.org/10.1029/JB095iB05p07007>

- Mehta, P. K., & Monteiro, P. (2006). Concrete: microstructure, properties, and materials. (No Title).
- Mitchell, J., & Soga, K. (2005). Fundamentals of soil behavior.
- Mitchell, T. M. (1997). *Machine Learning*: McGraw-Hill, Inc.
- Morse, J. W., & Arvidson, R. S. (2002). The dissolution kinetics of major sedimentary carbonate minerals. *Earth-Science Reviews*, 58(1), 51-84.  
doi:[https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00083-6](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00083-6)
- Olhoeft, G. (1987). Electrical properties from 10<sup>-3</sup> to 10<sup>+9</sup> HZ--Physics and chemistry. *Proc. Phys. Chem. Porous Media*, 2. doi:10.1063/1.36399
- Olhoeft, G. (1998). *Electrical, magnetic, and geometric properties that determine ground penetrating radar performance*.
- Parks, G. A. (1965). The isoelectric points of solid oxides, solid hydroxides, and aqueous hydroxo complex systems. *Chemical Reviews*, 65(2), 177-198.
- Pathirana, S., Lambot, S., Krishnapillai, M., Smeaton, C., Cheema, M., & Galagedara, L. (2024). Integrated ground-penetrating radar and electromagnetic induction techniques for characterizing boreal podzolic soil in western Newfoundland. *Canadian Journal of Soil Science*, 104(4), 509-513. doi:10.1139/cjss-2024-0027
- Persico, R., & Leucci, G. (2016). Interference Mitigation Achieved with a Reconfigurable Stepped Frequency GPR System. *Remote Sensing*, 8(11), 926. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/11/926>
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., & Siever, R. (2012). *Sand and Sandstone*: Springer New York.
- Pholkainuwatra, P., Eua-apiwatch, S., & Yimsiri, S. (2023). SELECTION OF RAILWAY BALLAST BASED ON CEMENTING POTENTIAL: A CASE STUDY IN THAILAND. *GEOMATE Journal*, 25(107), 183-190. Retrieved from <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/3911>
- Plati, C., Georgiou, P., & Loizos, A. (2016). A comprehensive approach for the assessment of HMA compactability using GPR technique. *Near Surface Geophysics*, 14(2), 117-126. doi:<https://doi.org/10.3997/1873-0604.2015043>

- Plati, C., & Loizos, A. (2013). Estimation of in-situ density and moisture content in HMA pavements based on GPR trace reflection amplitude using different frequencies. *Journal of Applied Geophysics*, 97, 3-10.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.04.007>
- Plummer, L. N., & Busenberg, E. (1982). The solubilities of calcite, aragonite and vaterite in CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O solutions between 0 and 90°C, and an evaluation of the aqueous model for the system CaCO<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(6), 1011-1040. doi:[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(82\)90056-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(82)90056-4)
- Profillidis, V. A. (1995). *Railway Engineering*: Avebury Technical.
- Qiao, X., Yang, F., & Xu, X. (2014, 30 June-4 July 2014). *The prediction method of soil moisture content based on multiple regression and RBF neural network*. Paper presented at the Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar.
- Raymond, G. P. (2002). Reinforced ballast behaviour subjected to repeated load. *Geotextiles and Geomembranes*, 20(1), 39-61. doi:[https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(01\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(01)00024-3)
- Raymond, G. P., & Dyaljee, V. A. (1979). Railroad Ballast Load Ranking Classification. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 105(10), 1133-1153.  
doi:doi:10.1061/AJGEB6.0000863
- Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*: John Wiley & Sons.
- Roberts, R., Rudy, J., Al-Qadi, I., Tutumluer, E., & Boyle, J. (2006). *Railroad ballast fouling detection using ground penetrating radar—a new approach based on scattering from voids*. Paper presented at the Ninth European Conference on NDT.
- Rocco, C., Guinea, G. V., Planas, J., & Elices, M. (2001). Review of the splitting-test standards from a fracture mechanics point of view. *Cement and Concrete Research*, 31(1), 73-82. doi:[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00425-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00425-7)

- Sadeghi, J., Zakeri, J., & Motieyan Najar, M. (2016). Developing Track Ballast Characteristic Guideline In Order To Evaluate Its Performance. *International Journal of Railway*, 9, 27-35. doi:10.7782/IJR.2016.9.2.027
- Schnaid, F., Lchane, B. M., & Fahey, M. (2004). In-situ test characteristics of unusual geomaterials. *Geotechnical & Geophysical Site Characterization*, 1, 49-73.
- Selig, E. T., & Waters, J. M. (1994). *Track Geotechnology and Substructure Management*: Emerald Publishing Limited.
- Shao, W., Bouzardoum, A., Phung, S. L., Su, L., Indraratna, B., & Rujikiatkamjorn, C. (2011). Automatic Classification of Ground-Penetrating-Radar Signals for Railway-Ballast Assessment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(10), 3961-3972. doi:10.1109/TGRS.2011.2128328
- Sheriff, R. E., & Geldart, L. P. (1995). *Exploration Seismology* (2 ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Shihab, S., Al-Nuaimy, W., & Eriksen, A. (2004, 21-24 June 2004). *Radius estimation for subsurface cylindrical objects detected by ground penetrating radar*. Paper presented at the Proceedings of the Tenth International Conference on Grounds Penetrating Radar, 2004. GPR 2004.
- Soldovieri, F., Hugenschmidt, J., Persico, R., & Leone, G. (2007). A linear inverse scattering algorithm for realistic GPR applications. *Near Surface Geophysics*, 5. doi:10.3997/1873-0604.2006016
- Sposito, G. (2008). *The Chemistry of Soils*: Oxford University Press, USA.
- Standard test method for density of soil and rock in place by the sand replacement method in a test pit. (2021). *ASTM D4914-16*.
- Stocks-Fischer, S., Galinat, J. K., & Bang, S. S. (1999). Microbiological precipitation of CaCO<sub>3</sub>. *Soil biology and biochemistry*, 31(11), 1563-1571.
- Sussmann, T. R., Ruel, M., & Chrismer, S. M. (2012). Source of Ballast Fouling and Influence Considerations for Condition Assessment Criteria. *Transportation Research Record*, 2289(1), 87-94. doi:10.3141/2289-12

- Sussmann, T. R., Selig, E. T., & Hyslip, J. P. (2003). Railway track condition indicators from ground penetrating radar. *NDT & E International*, 36(3), 157-167.  
doi:[https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00054-3](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00054-3)
- Tatsuoka, F., Jardine, R., Presti, D. L., Benedetto, H. D., & Kodaka, T. (1999). *Characterising the pre-failure deformation properties of geomaterials*. Paper presented at the Fourteenth international conference on soil mechanics and foundation engineering. proceedings international society for soil mechanics and foundation engineering.
- Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3), 574-582. doi:<https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>
- Tucker, M. E. (2001). *Sedimentary Petrology: An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks*: Wiley.
- Tutumluer, E., Qian, Y., Hashash, Y., Ghaboussi, J., & Davis, D. (2013). Discrete Element Modeling of Ballasted Track Deformation Behavior. *International Journal of Rail Transportation*, 1, 57-73. doi:10.1080/23248378.2013.788361
- Urban, T. M., & Jacob, R. W. (2015). [Ground-Penetrating Radar for Archaeology: Third Edition. In the series: Geophysical Methods for Archaeology, Vol. 4, LAWRENCE B. CONYERS, Kenneth L. Kvamme]. *Journal of Field Archaeology*, 40(2), 256-258.  
Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/24408779>
- Uthayakumar, A., Mohan, M. P., Khoo, E. H., Jimeno, J., Siyal, M. Y., & Karim, M. F. (2022). Machine Learning Models for Enhanced Estimation of Soil Moisture Using Wideband Radar Sensor. *Sensors*, 22(15), 5810. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/15/5810>
- Utsi, & E, C. (2017). C. (2017).
- Utsi, E. C. (2017). *Ground Penetrating Radar: Theory and Practice*: Elsevier Science.
- Vahidi, M., Shafian, S., & Frame, W. H. (2025). Multi-Modal sensing for soil moisture mapping: Integrating drone-based ground penetrating radar and RGB-thermal

- imaging with deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 236, 110423.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110423>
- Van Dam, R. L. (2014). Calibration Functions for Estimating Soil Moisture from GPR Dielectric Constant Measurements. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(3), 392-413. doi:10.1080/00103624.2013.854805
- vaughan, P., & Leroueil, S. (1991). Discussion: The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Géotechnique*, 41, 281-284.  
doi:10.1680/geot.1991.41.2.281
- Wang, P., Hu, Z., Zhao, Y., & Li, X. (2016). Experimental study of soil compaction effects on GPR signals. *Journal of Applied Geophysics*, 126, 128-137.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.01.019>
- Warren, C., Giannopoulos, A., Gray, A., Giannakis, I., Patterson, A., Wetter, L., & Hamrah, A. (2019). A CUDA-based GPU engine for gprMax: Open source FDTD electromagnetic simulation software. *Computer Physics Communications*, 237, 208-218. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cpc.2018.11.007>
- Xie, X., Qin, H., Yu, C., & Liu, L. (2013). An automatic recognition algorithm for GPR images of RC structure voids. *Journal of Applied Geophysics*, 99, 125-134.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.02.016>
- Zhang, S., Gao, F., He, X., Chen, Q., & Sheng, D. (2021). Experimental study of particle migration under cyclic loading: effects of load frequency and load magnitude. *Acta Geotechnica*, 16(2), 367-380. doi:10.1007/s11440-020-01137-x
- Zhao, S., & Al-Qadi, I. L. (2019). Algorithm development for real-time thin asphalt concrete overlay compaction monitoring using ground-penetrating radar. *NDT & E International*, 104, 114-123. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.04.008>
- Zheng, S.-F., Liu, Y., Zhang, N., Li, X., & Gao, L. (2022). Experimental studies on shape and size effects on particle breakage of railway ballast. *Transportation Geotechnics*, 37, 100883. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100883>



## ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายพิษณุ พลกายนุวัตร
วัน เดือน ปี เกิด	27 กรกฎาคม 2523
สถานที่เกิด	จังหวัดพิษณุโลก
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค) จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย

