

การวิเคราะห์และออกแบบพัฒนาหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได
เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการรองรับแรงกระทำด้านข้างบนทางรถไฟ

The Analysis and Design to Increase Load Capability of
Lateral Forces in Ladder Sleeper Track

โดย

นาย กมนทัต

บุญสัจจามันท์

นาย ธนภัทร

ศรีภัทราพันธ์

นาย ธนัท

ชื่นฉ่ำ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE ANALYSIS AND DESIGN TO INCREASE LOAD CAPABILITY OF
LATERAL FORCES IN LADDER SLEEPER TRACK

MR. KAMONTAT BOONSAJJANANT

MR. TANAPHAT SRIPATARAPAN

MR. TANAT CHUENCHAM

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การวิเคราะห์และออกแบบพัฒนาหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได
เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการรองรับแรงกระทำด้านข้างบนทางรถไฟ
THE ANALYSIS AND DESIGN TO INCREASE LOAD CAPABILITY OF
LATERAL FORCES IN LADDER SLEEPER TRACK

นักศึกษา นายกมนทัต บุญสังจรรย์ รหัสนักศึกษา 62010011
นายธนภัทร ศรีภัทรพันธุ์ รหัสนักศึกษา 62010364
นายธนัท ชื่นฉ่ำ รหัสนักศึกษา 62010380

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา	
ดร.ทรงศักดิ์ สุธาสุประดิษฐ์	
ดร.ภาณุมาศ ไทรงาม	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(รศ.ดร.ชลิตา อุตะเถา)

ประธานสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ	การวิเคราะห์และออกแบบพัฒนาหมอนคอนกรีตแบบขั้นบันได เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการรองรับแรงกระทำด้านข้างบนทางรถไฟ		
คณะผู้จัดทำ	นาย กมนทัต	บุญสัจจามันท์	62010011
	นาย ธนภัทร	ศรีภัทราพันธุ์	62010364
	นาย ธนัท	ชินฉ่ำ	62010380
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา		
ปีการศึกษา	2565		

บทคัดย่อ

เนื่องจากปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้หมอนคอนกรีตอยู่ 2 ชนิด นั่นคือ หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว (Monoblock sleeper) และ หมอนคอนกรีตแบบแบ่งคู่ (Twin-block sleeper) แต่จากการสืบค้นข้อมูลยังไม่พบการนำหมอนคอนกรีตแบบขั้นบันได (Ladder sleeper) มาใช้กับโครงสร้างทางรถไฟในประเทศไทย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงได้จัดทำการศึกษาวิเคราะห์และออกแบบพัฒนาหมอนคอนกรีตแบบขั้นบันได เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการรองรับแรงกระทำด้านข้างบนทางรถไฟ อีกทั้งยังมุ่งเน้นให้หมอนคอนกรีตแบบขั้นบันไดสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับขนาดรางในประเทศไทยที่เป็นแบบมีเตอร์เกจหรือรางขนาด 1 เมตร ได้อย่างปลอดภัย

การวิเคราะห์แรงกระทำทางด้านข้างบนทางรถไฟ จะทำการวิเคราะห์ความเค้นทางด้านข้างที่เกิดขึ้นบนหมอนคอนกรีตรองรางรถไฟ ทำการวิเคราะห์ทั้งขณะที่ไม่มีภาระยกโค้ง และที่ระดับยกโค้ง 90 มิลลิเมตร ขณะ $L/V = 0.2$ 0.4 และ 0.8 โดยทำการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่มีชื่อว่า Abaqus และการวิเคราะห์นี้เป็นการวิเคราะห์ระหว่าง หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยวกับหมอนคอนกรีตแบบขั้นบันได

คำสำคัญ : หมอนคอนกรีตแบบขั้นบันได / แรงกระทำทางด้านข้าง / Abaqus

Title : The Analysis and Design to Increase Load Capability of Lateral Forces in Ladder Sleeper Track

Name : Kamontat Boonsajjanant
Tanaphat Sriphatarapan
Tanat Chuencham

Advisor : Assistant Professor Rattapoohm Parichatprecha, D. Eng.

Academic year : 2022

Abstract

At the present, there are 2 types of concrete sleepers in Thailand, there are monoblock sleeper and twin-block sleeper, and there is still no use of ladder sleeper in railway structure in Thailand before. The researcher therefore conducted the analysis, design and development of ladder sleeper to increase the performance to support the lateral force on the railway, and also focus on making ladder sleeper to be able to apply to the size of rails in Thailand which are meter gauges.

The lateral stress that occur on the concrete are analyzed at cant of 0 mm, 90 mm where $L/V = 0.2$ 0.4 and 0.8 by using a finite element program Abaqus. This analysis is an analysis between monoblock sleeper and ladder sleeper.

Keywords : Ladder sleeper / Lateral force / Abaqus

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐภูมิ ปรีชาติปรีชา อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษา ตลอดจนให้คำแนะนำแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เป็นผลให้โครงการวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ คณะผู้จัดทำโครงการวิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบโครงการวิจัย และให้ความอนุเคราะห์ประเมินรับรองโครงการวิจัยนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้สั่งสอนวิชา และให้ความรู้ จนคณะผู้จัดทำสามารถนำเอาองค์ความรู้มาประยุกต์ใช้ในโครงการวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษา คอยถามไถ่สารทุกข์สุกดิบและให้การสนับสนุนมาโดยตลอด

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบพระคุณ บิดา มารดา ผู้เป็นที่รักและเคารพเป็นอย่างยิ่งของผู้วิจัยที่ ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา

ผู้วิจัยหวังว่า งานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อยคุณค่า จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ ให้แก่เหล่าคณาจารย์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาจนทำให้ผลงานวิจัยนี้เป็นประโยชน์ต่อผู้เกี่ยวข้อง และขอมอบความกตัญญูทเวทิตาคุณ แต่บิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่เป็นส่วนหนึ่งในการทำให้โครงการวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี

กมนทัต บุญสัจจามันท์

ธนภัทร ศรีภัทราพันธ์

ธันท์ ชื่นฉ่ำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	ก
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาและที่มา.....	1
1.2 สมมติฐานในการแก้ปัญหา.....	1
1.3 จุดเด่นของงานวิจัย.....	2
1.4 วัตถุประสงค์.....	2
1.5 ขอบเขตการดำเนินงาน.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ส่วนประกอบและโครงสร้างทางรถไฟ.....	3
2.2 การยกโค้งรถไฟ.....	6
2.3 องค์ประกอบของแรงกระทำในโครงสร้างทางรถไฟ.....	9
2.4 อัตราส่วนแรงกระทำทางด้านข้างต่อแรงกระทำในแนวตั้ง	10
2.5 ชนิดของแรงกระทำในโครงสร้างทางรถไฟ.....	10
2.6 หน่วยแรงที่ยอมให้ของหมอนคอนกรีต	11
2.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method).....	11
2.8 ค่า Von Mises Stress	11
2.9 โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ	12
2.10 ทบทวนวรรณกรรม.....	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	22
3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล	23
3.2 แนวคิดการออกแบบหมอนคอนกรีตแบบขั้นบันได	23
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	24
3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม (Validation)	25
3.5 การสร้างแบบจำลองโครงสร้างรางรถไฟในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Abaqus.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล.....	38
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	39
4.1 การตรวจสอบการปรับปรุงเครือข่ายเอลิเมนต์ (Mesh convergence)	39
4.2 ผลการวิจัย	41
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	55
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	57
บรรณานุกรม.....	58
ภาคผนวก.....	60
ประวัติผู้เขียน.....	65



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงระยะการยกโค้งเมื่อเทียบกับรัศมีโค้งและความเร็ว.....	8
ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลทางรถไฟระหว่างโครงสร้างทางเก่า และโครงสร้างทางใหม่ที่กม.36 (สายใต้).....	21
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได	28
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว.....	29
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของรางรถไฟ และล้อรถไฟ.....	29
ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของหินโรยทาง	30
ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว และหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดทั้งขณะไม่ได้ยกโค้งและมีระยะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วน L/V ต่าง ๆ	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปตัดทางยาวของทางรถไฟ และหมอนคอนกรีต.....	3
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของราง.....	3
รูปที่ 2.3 หน้าตัดราง 54E1 และ 60E1	4
รูปที่ 2.4 ขนาดหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว.....	5
รูปที่ 2.5 หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได	5
รูปที่ 2.6 รางรถไฟเมื่อประกอบกับหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได	5
รูปที่ 2.7 Settlement standard deviation.....	12
รูปที่ 2.8 ลักษณะการเสีรูรูปโดยเฉลี่ยจากการทดสอบผ่านโปรแกรมจำนวนหลายครั้ง.....	13
รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่รับได้ก่อนเกิดการเสีรูรูปกับความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของระบบราง	14
รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านแรงกระทำทางด้านข้างกับการเสีรูรูปของระบบราง เมื่อความกว้างของไหล่ทางมีการเปลี่ยนแปลง	15
รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านแรงกระทำทางด้านข้างกับการเสีรูรูปของระบบราง เมื่อความสูงของหินโรยทางระหว่างหมอนคอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลง	15
รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับการสั่นสะเทือนกับความเร็วของรถไฟ เมื่อค่าความเร็วคลื่นเฉือนในดินมีการเปลี่ยนแปลง.....	16
รูปที่ 2.13 แรงดันที่เกิดขึ้นที่ระนาบด้านล่างของตัวหมอนคอนกรีต (a) หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได (b) หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว.....	17
รูปที่ 2.14 แรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างล้อและราง จากน้ำหนักรถไฟ	18
รูปที่ 2.15 ความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างล้อกับราง	19
รูปที่ 3.1 แผนผังวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	22
รูปที่ 3.2 รูปหน้าตัดของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได.....	24
รูปที่ 3.3 รูปแบบจำลองสามมิติของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได.....	24
รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Von Mises Stress กับความหนาของแผ่นรองคอนกรีต.....	25
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Part.....	26
รูปที่ 3.6 ชิ้นส่วนในแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได	27
รูปที่ 3.7 ชิ้นส่วนในแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว.....	27
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Cerate Material	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Section	28
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Assign Section	28
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Instance สำหรับโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได.....	30
รูปที่ 3.12 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Instance สำหรับโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว	30
รูปที่ 3.13 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Step	31
รูปที่ 3.14 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Field Output.....	31
รูปที่ 3.15 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create History Output.....	32
รูปที่ 3.16 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Interaction Property สำหรับแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว	32
รูปที่ 3.17 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Interaction Property สำหรับแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได.....	33
รูปที่ 3.18 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Interaction สำหรับจำลองปฏิสัมพันธ์ ระหว่างล้อรถไฟกับรางรถไฟ.....	33
รูปที่ 3.19 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Constraint สำหรับจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างผิวด้านใต้หมอนคอนกรีตกับผิวด้านบนของหินโรยทาง	34
รูปที่ 3.20 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Constraint สำหรับจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างผิวด้านใต้ ของรางรถไฟกับผิวด้านบนของหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว.....	34
รูปที่ 3.21 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Interaction สำหรับจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างผิวด้านใต้ ของรางรถไฟกับผิวด้านบนของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได	35
รูปที่ 3.22 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Constraint สำหรับจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างท่อเหล็ก เชื่อมระหว่างหมอนคอนกรีตกับหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได.....	35
รูปที่ 3.23 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Load.....	36
รูปที่ 3.24 ตัวอย่างการใช้คำสั่ง Create Boundary Condition สำหรับจำลองส่วนรองรับแบบชนิดหมุน.....	37
รูปที่ 3.25 ตัวอย่างการใช้คำสั่ง Create Boundary Condition สำหรับจำลองการเคลื่อนที่ของล้อรถไฟ.....	37
รูปที่ 3.26 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Seed Part Instance และ Mesh Part	38
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Von Mises Stress กับจำนวนเอลิเมนต์.....	40
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับจำนวนเอลิเมนต์	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Von Mises Stress กับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะไม่มีการยกโค้ง).....	41
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Von Mises Stress กับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.2$)	41
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Von Mises Stress กับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.4$)	42
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Von Mises Stress กับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.8$)	42
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้างกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะไม่มีการยกโค้ง).....	43
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้างกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.2$)	43
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้างกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.4$)	44
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้างกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.8$)	44
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้างกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะไม่มีการยกโค้ง).....	45
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้างกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.2$)	45
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้างกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.4$)	46
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้างกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.8$)	46
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้งกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะไม่มีการยกโค้ง).....	47
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้งกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.2$)	47
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้งกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.4$)	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้งกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.8$)	48
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดในแนวตั้งกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะไม่มีการยกโค้ง).....	49
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดในแนวตั้งกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.2$)	49
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดในแนวตั้งกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.4$)	50
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดในแนวตั้งกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.8$)	50
รูปที่ 4.23 แผนภูมิเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress สูงสุดระหว่างหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดเปรียบเทียบกับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดียว	51
รูปที่ 4.24 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้างสูงสุดระหว่างหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดเปรียบเทียบกับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดียว	51
รูปที่ 4.25 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้างสูงสุดระหว่างหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดเปรียบเทียบกับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดียว	52
รูปที่ 4.26 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้งสูงสุดระหว่างหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดเปรียบเทียบกับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดียว	53
รูปที่ 4.27 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าความเค้นแรงอัดในแนวตั้งสูงสุดระหว่างหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดเปรียบเทียบกับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดียว	53
รูปที่ ก-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ กับตำแหน่งของความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณใต้ราง (ขณะที่ไม่มีการยกโค้ง).....	61
รูปที่ ก-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ กับตำแหน่งของความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณใต้ราง (ขณะที่มีการยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.2$).....	62
รูปที่ ก-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ กับตำแหน่งของความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณใต้ราง (ขณะที่มีการยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.4$).....	63
รูปที่ ก-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ กับตำแหน่งของความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณใต้ราง (ขณะที่มีการยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.8$).....	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาและที่มา

การขนส่งทางรถไฟ เป็นระบบการขนส่งที่ประสิทธิภาพมากระบบหนึ่ง ทั้งในด้านความปลอดภัย ความปลอดภัย และปริมาณการขนส่งที่สามารถขนส่งได้จำนวนมากในแต่ละครั้ง องค์ประกอบที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งในระบบการขนส่งนี้คือ “หมอนคอนกรีตรองรางรถไฟ” ซึ่งมีหน้าที่รองรับน้ำหนักของล้อรถไฟที่กระทำกับราง อีกทั้งยังเป็นตัวกำหนดน้ำหนักบรรทุก ความเร็วของขบวนรถ และความปลอดภัยของผู้ใช้บริการขณะรถไฟทำการให้บริการ

จากการสืบค้นข้อมูล หมอนคอนกรีตรองรางรถไฟในประเทศไทยในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว (Monoblock sleeper) และ หมอนคอนกรีตแบบแท่งคู่ (Twin-block sleeper) โดยจากการศึกษาและค้นคว้าข้อมูลจากงานวิจัยในต่างประเทศ หมอนคอนกรีตรองรางทั้ง 2 ชนิดยังคงมีข้อจำกัดที่สามารถพัฒนาปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ทั้งความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างที่ยังรับได้ไม่ดีพอ และมีการสั่นของรางและเสียงรบกวนที่มาก คณะผู้จัดทำจึงได้ศึกษาหมอนคอนกรีตแบบใหม่ที่ได้มีการใช้งานในต่างประเทศกันอย่างแพร่หลาย เรียกว่า หมอนรองรางคอนกรีตแบบขั้นบันได (Ladder sleeper) เพื่อนำมาเป็นแนวทางการปรับปรุงและพัฒนาหมอนคอนกรีตแบบขั้นบันไดมาใช้กับรางรถไฟในประเทศไทย

1.2 สมมติฐานในการแก้ปัญหา

หากรูปแบบของหมอนรองรางแบบคอนกรีตและองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น ความกว้างของวัสดุที่อยู่นอกปลายของหมอนรองรางรถไฟได้ขึ้นหินโรยทาง ความสูงของวัสดุที่อยู่ระหว่างหมอนรองรางรถไฟ และตัวยึดราง เป็นต้น มีผลต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้าง ดังนั้นการเลือกใช้หมอนรองรางคอนกรีตแบบขั้นบันได และการออกแบบพารามิเตอร์ (Parameter) ต่าง ๆ ให้ใช้งานได้ดีกับระบบรางในประเทศไทย จะทำให้หมอนรองรางคอนกรีตแบบขั้นบันไดสามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างได้ดีกว่าหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยวที่ปัจจุบันในประเทศไทยยังมีการใช้งานอยู่

1.3 จุดเด่นของงานวิจัย

1. เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได ที่ยังไม่เคยมีการนำมาใช้ในประเทศไทย
2. เป็นแนวทางการพัฒนาหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได มาปรับใช้กับรางรถไฟในประเทศไทย
3. ชี้ให้เห็นถึงข้อบกพร่องของหมอนรองรางแบบคอนกรีตที่ในปัจจุบันประเทศไทยยังมีการใช้งานอยู่

1.4 วัตถุประสงค์

มุ่งเน้นวิเคราะห์และออกแบบหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได และองค์ประกอบต่าง ๆ ของโครงสร้างทางรถไฟเพื่อเพิ่มสมรรถนะในการรองรับแรงกระทำด้านข้างของโครงสร้างทางรถไฟ พร้อมนำมาเป็นแนวทางการปรับปรุง และพัฒนาโครงสร้างทางรถไฟในประเทศไทย

1.5 ขอบเขตการดำเนินงาน

1. การศึกษาครั้งนี้มุ่งศึกษาเฉพาะไปที่รางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดที่มีหินโรยทาง
2. ผู้วิจัยได้มุ่งศึกษาไปที่หมอนคอนกรีตอัดแรงชนิดหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได
3. ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความกว้างของรางรถไฟ แรงกระทำทางด้านข้าง น้ำหนักของล้อรถไฟ ที่กระทำกับราง ขนาดของหมอนคอนกรีต หินโรยทาง รางรถไฟ โดยใช้โปรแกรม Abaqus ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์แรงกระทำทางด้านข้าง

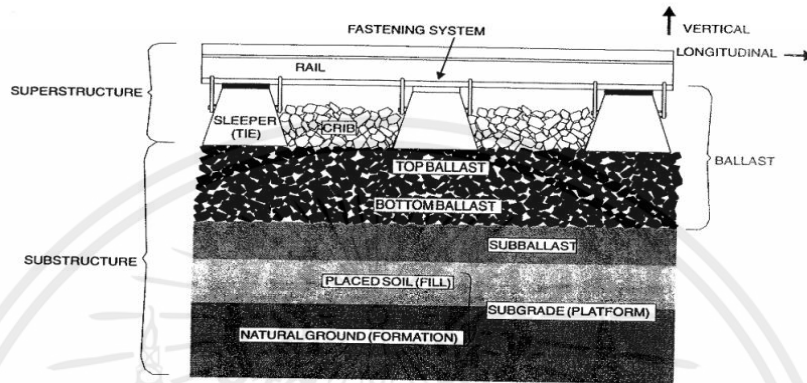
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดที่ยังไม่มีการใช้งานในประเทศไทยมาใช้งาน เพื่อหวังที่จะเพิ่มสมรรถนะในการรองรับแรงกระทำทางด้านข้างบนรางรถไฟ พร้อมทั้งลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับตัวราง และช่วยลดความถี่ในการซ่อมบำรุงรักษาโครงสร้างรางรถไฟ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ส่วนประกอบและโครงสร้างทางรถไฟ

ส่วนประกอบของโครงสร้างทางรถไฟได้แสดงในรูปที่ 2.1 โดยแต่ละส่วนอธิบายได้ ดังนี้



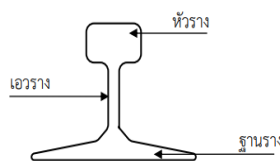
รูปที่ 2.1 รูปตัดทางยาวของทางรถไฟ และหมอนคอนกรีต

2.1.1 รางรถไฟ (Rail)

รางรถไฟ คือ ชิ้นส่วนเหล็กตามแนวยาว เป็นตัวนำทางของล้อรถไฟเพื่อให้มีความราบเรียบและต่อเนื่อง ชิ้นส่วนเหล่านี้ทำหน้าที่เหมือนกับคานเพื่อทำการถ่ายน้ำหนักจากล้อลงไปสู่หมอนเพื่อไม่ให้เกิดการแอ่นตัวมากเกินไประหว่างจุดรองรับ ขนาดความกว้างรางรถไฟ (Rail gauge หรือ Track gauge) คือ ระยะห่างของรางรถไฟโดยวัดจากหัวรางด้านในข้างซ้ายถึงหัวรางด้านในข้างขวา สแตนดาร์ดเกจ (Standard gauge) เป็นชื่อของขนาดความกว้างรางที่นิยมใช้มากที่สุดทั่วโลก มีขนาด 1.435 เมตร แต่ในประเทศไทย รางรถไฟส่วนใหญ่มีขนาดความกว้าง 1.000 เมตร เรียกว่า มิเตอร์เกจ (Meter gauge)

2.1.1.1 รูปร่างของรางรถไฟ

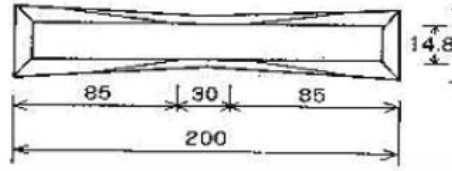
มีหน้าตัดคล้ายกับเหล็กรูปพรรณตัวไอ (I) ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ หัวราง เอวราง และฐานราง ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นรูปแบบที่ได้รับการยอมรับการใช้งาน มีความแข็งแรง และมีความคงทนต่อการใช้งาน [4]



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของราง

2.1.3.1 หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

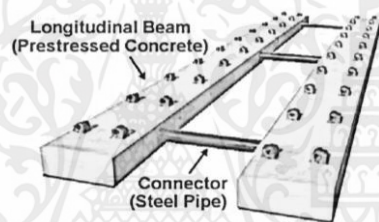
มีลักษณะเป็นท่อนคอนกรีตอัดแรงโดยขนาดหมอนคอนกรีตที่ประเทศไทยใช้จะมีขนาดตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขนาดหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

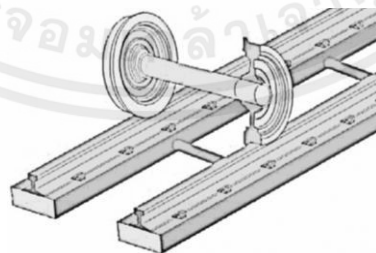
2.1.3.2 หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได

ประกอบด้วยคอนกรีตอัดแรงตามแนวยาว ซึ่งมีความยาวอยู่ที่ 5.90 - 6.25 เมตร และมีท่อเหล็กตามแนวขวางเชื่อมยึดระหว่างคอนกรีตอัดแรงดังรูปที่ 2.5 [14]



รูปที่ 2.5 หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได

รางรถไฟที่ใช้หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดจะมีลักษณะเป็นรางที่ประกอบด้วยรางเหล็กกับหมอนคอนกรีตดังรูปที่ 2.6 มีประสิทธิภาพแข็งแรง และคงทนต่อการโก่งตัวสูงทำให้ช่วยลดในเรื่องการซ่อมบำรุง [14]



รูปที่ 2.6 รางรถไฟเมื่อประกอบกับหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได

2.1.4 หินโรยทาง (Ballast)

คือ วัสดุที่ใช้โรยทางและทำการบดอัดในชั้นบนสุดของโครงสร้างฐานรากซึ่งอยู่ใต้หมอนรองรางรถไฟ โดยปกติแล้วหินที่มีความแข็ง มีเหลี่ยมมุม และมีความต้านทานต่อการขัดสีนี้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบที่จะช่วยให้เป็นทางรถไฟเป็นทางที่สมบูรณ์ มีความหลากหลายของวัสดุต่าง ๆ ที่ถูกนำมาใช้เป็นหินโรยทาง เช่น หินแกรนิต หินบะซอล หินปูน เศษหิน และกรวด จึงทำให้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โดยหินโรยทางอาจแบ่งย่อยออกเป็น 4 หมวด ดังนี้

1. วัสดุที่อยู่ระหว่างหมอนรองรางรถไฟ (Crib)
2. วัสดุที่อยู่นอกปลายของหมอนรองรางรถไฟใต้ชั้นหินโรยทาง (Shoulder)
3. ส่วนบนที่รองรับชั้นหินโรยทาง ซึ่งไม่ถูกรบกวนโดยการซ่อมแซมชั้นหินโรยทาง (Top ballast)
4. ส่วนล่างของชั้นที่รองรับชั้นหินโรยทาง ซึ่งไม่ถูกรบกวนโดยการซ่อมแซมบริเวณชั้นหินโรยทาง (Bottom ballast)

2.1.5 ชั้นรองหินโรยทาง (Sub-Ballast)

ชั้นรองหินโรยทาง เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นหินโรยทาง และชั้นดินเดิม มีหน้าที่ดังนี้

1. ลดค่าความเครียดบริเวณใต้ชั้นหินโรยทางที่เกิดจากการใช้งาน ให้อยู่ในระดับที่ชั้นดินเดิมสามารถรับได้
2. ขยายการป้องกันการแข็งตัวของน้ำในชั้นรองหินโรยทาง
3. ป้องกันการแทรกซึมของดินเดิม และหินโรยทาง
4. ป้องกันการเคลื่อนย้ายของวัสดุที่มีความละเอียดเล็ดรอดออกมาจากชั้นดินเดิม
5. ป้องกันการสึกร้อนของหินโรยทาง จะเกิดเมื่อมีน้ำ ซึ่งจะนำไปสู่การสลาย
6. ระบายน้ำจากหินโรยทาง และชั้นดินเดิม
7. ยอมให้มีการระบายของน้ำขึ้นมาจากชั้นดินเดิม

2.1.6 ดินเดิมหรือดินถม (Sub-Grade)

ดินเดิมหรือดินถม คือ ฐานที่ใช้รองรับการสร้างโครงสร้างทางรถไฟเพื่อให้ฐานรากมีเสถียรภาพ โดยอิทธิพลจากค่าความเครียดที่เกิดจากการใช้งานจะขยายตัวลึกลงถึง 5 เมตรใต้หมอนรองรางรถไฟเกินความลึกของหินโรยทาง และชั้นรองหินโรยทาง ด้วยเหตุนี้ชั้นดินเดิมจึงเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากในโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของทางรถไฟและการบำรุงรักษา สำหรับตัวอย่างดินเดิมคือส่วนประกอบหลักที่มีความยืดหยุ่นในการรองรับโครงสร้างขนาดใหญ่ และด้วยเหตุนี้มีส่วนอย่างมากในการโค้งตัวในช่วงอิลาสติกของรางรถไฟภายใต้น้ำหนักจากล้อ ชั้นดินเดิมนี้เป็นสาเหตุการทรุดตัวของรางที่แตกต่างกัน โดยชั้นดินเดิมนี้อาจแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ ชั้นดินเดิมที่มีตามธรรมชาติ และชั้นดินเดิมที่มีการสร้างขึ้น

2.2 การยกโค้งรถไฟ

การยกโค้ง (Cant) เป็นผลต่างระหว่างความสูงของด้านนอก (Outer Rail) กับรางด้านใน (Inner Rail) โดยจะทำการยกรางด้านนอกให้สูงขึ้นจากระดับปกติ ส่วนรางด้านในจะอยู่ในระดับปกติ เดิม เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ผ่านโค้งที่มีรัศมี ด้วยความเร็ว และมีการยกโค้งขึ้นจะทำให้เกิดแรงที่กระทำต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถไฟ คือแรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force) ที่จะทำให้เกิดการถ่วงน้ำหนักไปที่ล้อรถไฟที่กตรางฝั่งนอกโค้ง โดยค่าของการการยกโค้งของรถไฟจะประกอบด้วย 2 ค่า ได้แก่ ค่ายกโค้งจริง (Actual Cant หรือ Apply Cant) เป็นค่าความสูงของรางด้านนอกโค้งที่สูงกว่าด้านในโค้ง และ ค่ายกโค้งขาด (Cant Deficiency) หรือส่วนพร่องของการยกโค้ง โดยในประเทศไทยการรถไฟแห่งประเทศไทยได้มีการกำหนดมาตรฐานการยกโค้งจริงไว้ ไม่ให้ค่าเกินกว่า 90 มิลลิเมตร และค่าของการยกโค้งขาด ไว้ไม่ให้เกินกว่า 50 มิลลิเมตร [3] ระยะยกโค้งโดยปลอดภัยสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{ระยะยกจริง} = \frac{2}{3} \left[\frac{8.338(v_{max}+5)^2}{r} \right] \text{ หรือ } h = \frac{5.5587(v_{max}+5)^2}{r} \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

โดยที่ v_{max} คือ ความเร็วสูงสุดของขบวนรถ หน่วยเป็น กิโลเมตรต่อชั่วโมง
 r คือ รัศมีโค้ง หน่วยเป็น เมตร
 h คือ ระยะยก หน่วยเป็น มิลลิเมตร
 หรือดูได้ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงระยะการยกโค้งเมื่อเทียบกับรัศมีโค้งและความเร็ว

แสดงส่วนสูงของรางนอกกว่ารางในในทางโค้ง เป็นมิลลิเมตร

ความเร็ว รถ./ชม. ม.	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	ความเร็ว รถ./ชม. ม.	
160	5	10	15	20	30	45	55	70	85																						160	
165	5	10	15	20	30	40	55	70	85																						165	
180		5	10	20	30	40	50	65	75																						180	
200		5	10	15	25	35	45	55	70	85																					200	
225		5	10	15	20	30	40	50	60	75	90																				225	
250		5	10	15	20	25	35	45	55	65	80																				250	
300		5	5	10	15	25	30	40	45	55	65	80	90																		300	
325		5	5	10	15	20	25	35	45	50	60	70	85																		325	
350		5	5	10	15	20	25	30	40	50	55	65	80	90																	350	
375		5	5	10	15	20	25	30	35	45	55	65	75	85																	375	
400		5	5	10	15	15	20	30	35	40	50	60	70	80	90																400	
420		5	5	10	10	15	20	25	35	40	50	55	65	75	85																420	
450			5	10	10	15	20	25	30	35	45	50	60	70	80	90															450	
470			5	5	10	15	20	25	30	35	45	50	60	65	75	85															470	
500			5	5	10	15	20	25	30	35	40	45	55	65	70	80	90														500	
550			5	5	10	15	15	20	25	30	35	45	50	55	65	75	80	90													550	
575			5	5	10	10	15	20	25	30	35	40	45	55	60	70	80	85													575	
600			5	5	10	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	65	75	85													600	
650			5	5	10	10	15	15	20	25	30	35	40	50	55	60	70	75	85												650	
700			5	5	5	10	15	15	20	25	30	35	40	45	50	55	65	70	80												700	
750				5	5	10	10	15	20	25	25	30	35	40	45	55	60	65	75	80	90										750	
800				5	5	10	10	15	15	20	25	30	35	40	45	50	55	65	70	75	85										800	
880				5	5	10	10	15	15	20	25	25	30	35	40	45	50	55	60	70	75	85									880	
900				5	5	10	10	15	15	20	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	75	80									900	
985				5	5	5	10	10	15	15	20	25	30	30	35	40	45	50	55	60	65	75	85	90							985	
1000				5	5	5	10	10	15	15	20	25	25	30	35	40	45	50	55	60	65	75	80	90							1000	
1100				5	5	5	10	10	15	15	20	20	25	30	35	35	40	45	50	55	60	65	75	85	90						1100	
1165				5	5	5	10	10	10	15	15	20	25	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90					1165	
1200				5	5	5	10	10	15	15	20	25	25	30	35	40	40	45	50	55	60	65	70	75	85						1200	
1230				5	5	5	10	10	15	15	20	20	25	30	35	35	40	45	50	55	60	65	70	75	85						1230	
1250				5	5	5	10	10	15	15	20	20	25	30	30	35	40	40	50	55	60	65	70	75	80	90					1250	
1300				5	5	5	10	10	15	15	20	20	25	25	30	35	40	40	45	50	55	60	70	75	80	85					1300	
1400				5	5	5	10	10	10	15	15	20	25	25	30	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85				1400	
1500				5	5	5	10	10	10	15	15	20	20	25	25	30	35	40	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85			1500	
1600				5	5	5	5	10	10	15	15	15	20	20	25	30	30	35	40	45	45	50	55	60	65	70	75	80	85		1600	
1700				5	5	5	10	10	10	15	15	15	20	20	25	30	30	35	40	40	50	50	55	60	65	70	75	80	85		1700	
1750				5	5	5	10	10	10	15	15	15	20	20	25	25	30	30	35	40	40	45	50	55	60	65	70	75	80		1750	
1800				5	5	5	10	10	10	15	15	15	20	25	25	30	30	35	40	40	45	50	55	60	65	70	75	80			1800	
2000				5	5	5	5	10	10	10	15	15	20	20	25	25	30	30	35	35	40	45	50	55	60	65	65				2000	
2500					5	5	5	5	10	10	10	15	15	15	20	20	25	25	25	30	35	35	40	40	45	45	50	55	55		2500	
3000						5	5	5	5	10	10	10	10	15	15	15	15	20	20	25	30	30	30	30	35	40	40	40	40	45		3000
4000							5	5	5	5	5	10	10	10	10	15	15	15	15	20	20	20	20	25	25	30	30	30	30	35		4000
5000								5	5	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10	10	15	15	15	20	20	20	20	25	25	30		5000
7000												5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10	15	15	20		7000

- หมายเหตุ :
- 1) ใช้สูตรระยะยกจริงตามสมการที่ 2.29
 - 2) ระยะยกสูงสุด (Maximum cant) ไม่เกิน 90 มิลลิเมตร
 - 3) ส่วนขาดของการยกทางโค้ง (Cant deficiency) ไม่เกิน 50 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 องค์ประกอบของแรงกระทำในโครงสร้างทางรถไฟ

ทางรถไฟต้องรับน้ำหนักบรรทุกทุกในสามทิศทางที่เกิดขึ้นซ้ำ และพร้อมกันตลอดเวลาที่ใช้งาน โดยแรงที่กระทำกับทางรถไฟประกอบด้วย แรงกระทำในแนวตั้ง (Vertical Forces) แรงกระทำในแนวด้านข้าง (Lateral Forces) และแรงกระทำในแนวยาว (Longitudinal Forces)

2.3.1 แรงกระทำในแนวตั้ง

เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกตกลงเพลาน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้งจากสภาพการจราจรปกติซึ่งสามารถใช้การกระจายน้ำหนักลงรางตามชนิด และน้ำหนักลงเพลาจริงของรถไฟ

2.3.2 แรงกระทำในแนวด้านข้าง

เป็นแรงที่เกิดขึ้นในกรณีที่รถไฟต้องเข้าโค้ง เมื่อเข้าโค้ง แรงหนีศูนย์กลาง (q_{tk}) จะต้องนำมาพิจารณา โดยแรงหนีศูนย์กลางสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

$$q_{tk} = \frac{v^2}{g \times r} (f \times q_{vk}) \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

โดยที่

q_{tk} คือ แรงหนีศูนย์กลาง หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

q_{vk} คือ แรงกระทำหรือน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้ง หน่วยเป็น กิโลนิวตัน

v คือ ความเร็วสูงสุดขณะเข้าโค้ง หน่วยเป็น เมตร/วินาที

g คือ ความเร็วเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก หน่วยเป็น เมตร/วินาที²

r คือ รัศมีความโค้ง หน่วยเป็น เมตร

f คือ ตัวคูณประกอบปรับลด

โดยที่ $f = \left[1 - \frac{v_{max}-120}{100} \left(\frac{814}{v} + 1.75 \right) \left(1 - \sqrt{\frac{2.88}{L_f}} \right) \right]$ สมการที่ 2.3

และ L_f คือ ความยาวประสิทธิผลของแรงกระทำต่อช่วงโค้งบนสะพาน หน่วยเป็น เมตร

v_{max} คือ ความเร็วสูงสุด หน่วยเป็น เมตร/วินาที

กำหนดให้ f เท่ากับ 1 เมื่อ $V \leq 120$ กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือ $L_f \leq 2.88$

2.3.3 แรงกระทำในแนวยาว

แรงจากการเร่ง และเบรกจะกระทำที่ด้านบนของราง กระทำตามแนวยาวของรางตามทิศทางของทางรถไฟ แรงนี้ให้พิจารณาเป็นแรงกระทำแบบกระจายสม่ำเสมอตลอดแนวที่แรงกระทำ ($L_{a,b}$) การคำนวณแรงกระทำให้คำนวณตามสมการที่ 2.4 และสมการที่ 2.5

แรงจากการเร่ง = $33 \times L_{a,b}$ กิโลนิวตัน ≤ 1000 กิโลนิวตัน สมการที่ 2.4

แรงจากการเบรก = $20 \times L_{a,b}$ กิโลนิวตัน ≤ 1000 กิโลนิวตัน สมการที่ 2.5

โดยที่ $L_{a,b}$ คือ ความยาวของแนวแรงที่กระทำ หน่วยเป็นเมตร ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกสภาวะต่าง ๆ

2.4 อัตราส่วนแรงกระทำทางด้านข้างต่อแรงกระทำในแนวดิ่ง

ในการประเมินความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟ การวัดแรงกระทำที่เกิดขึ้นที่ชุดเพลาล้อรถไฟถือว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากอาจเกิดการทรานส์เวิร์กหากไม่มีการพิจารณาในส่วนนี้ โดยการประเมินค่าความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟจะอ้างอิงจากสมการของ Nadal

$$\left(\frac{L}{V}\right) = \frac{\tan\alpha - \mu}{1 - \mu \times \tan\alpha} \quad \text{สมการที่ 2.6}$$

โดยที่ L คือ แรงกระทำในแนวดิ่ง

V คือ แรงกระทำในแนวนอน

α คือ มุมโค้งของปีกล้อ

μ คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อและราง

และจากงานวิจัยของ Huang, 2021 [13] กล่าวว่าอัตราส่วนความปลอดภัย (L/V) ของการวิ่งของรถไฟต้องไม่เกิน 0.8

2.5 ชนิดของแรงกระทำในโครงสร้างทางรถไฟ

แรงที่กระทำแบ่งได้ออกเป็น 2 ลักษณะ คือ แรงกระทำแบบสถิต (Static Load) และแรงกระทำแบบไดนามิก (Dynamic Load)

2.5.1 แรงกระทำแบบสถิต

เป็นน้ำหนักบรรทุกหรือแรงที่กระทำต่อโครงสร้างเมื่ออยู่ในสถานะนิ่ง ตำแหน่งที่คงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป แรงกระทำในที่นี้คือน้ำหนักบรรทุกจากเพลาล้อที่กระทำกับราง แล้วจึงถ่ายจากรางมายังหมอนคอนกรีต ซึ่งจะต้องใช้กรณีของน้ำหนักกระทำรูปแบบต่าง ๆ เช่น การเกิดแรงหนีศูนย์กลาง การกระจายน้ำหนักจากตัวรถลงรางที่ไม่สมมาตร การยกโค้ง ทั้งตามมาตรฐานที่กำหนด และน้ำหนักของตัวรถไฟจริงที่นำมาใช้

2.5.2 แรงกระทำแบบไดนามิก

เป็นน้ำหนักบรรทุกหรือแรงที่กระทำต่อโครงสร้างเมื่ออยู่ในสถานะที่มีการเคลื่อนไหว ตำแหน่งเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลง น้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้นตามความเร็วของรถไฟ โดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวประกอบ 1.5 ในการคูณกับน้ำหนักกระทำแบบสถิต เมื่อความเร่งในแนวดิ่งของตัวรถไฟไม่เกิน 5 เมตร/วินาที²

2.6 หน่วยแรงที่ยอมให้ของคอนกรีต

หน่วยแรงที่ยอมให้ เป็นค่าที่ใช้ในการวัดความทนทานของวัสดุ เป็นค่าสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ก่อนที่จะเกิดการแตกหักหรือเสียหาย โดยทั่วไปจะใช้หน่วยแรงที่ยอมให้ เป็น ปาสคาล (Pa) กิโลปาสคาล (kPa) หรือ เมกะปาสคาล (MPa) สำหรับคอนกรีต การทราบหน่วยแรงที่ยอมให้ของวัสดุ จึงเป็นข้อมูลสำคัญในการวางแผน และคำนวณโครงสร้างให้มีความแข็งแรงและปลอดภัยตามกฎระเบียบที่กำหนด โดยหน่วยแรงหรือความเค้นในคอนกรีตที่ยอมให้ขณะใช้งาน (F_w) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7

$$F_w = 0.45f_c' \quad \text{สมการที่ 2.7}$$

โดยที่ F_w คือ ความเค้นในคอนกรีตที่ยอมให้ขณะใช้งาน หน่วยเป็น ปาสคาล
 f_c' คือ ความต้านทานแรงอัดของคอนกรีต หน่วยเป็น ปาสคาล

2.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ วิธีการนำหลักการทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาทางวิศวกรรมในเชิงพฤติกรรมของวัสดุ เชิงโครงสร้าง (Structural) ความร้อน (Heat transfer) หรือของไหล (Fluid flow) ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดขึ้น โดยอาศัยการแก้ปัญหาระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) เพื่อหาผลลัพธ์โดยประมาณ (Approximate solution) ของปัญหาที่กำหนด

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเทคโนโลยีที่ทันสมัย ทำให้การขึ้นรูปแบบจำลองทำได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว และเสมือนโครงสร้างจริง ส่งผลให้การคำนวณแม่นยำมากขึ้น สามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ได้สะดวก เป็นไปตามคุณสมบัติที่แท้จริงของวัสดุที่ต้องการศึกษา กำหนดทิศทาง และ ปริมาณแรงที่กระทำต่อวัสดุได้ ซึ่งสามารถศึกษาพฤติกรรม ของวัสดุที่สถานะทางกายภาพแตกต่างกัน ทั้งของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ประเมินผลลัพธ์ที่ได้หลายรูปแบบ เช่น ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) การเคลื่อนขยับ (Displacement) กลศาสตร์ของไหล (Fluid mechanic) เป็นต้น

2.8 ค่า Von Mises Stress

Von Mises Stress หรือเกณฑ์ความเค้นเทียบเท่าของ Von Mises เป็นการวัดผลรวมของความเค้นภายในวัตถุ โดยทั่วไปจะใช้ในกลศาสตร์โครงสร้าง และวัสดุศาสตร์ เพื่อประเมินศักยภาพในการรับแรงกระทำของวัตถุภายใต้เงื่อนไขการรับแรงกระทำที่ซับซ้อน หากค่า Von Mises Stress ที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่าค่าของความเค้นที่จุดคราก หมายความว่าวัตถุที่ทำการวิเคราะห์นั้นถึงจุดที่เกิดการเสียรูปแล้ว หรืออาจมีความเสียหายเกิดขึ้นที่ตัววัตถุนั้นไปแล้ว

2.9 โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ

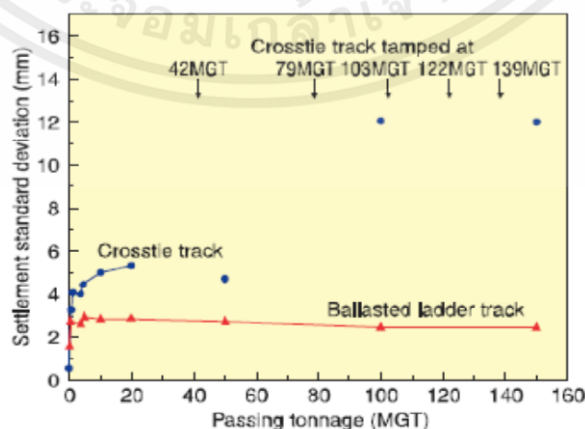
2.9.1 Abaqus

Abaqus เป็นโปรแกรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย พัฒนาโดย Dassault Systèmes Simulia Corp. เป็นโปรแกรมการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ช่วยให้วิศวกรหรือนักวิจัยสามารถจำลอง และวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้าง ส่วนประกอบ ของวัสดุภายใต้สภาวะการรับแรงกระทำต่าง ๆ เป็นโปรแกรมที่มีความสามารถขั้นสูงสำหรับการสร้างแบบจำลองผสมกับการวิเคราะห์แก้ไข ปัญหา สามารถแสดงภาพผลลัพธ์ของปัญหาทางวิศวกรรมที่ซับซ้อนในสาขาต่าง ๆ ได้ ในปัจจุบันมีการใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การบิน และอวกาศ (Aerospace) ยานยนต์ (Automotive) วิศวกรรมโยธา (Civil engineering) เพื่อช่วยในการออกแบบ และเพิ่มประสิทธิภาพ ในระบบการทำงาน

2.10 ทบทวนวรรณกรรม

2.10.1 Kiyoshi Asanuma, 2004: Ladder Track Structure and Performance (โครงสร้าง และประสิทธิภาพของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได)

หมอนคอนกรีตรองรางรถไฟเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในระบบทางรถไฟ มีข้อควรคำนึงอยู่หลากหลาย เช่น ความปลอดภัยในการใช้งาน ระยะเวลาการใช้งาน การซ่อมบำรุงรักษา และความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อตอบสนองข้อควรคำนึงเหล่านี้ โดยในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโครงสร้างและศักยภาพเบื้องต้นของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได พร้อมทั้งทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างทางรถไฟที่ใช้หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว กับทางรถไฟที่ใช้หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได โดยการทดสอบความคงทน (Endurance Test) ให้รถไฟวิ่งผ่านรางที่ใช้หมอนคอนกรีตทั้งสองชนิดจำนวนหลายครั้ง และสังเกตตัวหมอนคอนกรีตที่รับแรงกระทำสะสม



รูปที่ 2.7 Settlement standard deviation

โดยจากกราฟ เส้นสีแดงคือหมอนคอนกรีตแบบขั้นบันได เส้นน้ำเงินคือหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว จะเห็นว่าในขณะที่หมอนคอนกรีตรับน้ำหนักสะสมเท่ากัน หมอนคอนกรีตแบบขั้นบันไดเกิดการทรุดตัวน้อยกว่าอย่างชัดเจน ขณะที่หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยวทรุดตัวเยอะกว่ามาก พร้อมทั้งเกิดความเสียหายกับระบบรางหลายจุด

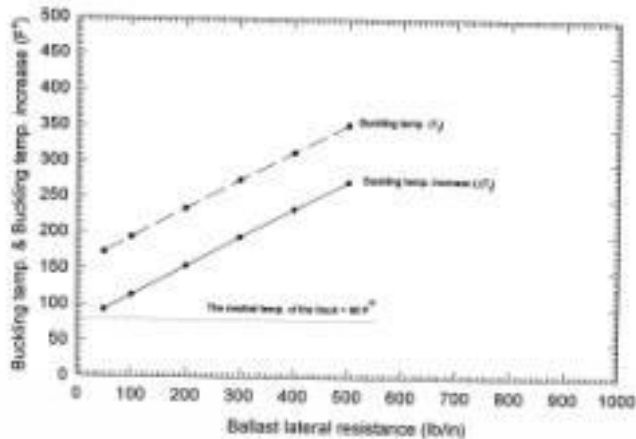
2.10.2 Ernest J. Barenberg, 2016: Lateral Stability Analysis of Ladder Sleeper Track Systems (การวิเคราะห์เสถียรภาพทางด้านข้างของทางรถไฟที่ใช้หมอนคอนกรีตแบบขั้นบันได)

หมอนคอนกรีตแบบขั้นบันไดเป็นหมอนคอนกรีตรูปแบบใหม่ที่ยังไม่มีการใช้งานในประเทศไทย แต่เป็นหมอนคอนกรีตที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศอย่างยาวนาน ทำให้มีเอกสารการตรวจสอบสมรรถนะและประสิทธิภาพของตัวหมอนคอนกรีตแบบขั้นบันไดตีพิมพ์ออกมาหลายฉบับ หนึ่งในงานวิจัยที่ถูกตีพิมพ์คืองานวิจัยการทดสอบสมรรถนะ และเสถียรภาพทางด้านข้างของตัวหมอนคอนกรีตแบบขั้นบันไดนี้

ภายในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบเสถียรภาพระหว่าง หมอนคอนกรีตแบบขั้นบันไดกับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว โดยทำการทดสอบผ่านโปรแกรมการคำนวณแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ จำลองทดสอบทั้งแบบทางตรงและทางโค้ง จากผลการทดสอบดังรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่า ทั้งในทางตรง และในทางโค้ง ขณะที่ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของระบบรางเท่ากัน ในแบบจำลองที่ใช้หมอนคอนกรีตแบบขั้นบันไดมีค่าอุณหภูมิก่อนเกิดการเสียรูปสูงกว่าในแบบจำลองที่ใช้ หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว แสดงให้เห็นว่าหมอนคอนกรีตแบบขั้นบันไดสามารถรองรับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีระหว่างล้อกับรางได้ดีกว่าการใช้หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว



รูปที่ 2.8 ลักษณะการเสียรูปโดยเฉลี่ยจากการทดสอบผ่านโปรแกรมจำนวนหลายครั้ง

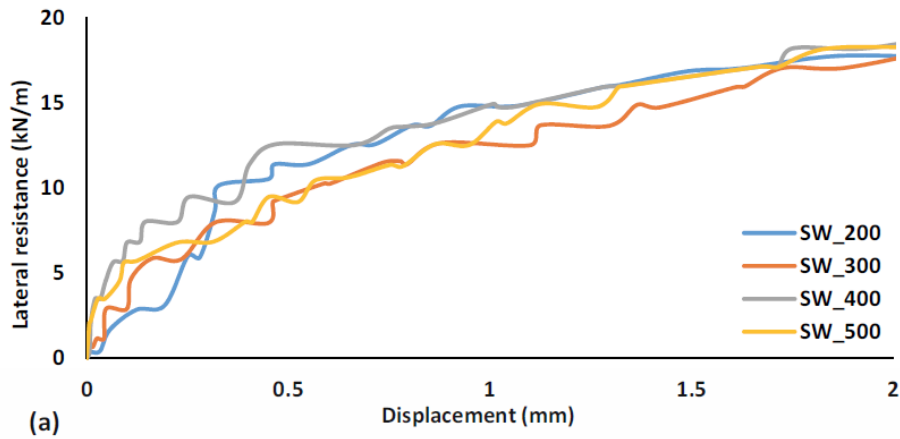


รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่รับได้ก่อนเกิดการเสีรूपกับความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของระบบราง

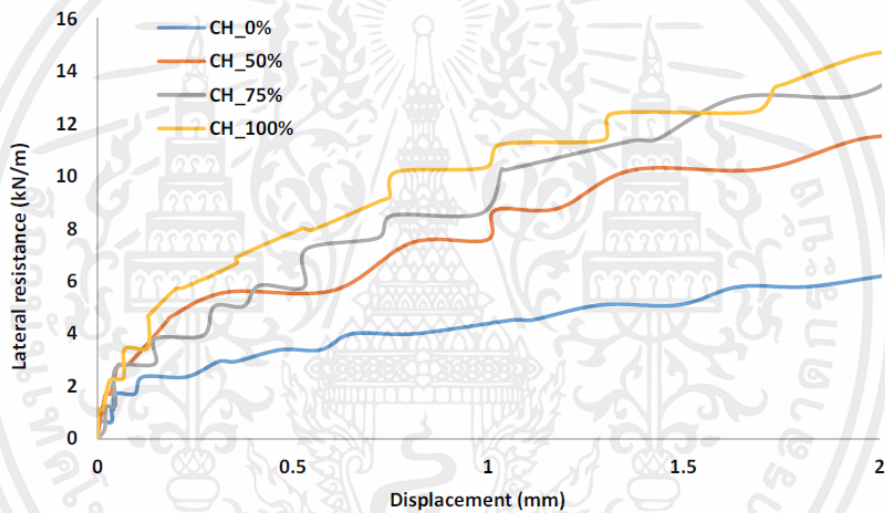
2.10.3 Guoqing Jing, Peyman Aela and Hao Fu, 2019: The contribution of ballast layer components to the lateral resistance of ladder sleeper track (การส่งผลของหินโรยทางต่อความสามารถในการต้านแรงกระทำทางด้านข้างของทางรถไฟที่ใช้หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได)

ชั้นหินโรยทางเป็นอีกส่วนประกอบที่สำคัญในระบบทางรถไฟ ทำหน้าที่ส่งผ่านแรงกระทำในแนวตั้งจากหมอนคอนกรีตลงสู่ชั้นดิน การตรวจสอบการโก่งเดาะของรางรถไฟ และความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างเป็นเรื่องที่สำคัญในการป้องกันไม่ให้เกิดการเสีรूपในระบบทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง โดยปริมาณกับตำแหน่งของหินโรยทางส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของระบบรางโดยตรงอย่างมีนัยสำคัญ การออกแบบปริมาณของหินโรยทางให้เหมาะสมจะช่วยเพิ่มสมรรถนะในการรองรับแรงกระทำทางด้านข้างบนทางรถไฟ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการต้านทานแรงกระทำด้านข้างของตัวหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนของวัสดุที่อยู่ระหว่างหมอนรองรางรถไฟ และไหล่ทาง



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านแรงกระทำทางด้านข้างกับการเสียรูปของระบบราง
เมื่อความกว้างของไหล่ทางมีการเปลี่ยนแปลง

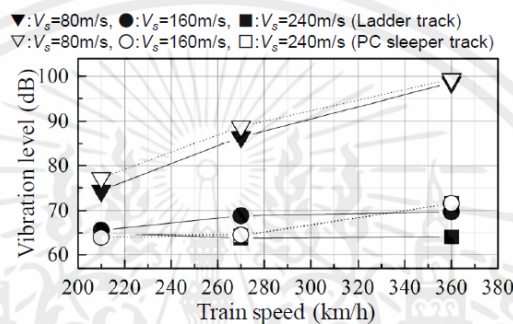


รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านแรงกระทำทางด้านข้างกับการเสียรูปของระบบราง
เมื่อความสูงของหินโรยทางระหว่างหมอนคอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลง

โดยจากผลการทดสอบดังรูปที่ 2.10 ทำให้ทราบว่าหากทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างและความสูงของไหล่ทาง ให้มากขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการต้านแรงกระทำด้านข้างนั้นเพิ่มมากขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ขณะที่ความสูงของวัสดุที่อยู่ระหว่างหมอนรองรางรถไฟ มีผลต่อความสามารถในการต้านแรงกระทำด้านข้างได้เป็นอย่างดี โดยความสูงวัสดุที่อยู่ระหว่างหมอนรองรางรถไฟ ที่ระดับเสมอกับผิวหมอนคอนกรีตจะทำให้สามารถต้านแรงกระทำด้านข้างได้มากที่สุด ดังที่แสดงในรูปที่ 2.11

2.10.4 Tsutomu Watanabe, et al., 2017: Ground Vibration Characteristics of Ballasted Ladder Track (การสั่นสะเทือนของพื้นดินจากการใช้ทางรถไฟที่ใช้หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดที่มีหินโรยทาง)

การทดสอบการสั่นสะเทือนของพื้นดินจากการวิ่งผ่านของรถไฟ โดยทำการเปรียบเทียบกับระหว่างรางที่ใช้หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดกับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว ทั้งแบบจำลองและแบบทดสอบจริง ตัวแปรที่สำคัญในงานวิจัยนี้คือ ค่าความเร็วคลื่นเฉือนในดิน และความเร่งที่เกิดขึ้นในพื้นดิน โดยค่าความเร็วคลื่นเฉือนในดินนั้นแสดงถึงค่าความอ่อนแอของดิน ค่าน้อยแสดงถึงดินอ่อน ค่ามากแสดงถึงดินที่มีความแข็งแข็งมากขึ้น



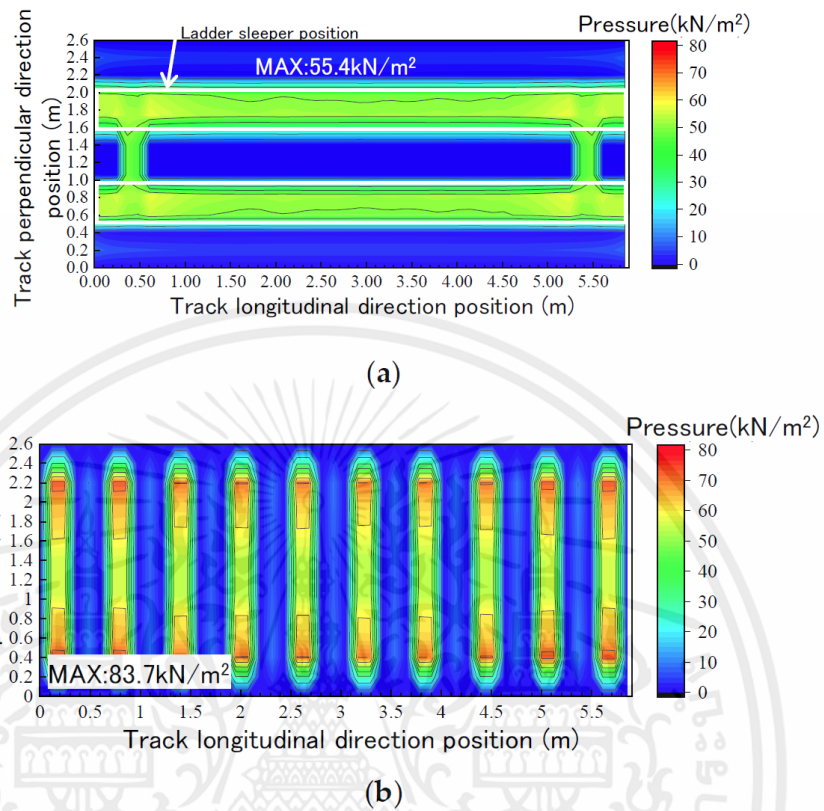
รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับการสั่นสะเทือนกับความเร็วของรถไฟ เมื่อค่าความเร็วคลื่นเฉือนในดินมีการเปลี่ยนแปลง

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 2.12 การใช้รถไฟในความเร็วกว่าที่ต่างกัน วิ่งผ่านรางบริเวณที่ดินมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ต่างกัน พบว่า ในการใช้ตัวหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดกับพื้นที่ที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำ จะส่งผลให้เกิดความเร่งใต้พื้นดินน้อยกว่าการใช้หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว แสดงให้เห็นว่าการใช้หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดในพื้นที่ที่เป็นดินอ่อนจะช่วยลดการเกิดการสั่นสะเทือนใต้พื้นดินได้ดีกว่าการใช้หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว ซึ่งจากงานวิจัยนี้ทำให้คาดการณ์ไว้ว่ามีความเป็นไปได้สูงที่จะนำหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดมาใช้กับดินในประเทศไทยได้เป็นอย่างดี

2.10.5 Tsutomu Watanabe, et al., 2022: Verification of Longitudinal Level Irregularity Suppression Effect at the Structural Boundary by Ballasted Ladder Track

จุดทางเชื่อมต่อระหว่างสิ่งปลูกสร้างที่มักจะมีช่องว่าง ไม่มีหินโรยทางมารองรับทางรถไฟ มักจะมีความถี่ในการเกิดการเสียหาย และมีความถี่ในการซ่อมบำรุงที่สูงกว่าทางรถไฟทั่วไป งานวิจัยนี้จึงเป็นงานวิจัยที่ทำการจำลองแบบจำลองหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดมาใช้ทดสอบเปรียบเทียบกับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยวบริเวณช่องว่างของทางเชื่อมระหว่างสิ่งปลูกสร้าง โดยจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดช่วยลดแรงดันบริเวณพื้นผิว

ระนาบด้านล่างของตัวหมอนคอนกรีตได้ดีกว่าหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.13

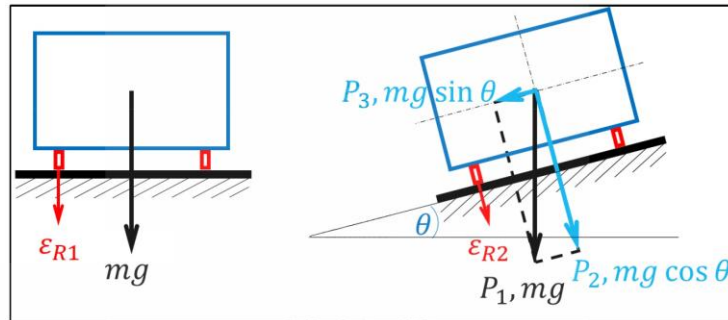


รูปที่ 2.13 แรงดันที่เกิดขึ้นที่ระนาบด้านล่างของตัวหมอนคอนกรีต (a) หมอนคอนกรีตแบบขั้นบันได (b) หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

2.10.6 มนตรี กุลประดิษฐ์, 2018: Study of Lateral Force Acting on Train Wheelset (การศึกษาแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลารถไฟ)

เป็นงานวิจัยที่ทำขึ้นเพื่อหาวิธีวัดแรงกระทำทางด้านข้างต่อเพลาของโบกี้รถไฟ โดยได้ทำการสร้างแบบจำลองขึ้นในโปรแกรมคำนวณแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ และสร้างแบบจำลองขนาดเล็กขึ้นมาทดสอบจริงเพื่อเปรียบเทียบค่าของแรงกระทำทางด้านข้างเพื่อความถูกต้อง โดยภายในงานวิจัยได้มีวิธีการคำนวณแรงกระทำทางด้านข้างที่เกิดขึ้นเบื้องต้นอยู่ 2 วิธี คือ วิธีการหาแรงกระทำทางด้านข้างโดยใช้ทฤษฎีการแตกแรง และการแปลงค่าความเครียดเป็นแรงกระทำ

2.10.6.1 วิธีการหาแรงกระทำทางด้านข้างโดยใช้ทฤษฎีการแตกแรง



รูปที่ 2.14 แรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างล้อและราง จากน้ำหนักรถไฟ

การที่รู้ค่าของมวลของล้อหรือเพลลาที่กดทับรางจะทำให้สามารถคำนวณแรงกระทำทางด้านข้างที่เกิดขึ้นได้ ดังนี้

จากรูปที่ 2.13

$$P_1^2 = P_2^2 + P_3^2$$

สมการที่ 2.8

$$P_3^2 = P_1^2 - P_2^2$$

สมการที่ 2.9

โดยที่

$$P_1 = mg$$

สมการที่ 2.10

$$P_2 = mg \cos \theta$$

สมการที่ 2.11

$$P_3 = mg \sin \theta$$

สมการที่ 2.12

จะได้

$$(mg \sin \theta)^2 = (mg)^2 - (mg \cos \theta)^2$$

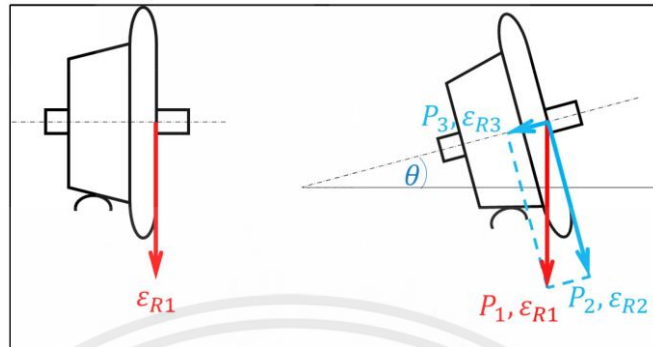
สมการที่ 2.13

$$mg \sin \theta = \sqrt{(mg)^2 - (mg \cos \theta)^2}$$

สมการที่ 2.14

โดยที่ $mg \sin \theta$ คือ แรงกระทำทางด้านข้างที่เกิดขึ้น

2.10.6.2 วิธีการหาแรงกระทำทางด้านข้างโดยทฤษฎีการแปลงค่าความเครียดเป็นแรงกระทำ



รูปที่ 2.15 ความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างล้อกับราง

เมื่อแรงกระทำกับวัตถุ วัตถุจะเกิดความเครียด ทำให้โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงขนาดตามทิศทางของแรง นิยามได้คือ

$$\epsilon = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{\delta}{L_0} \quad \text{สมการที่ 2.15}$$

โดยแรงกระทำเป็นส่วนโดยตรงต่อความเครียด

$$\frac{P}{\epsilon} = \frac{P}{\epsilon_1} = \frac{P}{\epsilon_2} = \frac{P}{\epsilon_3} \quad \text{สมการที่ 2.16}$$

เมื่อพิจารณาบริเวณล้อและราง สามารถหาความเครียดของแรงกระทำทางด้านข้างได้ ดังนี้

$$\epsilon_{R1}^2 = \epsilon_{R2}^2 + \epsilon_{R3}^2 \quad \text{สมการที่ 2.17}$$

$$\epsilon_{R1} = \sqrt{\epsilon_{R2}^2 - \epsilon_{R3}^2} \quad \text{สมการที่ 2.18}$$

แทนสมการที่ 2.18 ลงในสมการที่ 2.10

$$\frac{P_2}{\epsilon_{R2}} = \frac{P_3}{\sqrt{\epsilon_{R1}^2 - \epsilon_{R2}^2}} \quad \text{สมการที่ 2.19}$$

$$P_3 = \frac{P_2 \times \sqrt{\epsilon_{R1}^2 - \epsilon_{R2}^2}}{\epsilon_{R2}} \quad \text{สมการที่ 2.20}$$

โดยที่ P_3 คือ แรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 2.14 และรูปที่ 2.15 สามารถหาแรงกระทำด้านข้างจากความเครียดได้จากสัดส่วนของแรงกระทำต่อความเครียด จากสมการที่ 2.10 ,2.11 ,2.12 และ 2.16 จะได้

$$\frac{mg \sin \theta}{\epsilon_{R2}} = \frac{mg}{\epsilon_{R1}} - \frac{mg \cos \theta}{\epsilon_{R2}} \quad \text{สมการที่ 2.21}$$

โดยที่ $\frac{mg \sin \theta}{\epsilon_{R2}}$ คือ แรงกระทำทางด้านข้างที่เกิดขึ้น

2.12.7 ธรรมมา เจียรธรวานิช, 2549: การศึกษาลักษณะของโครงสร้างทางรถไฟแขวงบำรุงทางนครปฐม

เป็นการศึกษาเพื่อให้ทราบถึงลักษณะโครงสร้างของโครงสร้างทางรถไฟที่มีใช้อยู่จริงในประเทศไทย และเพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างของโครงสร้างทางเก่าและทางใหม่ โดยได้ทำการเปรียบเทียบข้อมูลทางรถไฟระหว่างโครงสร้างทางเก่ากับโครงสร้างทางใหม่ที่ กม.36 (สายใต้) และเปรียบเทียบข้อมูลทางรถไฟระหว่างโครงสร้างหมอนคอนกรีตท่อนคู่ กับ โครงสร้างหมอนไม้ ที่กม.64 รวมทั้งเปรียบเทียบข้อมูลโครงสร้างหมอนไม้ที่ กม.64 ระหว่างสายกาญจนบุรีกับสายสุพรรณบุรีโดยทำการวัดระดับตามยาวและตามขวางของทางรถไฟและใช้เทปวัดระยะและตลับเมตรวัดระยะ และมีมิติต่าง ๆ ได้แก่ รางรถไฟ เครื่องยึดเหนี่ยวราง หมอนรองราง หินโรยทาง ลักษณะคันทาง และส่วนประกอบอื่น ๆ โดยจากการที่ได้ศึกษาลักษณะโครงสร้าง สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. ลักษณะโครงสร้างทางรถไฟทั้ง 3 เส้นทาง มีลักษณะทั่วไปที่เหมือนกันคือเป็นคันทางถมแต่มีความสูงที่แตกต่างกันตามสภาพภูมิประเทศ
2. หมอนคอนกรีตที่ทางรถไฟทางล่องเก่า ในช่วงหลัก กม.36 อยู่ในระหว่างการดำเนินการเปลี่ยนหมอนให้เป็นหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยวแทนหมอนคอนกรีตแบบท่อนคู่ดังตารางที่ 2 เพราะสามารถใช้ได้ดีกว่าเนื่องจากเป็นคอนกรีตอัดแรงสามารถต้านทานแรงกระทำด้านข้างได้ดีกว่าทำให้รางรถไฟคงทน แข็งแรง และประหยัดงบในการซ่อมบำรุงรักษา
3. โครงสร้างรางรถไฟที่มีรถไฟวิ่งผ่านเยอะจะมีขนาดใหญ่กว่ารางที่มีรถไฟวิ่งผ่านน้อย เพื่อรองรับน้ำหนักที่ผ่านได้มากขึ้น

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลทางรถไฟระหว่างโครงสร้างทางเก่า และโครงสร้างทางใหม่ที่กม.36 (สายใต้)

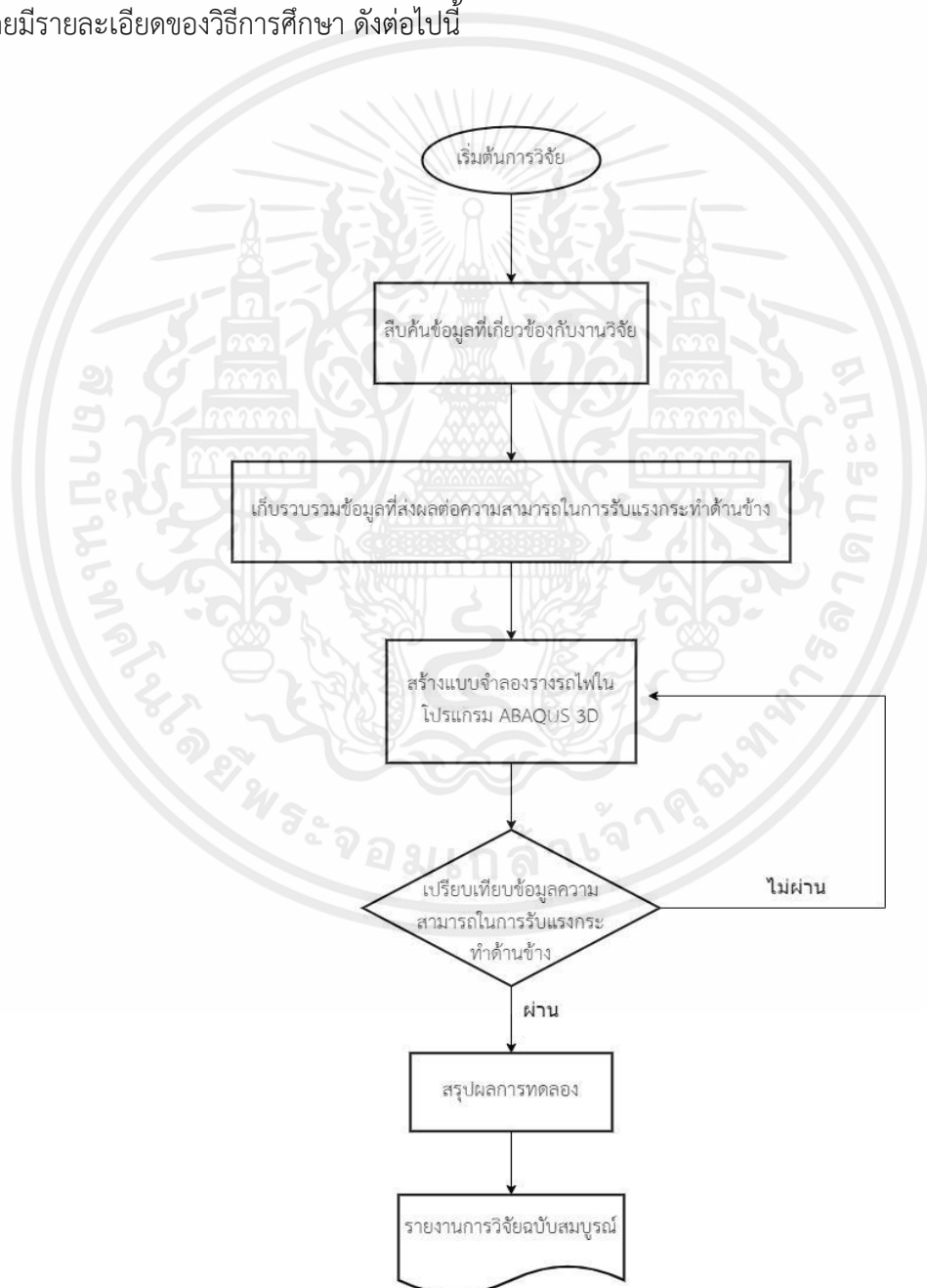
รายการ	โครงสร้างทางเก่า	โครงสร้างทางใหม่	หมายเหตุ
ขนาดราง	80 ปอนด์ ต่อ หลา	100 ปอนด์ ต่อ หลา	
ชนิดหมอนรองราง	คอนกรีต Two-Block	คอนกรีต Mono-Block	
ระยะห่างระหว่างหมอน	67 ซม.	59 ซม.	
เครื่องยึดเหนี่ยวราง	RN Clip	Pandral	
จุดต่อราง	เชื่อมยาวไม่จำกัด	เชื่อมยาวไม่จำกัด	
ความสูงคันทาง	1.20 เมตร	1.30 เมตร	
ระดับสันราง	ไม่ราบเรียบ	ราบเรียบสม่ำเสมอ	
ลาดคันทาง	1 ต่อ 2.4	1 ต่อ 2	
ร่องระบายน้ำ	มี	มี	อยู่ระหว่างคันทางทั้ง 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินการศึกษาโครงการว่ามีขั้นตอนการศึกษารวมถึงขั้นตอนการดำเนินงาน เพื่อที่จะศึกษาถึงโครงการที่เสนอ โดยงานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อมุ่งเน้นศึกษา และสร้างแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดสำหรับการนำมาใช้กับทางรถไฟในประเทศไทย พร้อมทั้งพัฒนาความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างบนทางรถไฟเป็นหลัก โดยมีรายละเอียดของวิธีการศึกษา ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังวิธีการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

คณะผู้จัดทำได้รวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัย โดยมีที่มาของข้อมูลต่าง ๆ ดังนี้

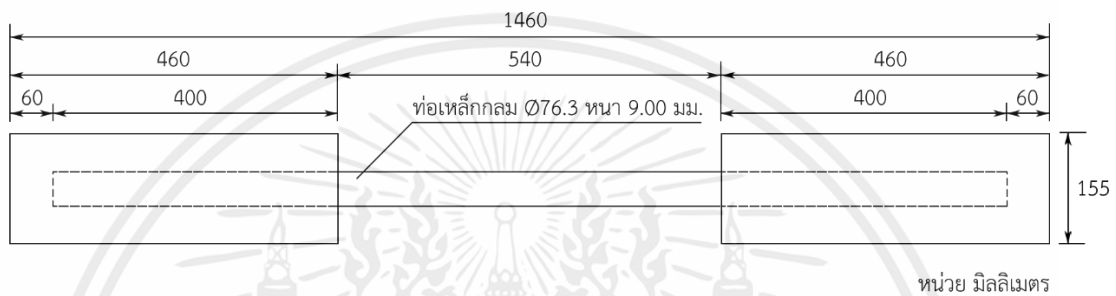
1. หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได ได้ทำการศึกษารูปแบบของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดในต่างประเทศจากงานวิจัยของ Wakui et al., 1996 [12] Watanabe et al., 2022 [20] และ Qu et al., 2019 [22] แล้วเลือกแต่ละองค์ประกอบเพื่อนำมาปรับปรุง และนำมาใช้ในการดำเนินงาน
2. หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว มีขนาด และหน้าตัดที่อ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Krishnamoorthy et al., 2018 [16] เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่ใช้โปรแกรม Abaqus ด้วยวิธีการคำนวณแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นหมอนคอนกรีตสำหรับใช้กับรางรถไฟมิติเตอร์เกจ และมีขนาดที่ใกล้เคียงกับหมอนคอนกรีตที่ใช้ในประเทศไทย
3. รางรถไฟ มีความกว้างขนาด 1.000 เมตร หรือเป็นมิติเตอร์เกจ เป็นขนาดความกว้างรางรถไฟที่ใช้ในประเทศไทย [4] ใช้หน้าตัดของรางชนิด 54E1 เนื่องจากประเทศไทยใช้รางชนิดนี้เป็นส่วนใหญ่ในทางสายประธาน [3]
4. ชั้นหินโรยทาง มีความกว้างจากหมอนคอนกรีตถึงไหล่ทาง 40 เซนติเมตร ความสูงจากหมอนคอนกรีตถึงพื้น 20 เซนติเมตร อัตราส่วนความลาดของไหล่ทางเท่ากับ 1:1.25 [3]
5. แรงจำลองที่ล้อกระทำกับราง กำหนดให้มีแรงกระทำข้างละ 10 ตัน [3]

3.2 แนวคิดการออกแบบหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได

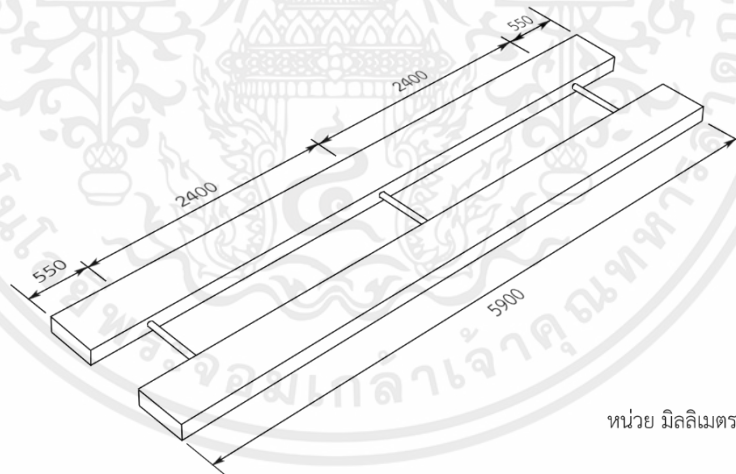
หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได เป็นรูปแบบหมอนคอนกรีตที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ แต่ยังไม่มีการนำมาใช้งานในประเทศไทย เนื่องจากความแตกต่างของระยะห่างระหว่างรางรถไฟ ในต่างประเทศโครงสร้างทางรถไฟมีความห่างระหว่างรางเท่ากับ 1.435 เมตร (Standard gauge) แต่ทางรถไฟสายหลักในประเทศไทยส่วนใหญ่มีระยะห่างระหว่างรางเท่ากับ 1.000 เมตร (Meter gauge) การลดลงของระยะห่างระหว่างรางอาจส่งผลให้รูปร่าง หรือขนาดหน้าตัดของหมอนคอนกรีตเปลี่ยนไป และอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการรับแรงกระทำทางด้านของของโครงสร้างทางรถไฟ ดังนั้น คณะผู้จัดทำจึงได้อ้างอิงรูปแบบของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดในต่างประเทศจากงานวิจัยของ Wakui et al., 1996 [12] Watanabe et al., 2022 [20] และ Qu et al., 2019 [22] โดยได้ทำการศึกษาองค์ประกอบของโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดของงานวิจัยข้างต้น แล้วจึงเลือกแต่ละองค์ประกอบที่มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้งานกับทางรถไฟในประเทศไทย มีการสร้างแบบจำลองหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดรูปแบบต่าง ๆ แล้วทดสอบประสิทธิภาพการรับแรงกระทำทางด้านข้าง เพื่อคัดเลือกรูปแบบหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาปรับใช้ประกอบงานวิจัย จึงได้รูปแบบหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดที่จะนำไปใช้งานในการดำเนินงานวิจัยนี้ คือ หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดมีความยาวของตัวหมอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5900 มิลลิเมตร หน้าตัดของตัวหมอนกว้าง 460 มิลลิเมตร สูง 155 มิลลิเมตร [20] มีท่อเหล็กเชื่อมระหว่างหมอนคอนกรีต ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.3 มิลลิเมตร หน้า 9 มิลลิเมตร ยาว 1340 มิลลิเมตร ท่อเหล็กเกรด STK540 ตามมาตรฐาน มอก. 107-2561 [9] ฝังลึกเข้าไปในตัวคอนกรีต 400 มิลลิเมตร [12] ระบบยึดเหนี่ยวราง (Fastener) ห่างกันช่วงละ 600 มิลลิเมตร แผ่นรองรางมีลักษณะเป็นแผ่นยาวต่อเนื่อง (Continuous rail pad) ขนานไปกับหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได [12] แสดงรูปหน้าตัดได้ดังรูปที่ 3.2 และสร้างเป็นแบบจำลองสามมิติได้ดังรูปที่ 3.3 เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Abaqus ได้ในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.2 รูปหน้าตัดของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได



รูปที่ 3.3 รูปแบบจำลองสามมิติของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได

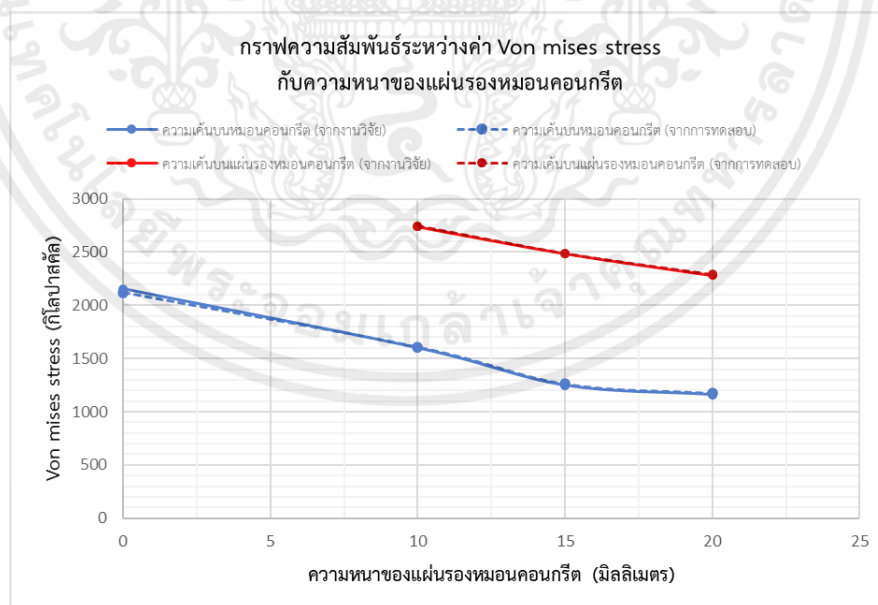
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือโปรแกรม Abaqus เป็นโปรแกรมที่ใช้เพื่อการสร้างแบบจำลองสามมิติ และคำนวณด้วยระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความสามารถในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างในแต่ละชิ้นส่วนภายใต้เงื่อนไขการรับแรงกระทำที่มีความซับซ้อนสูงได้ เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์เป็นอย่างสูงในหลายอุตสาหกรรมในปัจจุบัน เนื่องจากการทดสอบจริงนั้นจำเป็นต้องใช้

เวลา และต้นทุนที่สูง แต่การทดสอบด้วยโปรแกรม Abaqus สามารถประหยัดทั้งเวลา และต้นทุนได้เป็นอย่างมาก อีกทั้งยังสามารถทดสอบได้อย่างไม่จำกัดจำนวนครั้ง โดยในการดำเนินงานวิจัยนี้ ผู้จัดทำใช้โปรแกรม Abaqus CAE เวอร์ชัน 6.13 ในการใช้งาน

3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม (Validation)

การตรวจสอบความถูกต้อง เป็นกระบวนการที่สำคัญในการตรวจสอบว่าการทดสอบมีความถูกต้อง แม่นยำ เชื่อถือได้ และสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ การทดสอบด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Abaqus ในงานวิจัยนี้ได้มีการตรวจสอบความถูกต้องในการตั้งค่าแรงกระทำ (Load) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแต่ละชิ้นส่วน (Interaction) และขอบเขตการเคลื่อนที่ (Boundary condition) ของตัวแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟ โดยทดลองสร้างแบบจำลองโครงสร้างรางรถไฟแบบท่อนเดี่ยวอ้างอิงจากงานวิจัยของ Krishnamoorthy et al., 2018 [16] แล้วนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบระหว่างผลจากแบบที่สร้างขึ้นกับผลจากแบบที่ได้อ้างอิง จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบทั้งสองแบบพบว่า ผลลัพธ์จากการทดสอบมีค่าที่ใกล้เคียงกัน มีความคลาดเคลื่อนเพียงร้อยละ 4.48 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการตั้งค่าค่าแรงกระทำ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแต่ละชิ้นส่วน และขอบเขตการเคลื่อนที่ของตัวแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟของงานวิจัยนี้เป็นการตั้งค่าที่ใกล้เคียงกับความถูกต้อง มีความเหมาะสม และสามารถนำไปใช้กับการดำเนินการทดสอบด้วยโปรแกรม Abaqus ตามที่ได้วางแผนไว้ต่อไป

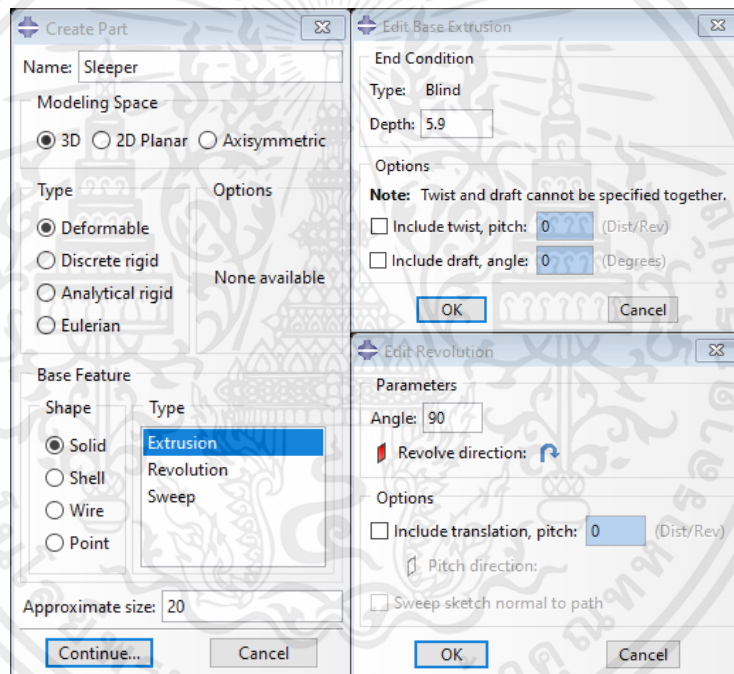


รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Von Mises Stress กับความหนาของแผ่นรองคอนกรีต

3.5 การสร้างแบบจำลองโครงสร้างรางรถไฟในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Abaqus

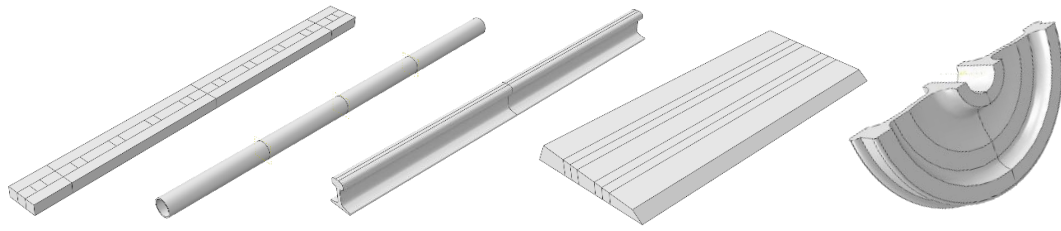
3.5.1 การสร้างชิ้นส่วนสำหรับการสร้างแบบจำลอง (Part)

ในแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Abaqus จำเป็นต้องสร้างแต่ละชิ้นส่วนขององค์ประกอบโครงสร้างทางรถไฟขึ้นมาด้วยขนาด รูปร่าง หน้าตัดที่เสมือนจริงหรือใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด เพื่อให้ได้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับผลลัพธ์หรือพฤติกรรมจริงที่อาจเกิดขึ้นมากที่สุดในการทดสอบจริง การสร้างแต่ละชิ้นส่วนนั้นจะใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้รวบรวมมาก่อนหน้านี้ในการสร้างแบบจำลองขึ้นมาด้วยโปรแกรม Abaqus โดยสามารถทำได้โดยการเลือกใช้คำสั่ง Part > Create Part > เลือกประเภทของชิ้นส่วน > Continue > วาดหน้าตัดของชิ้นส่วน > Done > กำหนดค่าความลึก หรือองศาการหมุนรอบของชิ้นส่วน > OK ดังที่แสดงในรูปที่ 3.5



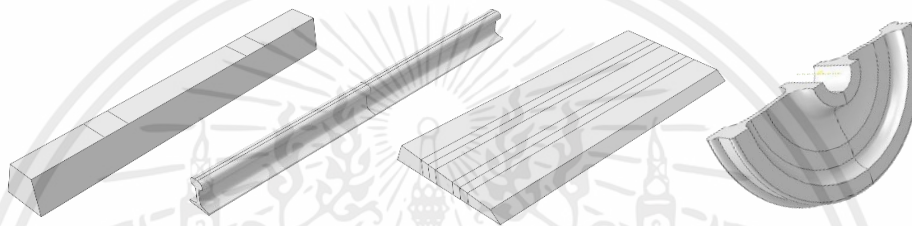
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Part

โครงสร้างทางรถไฟที่ใช้หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได มีส่วนประกอบหลักอยู่ 6 ชิ้นส่วนด้วยกัน คือ หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได ท่อเหล็กเชื่อมระหว่างหมอนคอนกรีต รางรถไฟ หินโรยทาง และล้อรถไฟ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ชิ้นส่วนในแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได

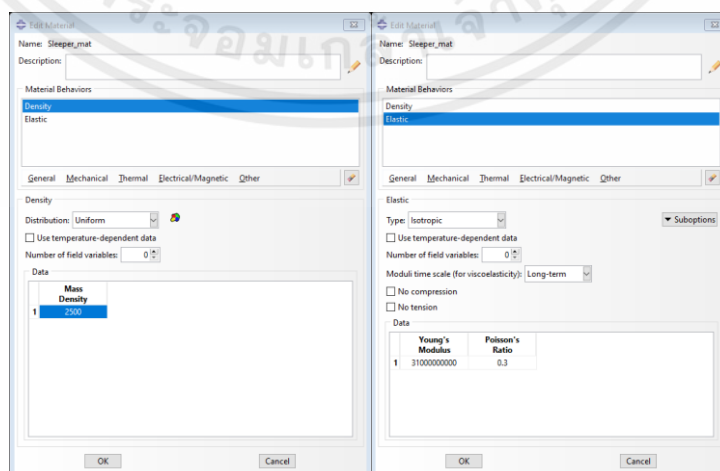
โครงสร้างทางรถไฟที่ใช้หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว มีส่วนประกอบหลักอยู่ 4 ชิ้นส่วนด้วยกัน คือ หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว รางรถไฟ หินโรยทาง และล้อรถไฟ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ชิ้นส่วนในแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

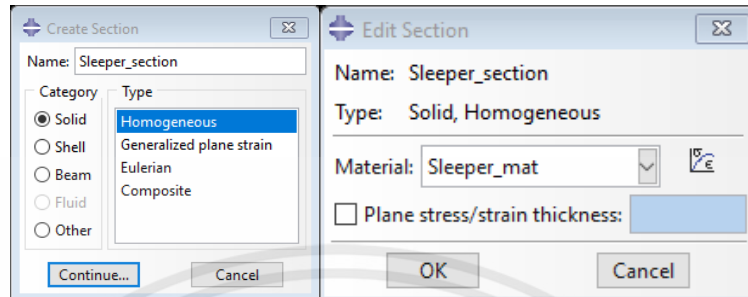
3.5.2 การตั้งค่าคุณสมบัติของวัสดุในแบบจำลอง (Property)

การตั้งค่าคุณสมบัติของวัสดุมีผลต่อความถูกต้องเหมาะสม ประสิทธิภาพ และความปลอดภัยในการออกแบบ การใช้ค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ถูกต้องหรือใกล้เคียงกับความเป็นจริงจะช่วยปรับปรุงการออกแบบ และประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมมากที่สุดได้ การตั้งค่าคุณสมบัติของวัสดุสามารถทำได้โดยการเลือกที่คำสั่ง Property > Create Material > กำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.8

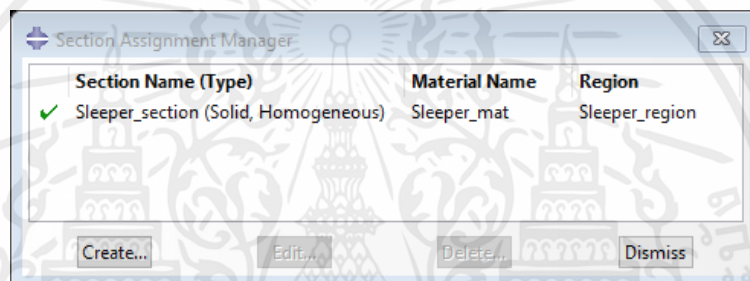


รูปที่ 3.8 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Material

จากนั้นจึงเลือกที่คำสั่ง Create Section > กำหนด Category และ Type > Continue > กำหนด Material > OK ดังที่แสดงในรูปที่ 3.9 แล้วจึงเลือกคำสั่ง Assign Section > กำหนด Region และ Section > OK ดังที่แสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Section



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Assign Section

3.3.1.1 คุณสมบัติของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได

หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดที่ได้ออกแบบขึ้นมาจะมีลักษณะการวางมนแนวแกนที่ขนานไปกับรางรถไฟ และวางอยู่บนหินโรยทาง ออกแบบมาเพื่อเพิ่มสมรรถนะในการรับแรงกระทำด้านข้างให้แก่ตัวรางรถไฟ และตัวหมอนคอนกรีต พร้อมทั้งเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานโครงสร้างทางรถไฟให้มากยิ่งขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองชิ้นส่วนหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดขึ้นมาด้วยโปรแกรม Abaqus ซึ่งมีการตั้งค่าคุณสมบัติ [22] ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได

โครงสร้าง	ความหนาแน่น (Density) (กก./ลบ.ม.)	โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) (ปาสคัล)	อัตราส่วนปัวซอง (Poisson' Ratio)
หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได	2500	3100000000	0.3

3.3.1.2 คุณสมบัติของหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

หมอนคอนกรีตที่ใช้ในโครงสร้างทางรถไฟในประเทศไทยนั้นจะเป็นชิ้นส่วนที่วางในแนวแกนที่ตั้งฉากกับรางรถไฟ และวางอยู่บนหินโรยทาง มีประโยชน์เพื่อให้การเดินทางของขบวนรถไฟปลอดภัย โดยในงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองชิ้นส่วนหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยวขึ้นมาด้วยโปรแกรม Abaqus ซึ่งมีการตั้งค่าคุณสมบัติ [22] ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

โครงสร้าง	ความหนาแน่น (Density) (กก./ลบ.ม.)	โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) (ปาสคัล)	อัตราส่วนปัวซอง (Poisson' Ratio)
หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว	2500	31000000000	0.3

3.3.1.3 คุณสมบัติของรางรถไฟ ล้อรถไฟ และท่อเหล็ก

รางรถไฟ ล้อรถไฟ และท่อเหล็กเชื่อมระหว่างหมอนคอนกรีตแบบชิ้นบันไดเป็นชิ้นส่วนที่สร้างขึ้นด้วยเหล็ก ในงานวิจัยนี้จึงเลือกค่าคุณสมบัติของเหล็กมาใช้งานกับชิ้นส่วนทั้งสาม โดยมีการตั้งค่าคุณสมบัติ [22] ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของรางรถไฟ และล้อรถไฟ

โครงสร้าง	ความหนาแน่น (Density) (กก./ลบ.ม.)	โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) (ปาสคัล)	อัตราส่วนปัวซอง (Poisson' Ratio)
รางรถไฟ	7850	210000000000	0.3
ล้อรถไฟ	7850	210000000000	0.3
ท่อเหล็ก	7850	210000000000	0.3

3.3.1.4 คุณสมบัติของหินโรยทาง

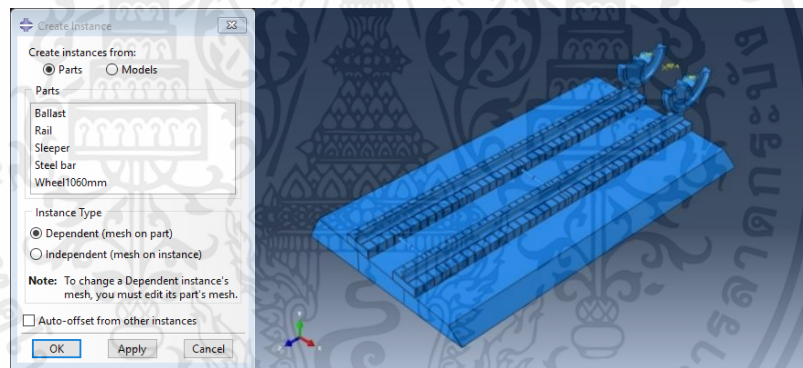
หินโรยทางคือหินบด หรือหินกรวดที่โรยอยู่ใต้โครงสร้างทางรถไฟ มีหน้าที่หลักในการช่วยเป็นฐานที่มั่นคง อีกทั้งช่วยกระจายน้ำหนักจากโครงสร้างทางรถไฟ และป้องกันไม่ให้ตัวโครงสร้างเกิดการเคลื่อนไหว หรือเสียรูปไปตามกาลเวลา โดยจากการสร้างชิ้นส่วนจำลองหินโรยทางด้วยโปรแกรม Abaqus ได้มีการตั้งค่าคุณสมบัติของชิ้นส่วนไว้ [22] ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของหินโรยทาง

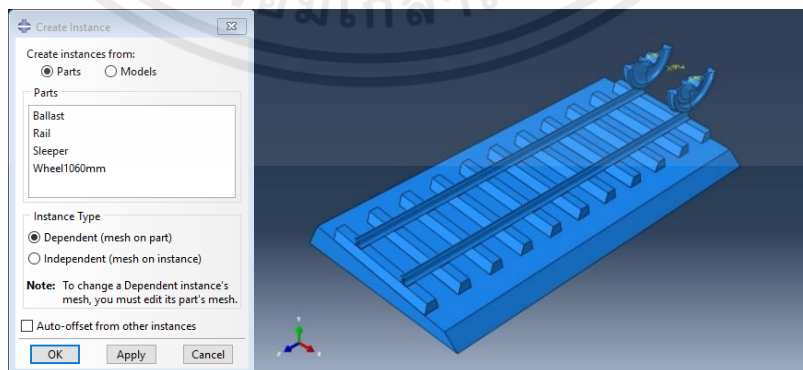
โครงสร้าง	ความหนาแน่น (Density) (กก./ลบ.ม.)	โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) (ปาสคัล)	อัตราส่วนปัวซอง (Poisson' Ratio)
หินโรยทาง	1600	200000000	0.35

3.5.3 การประกอบแต่ละชิ้นส่วนเข้าด้วยกันเป็นแบบจำลอง (Assembly)

หลังจากที่สร้างแต่ละชิ้นส่วนขององค์ประกอบโครงสร้างทางรถไฟ และมีการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชิ้นส่วนแล้ว ต่อมาจึงทำการประกอบแต่ละชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน โดยสามารถทำได้ด้วยการใช้คำสั่ง Assembly > Create Instance > เลือกชิ้นส่วนที่ต้องการนำเข้าไป > OK แล้วนำมาจัดวางเข้าด้วยกันเป็นโครงสร้างทางรถไฟ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.11 สำหรับโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได และแสดงในรูปที่ 3.12 สำหรับโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว



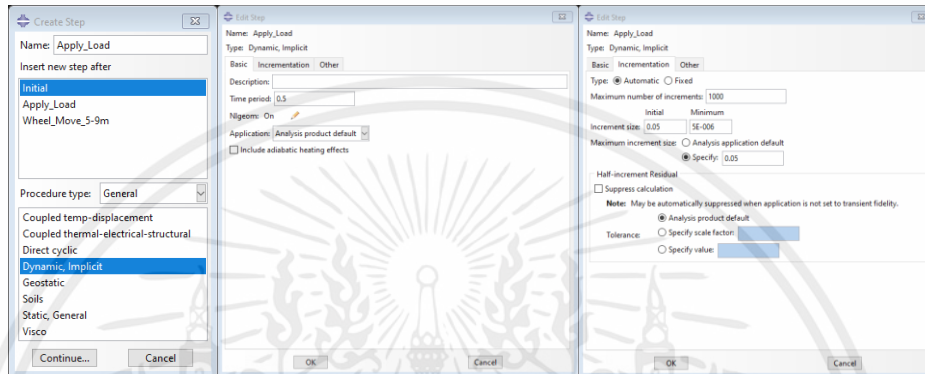
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Instance สำหรับโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Instance สำหรับโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

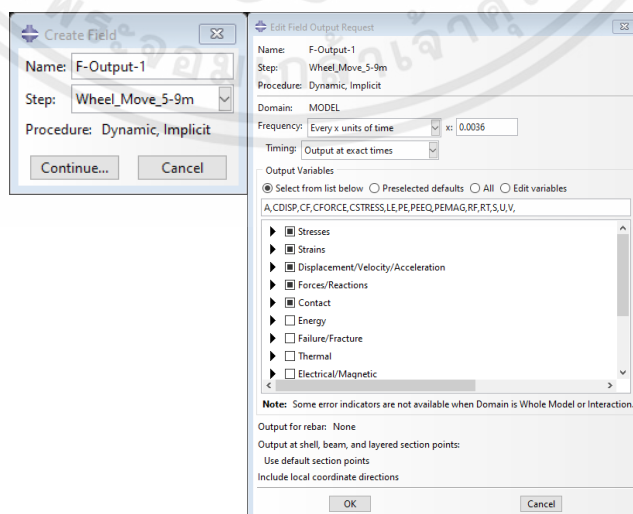
3.5.4 การตั้งค่ารูปแบบการวิเคราะห์ และรูปแบบของผลลัพธ์ (Step)

ในการทดสอบโครงสร้างทางรถไฟจะถูกแบ่งออกเป็นสองช่วงหลัก คือ ช่วงจำลองแรงกระทำแบบสถิต (Static load) ให้ล้อสัมผัสกับรางอย่างเต็มที่ ก่อนจะเข้าสู่ช่วงจำลองแรงกระทำแบบไดนามิก (Dynamic load) ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเคลื่อนที่ของล้อขณะสัมผัสกับตัวราง การตั้งค่ารูปแบบการวิเคราะห์สามารถทำได้โดยการเลือกคำสั่ง Step > Create Step > Dynamic, Implicit > Continue > กำหนด Time period > กำหนด Incrementation > OK ดังที่แสดงในรูปที่ 3.13

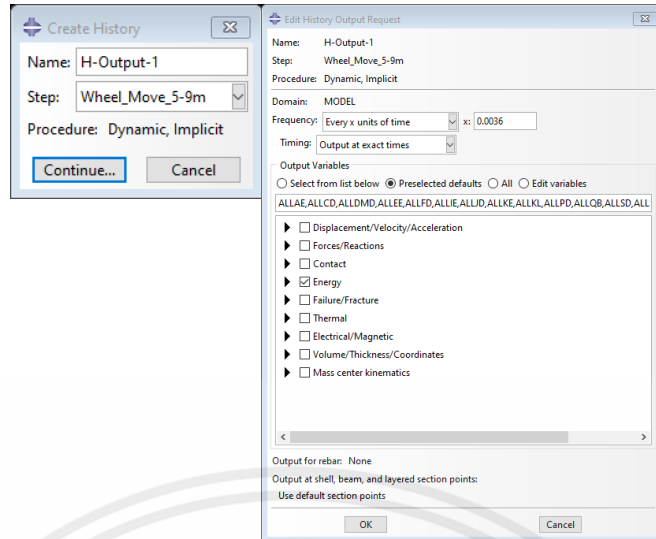


รูปที่ 3.13 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Step

ผลลัพธ์ที่ต้องการจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม Abaqus คือ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้น (Stresses) และการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นของแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟ (Displacement) การตั้งค่ารูปแบบของผลลัพธ์สามารถทำได้โดยการเลือกที่คำสั่ง Step > Create Field Output > กำหนด Step > กำหนด Domain > กำหนด Frequency และ n > กำหนด Output Variables ดังที่แสดงในรูปที่ 3.14 และใช้คำสั่ง Step > Create History Output ดังที่แสดงในรูปที่ 3.15



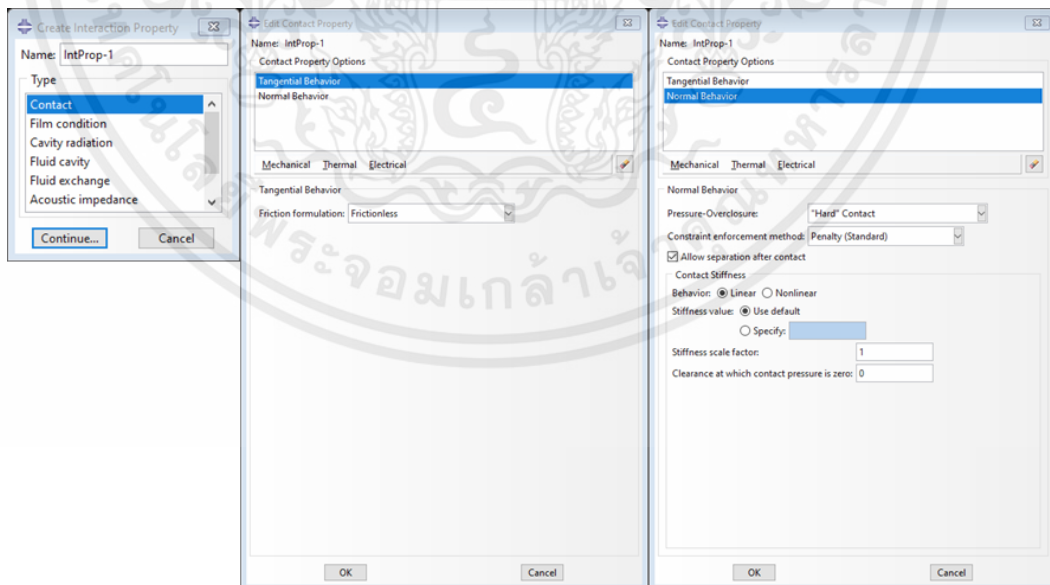
รูปที่ 3.14 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Field Output



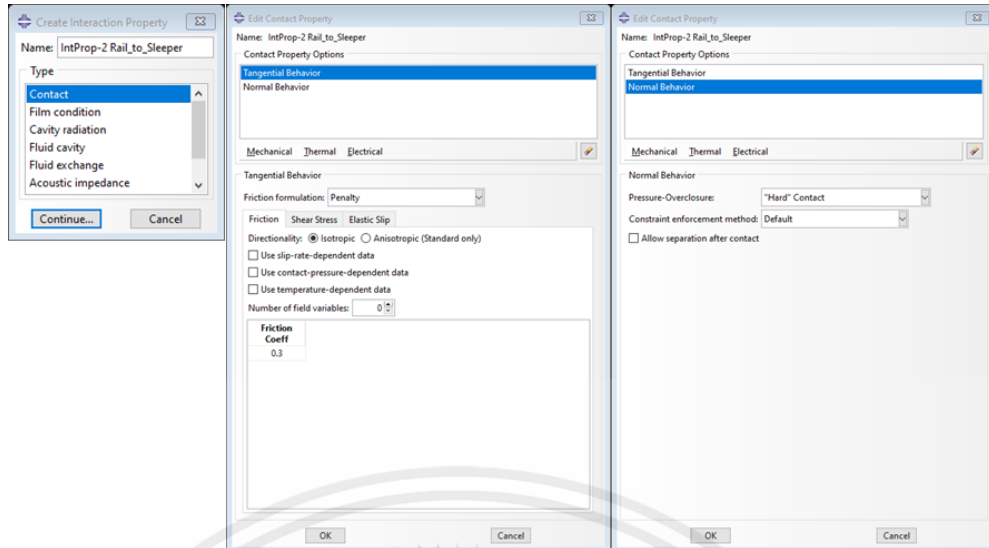
รูปที่ 3.15 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create History Output

3.5.5 การตั้งค่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างชิ้นส่วนในแบบจำลอง (Interaction)

การตั้งค่าคุณสมบัติของปฏิสัมพันธ์ระหว่างชิ้นส่วนสามารถทำได้โดยการเลือกใช้คำสั่ง Interaction > Create Interaction Property > กำหนด Type > Continue > กำหนด และตั้งค่า Contact Property Options > OK ดังที่แสดงในรูปที่ 3.16 สำหรับจำลองการเคลื่อนที่ของล้อขณะหมุนโดยไม่นำแรงเสียดทานมาพิจารณา และแสดงในรูปที่ 3.17 สำหรับจำลองเมื่อวัตถุเคลื่อนตัวโดยพิจารณาแรงเสียดทานร่วมในแรงกระทำ

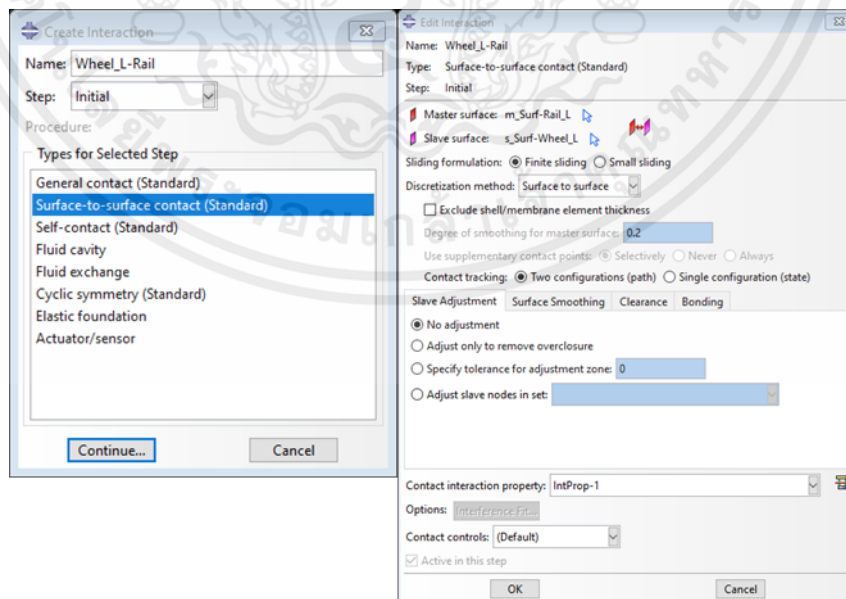


รูปที่ 3.16 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Interaction Property สำหรับแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

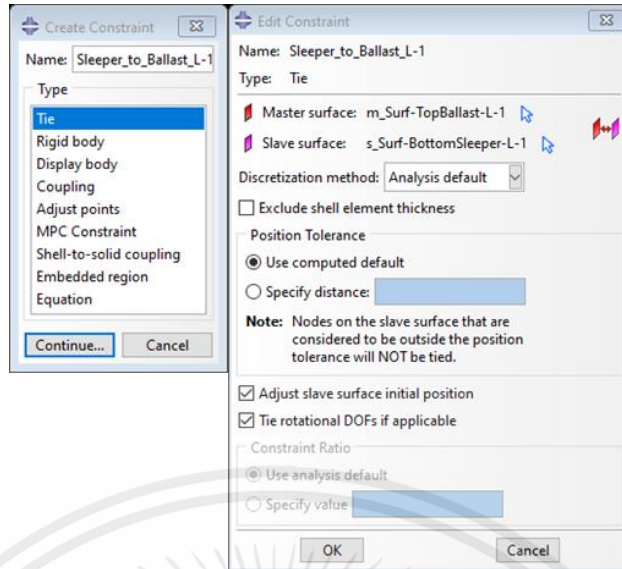


รูปที่ 3.17 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Interaction Property สำหรับแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได

สำหรับโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตทั้งสองรูปแบบที่ต่างกันสามารถตั้งค่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อรถไฟกับรางรถไฟได้โดยการเลือกใช้คำสั่ง Interaction > Create Interaction > กำหนด Step > กำหนดประเภท Surface-to-surface contact > Continue > กำหนดหน้าต่างตัดที่มีปฏิสัมพันธ์กัน > OK ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และมีการตั้งค่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างผิวด้านใต้หมอนคอนกรีตกับผิวด้านบนของหินโรยทางได้โดยการเลือกใช้คำสั่ง Interaction > Create Constraint > Tie > กำหนดหน้าต่างตัดที่มีปฏิสัมพันธ์กัน > OK ดังแสดงในรูปที่ 3.19

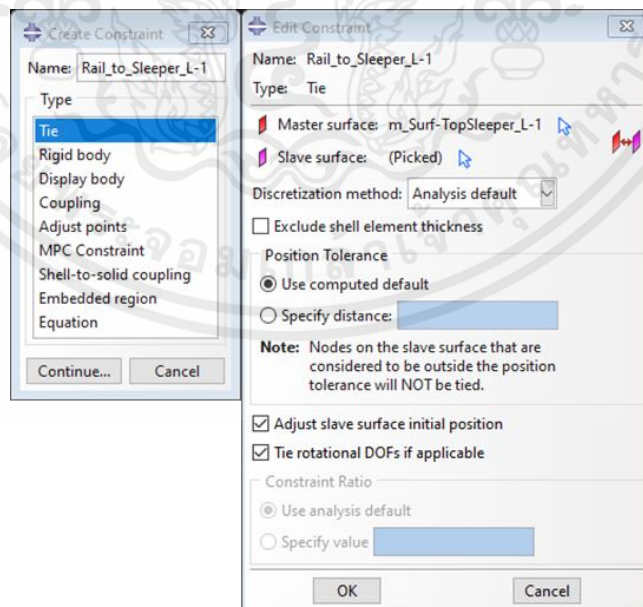


รูปที่ 3.18 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Interaction สำหรับจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อรถไฟกับรางรถไฟ



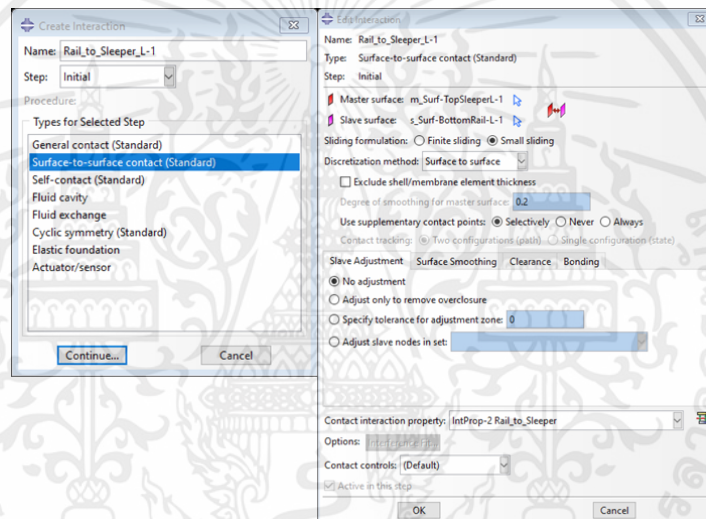
รูปที่ 3.19 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Constraint สำหรับจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างผิวด้านใต้หมอนคอนกรีตกับผิวด้านบนของหินโรยทาง

สำหรับโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยวสามารถตั้งค่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างผิวด้านใต้ของรางรถไฟกับผิวด้านบนของหมอนคอนกรีตได้โดยการเลือกใช้คำสั่ง Interaction > Create Constraint > Tie > กำหนดหน้าตัดที่มีปฏิสัมพันธ์กัน > OK ดังแสดงในรูปที่ 3.20 เป็นการจำลองเสมือนรางรถไฟยึดติดอยู่กับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยวด้วยตัวยึดเหนี่ยวราง (Fastener)

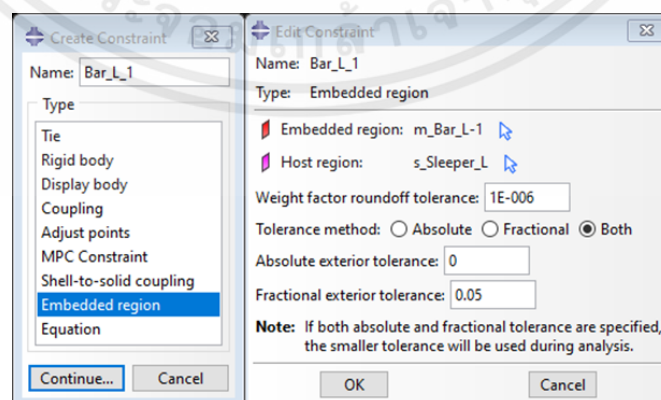


รูปที่ 3.20 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Constraint สำหรับจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างผิวด้านใต้ของรางรถไฟกับผิวด้านบนของหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

สำหรับโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดสามารถตั้งค่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างผิวด้านใต้ของรางรถไฟกับผิวด้านบนของหมอนคอนกรีตได้โดยการเลือกใช้คำสั่ง Interaction > Create Interaction > กำหนด Step > กำหนดประเภท Surface-to-surface contact > Continue > กำหนดหน้าตัดที่มีปฏิสัมพันธ์กัน > กำหนด Contact interaction property > OK ดังแสดงในรูปที่ 3.21 เป็นการจำลองเสมือนรางรถไฟยึดติดอยู่กับหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดด้วยตัวยึดเหนี่ยววางในรูปแบบที่มีแผ่นรองรางยาวแบบต่อเนื่อง (Continuous rail pad) คอยรองรับ และสามารถตั้งค่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างท่อเหล็กเชื่อมระหว่างหมอนคอนกรีตกับหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดได้โดยการเลือกใช้คำสั่ง Interaction > Create Constraint > Embedded region > กำหนดหน้าตัดที่มีปฏิสัมพันธ์กัน > OK ดังแสดงในรูปที่ 3.22 เป็นการจำลองการฝังท่อเหล็กเข้าไปในหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดเพื่อช่วยรับแรงกระทำในแนวด้านข้างได้ดียิ่งขึ้น



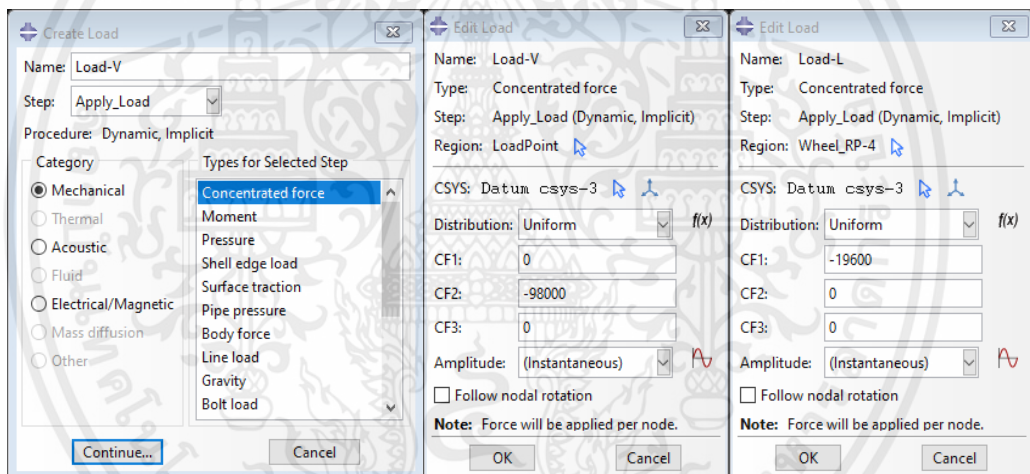
รูปที่ 3.21 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Interaction สำหรับจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างผิวด้านใต้ของรางรถไฟกับผิวด้านบนของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได



รูปที่ 3.22 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Constraint สำหรับจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างท่อเหล็กเชื่อมระหว่างหมอนคอนกรีตกับหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได

3.5.6 การตั้งค่าแรงกระทำในแบบจำลอง (Load)

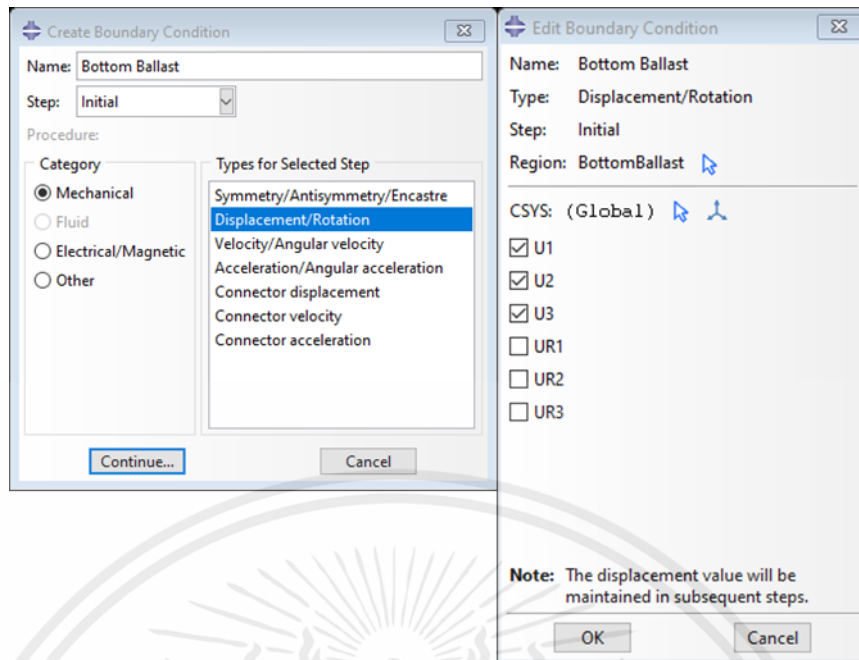
ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การจำลองแรงกระทำขณะที่รถไฟเคลื่อนที่ หรือเป็นแรงกระทำแบบไดนามิก โดยการทดสอบได้แยกย่อยออกไปเป็นการจำลองเมื่อมีอัตราส่วนแรงกระทำทางด้านข้างต่อแรงกระทำในแนวตั้งเท่ากับ 0.0 0.2 0.4 และ 0.8 ซึ่งการตั้งค่าแรงกระทำจะแบ่งออกเป็นสองทิศทาง คือ แรงกระทำในแนวตั้ง และแรงกระทำในแนวด้านข้าง โดยในแบบจำลองแต่ละแบบมีแรงกระทำในแนวด้านข้างที่แตกต่างกันออกไป มีแรงกระทำในแนวตั้งจำลองจากน้ำหนักบรรทุกทุกจากเพลลา 20 ตัน แบ่งน้ำหนักบรรทุกทุกลงล้อทั้งสองข้าง ข้างละ 10 ตัน หรือ 98000 นิวตัน และมีแรงกระทำด้านข้างตามอัตราส่วนแรงกระทำทางด้านข้างต่อแรงกระทำในแนวตั้งเท่ากับ 0 นิวตัน 19600 นิวตัน 39200 นิวตัน และ 78400 นิวตัน ตามลำดับ การตั้งค่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างชิ้นส่วนสามารถทำได้โดยการเลือกที่คำสั่ง Load > Create Load > กำหนดหมวดหมู่ และประเภทของแรงกระทำ > Continue > เลือกตำแหน่งที่ต้องการใส่แรงกระทำ > กำหนดค่าของแรงกระทำ > OK ดังที่แสดงในรูปที่ 3.23



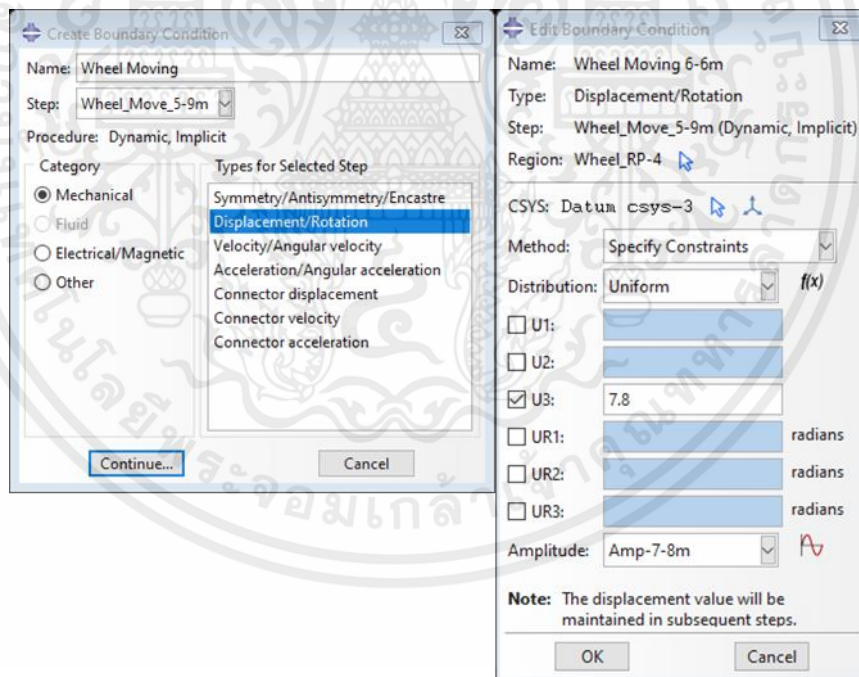
รูปที่ 3.23 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Create Load

3.5.7 การตั้งค่าขอบเขตการเคลื่อนที่ของแบบจำลอง (Boundary Condition)

ในแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟได้กำหนดให้ส่วนด้านล่างของแบบจำลอง หรือพื้นผิวด้านล่างของชิ้นส่วนหินโรยทางเป็นส่วนรองรับแบบชนิดหมุน (Pinned support) สามารถตั้งค่าขอบเขตการเคลื่อนที่ได้โดยการเลือกใช้คำสั่ง Load > Create Boundary Condition > เลือก Step > กำหนดประเภท Displacement/Rotation > Continue > กำหนดขอบเขตการเคลื่อนที่ > OK ดังที่แสดงในรูปที่ 3.24 และสามารถตั้งค่าขอบเขตการเคลื่อนที่ของล้อได้ดังที่แสดงในรูปที่ 3.25



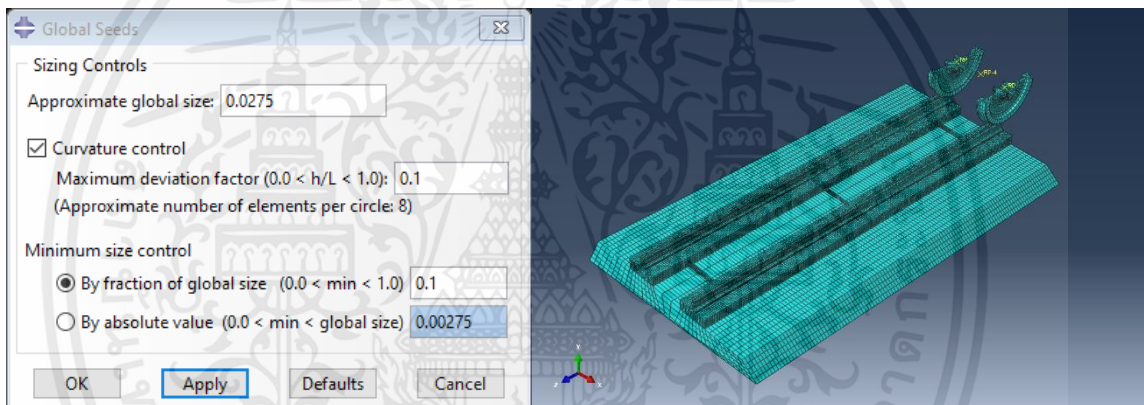
รูปที่ 3.24 ตัวอย่างการใช้คำสั่ง Create Boundary Condition สำหรับจำลองส่วนรองรับแบบชนิดหมุน



รูปที่ 3.25 ตัวอย่างการใช้คำสั่ง Create Boundary Condition สำหรับจำลองการเคลื่อนที่ของล้อรถไฟ

3.5.8 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลอง (Mesh)

การแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีการแบ่งรูปร่างหรือขอบเขตของปัญหาที่มีความซับซ้อนออกเป็นชิ้นส่วนย่อย เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) ที่มีขนาดเล็กลง เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ โดยแต่ละเอลิเมนต์ยังคงมีคุณสมบัติทางกายภาพตามที่ได้กำหนดไว้ดั้งเดิม การใช้รูปแบบ และการกำหนดจำนวนของเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับการคำนวณจึงเป็นหลักสำคัญที่ทำให้กระบวนการวิเคราะห์สามารถจำลองได้ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริงมากที่สุด [1] การแบ่งเอลิเมนต์สามารถทำได้โดยการเลือกใช้คำสั่ง Mesh > Part > เลือกชิ้นส่วน > Seed Part Instance > กำหนด Approximate global size > Apply > OK > Mesh Part > Yes ดังที่แสดงในรูปที่ 3.26 โดยค่า Approximate global size หรือขนาดของเอลิเมนต์ที่ต้องการแบ่งควรทำการทดสอบการปรับปรุงเครือข่ายเอลิเมนต์ (Mesh convergence) หาขนาดที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ก่อนนำไปใช้งาน



รูปที่ 3.26 ตัวอย่างวิธีการใช้คำสั่ง Seed Part Instance และ Mesh Part

3.6 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากทางคณะผู้จัดทำได้รวบรวมข้อมูลและตรวจสอบความถูกต้องเรียบร้อยแล้ว จึงได้ทำการนำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาใส่ในโปรแกรม Abaqus เพื่อประมวลผล และคำนวณหาค่าแรงกระทำที่เกิดขึ้นภายใต้ระบบราง โดยมุ่งเน้นที่ค่าความต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างของหมอนคอนกรีตในแต่ละแบบจำลอง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. ใช้โปรแกรม Abaqus สร้างแบบจำลองโครงสร้างรางที่ใช้หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได และแบบท่อนเดียว โดยอ้างอิงพารามิเตอร์จากงานวิจัยที่รวบรวมมา
2. ทดลองใส่แรงแบบไดนามิก และคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Abaqus
3. ตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหมอนคอนกรีตกับสมการที่ 2.7 [7]
4. เปรียบเทียบแรงกระทำทางด้านข้างที่ได้จากแบบจำลอง ถ้าค่าที่ได้ของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดมีน้อยกว่าจึงจะถือว่ามีประสิทธิภาพในการลดแรงกระทำทางด้านข้างได้ดีกว่า

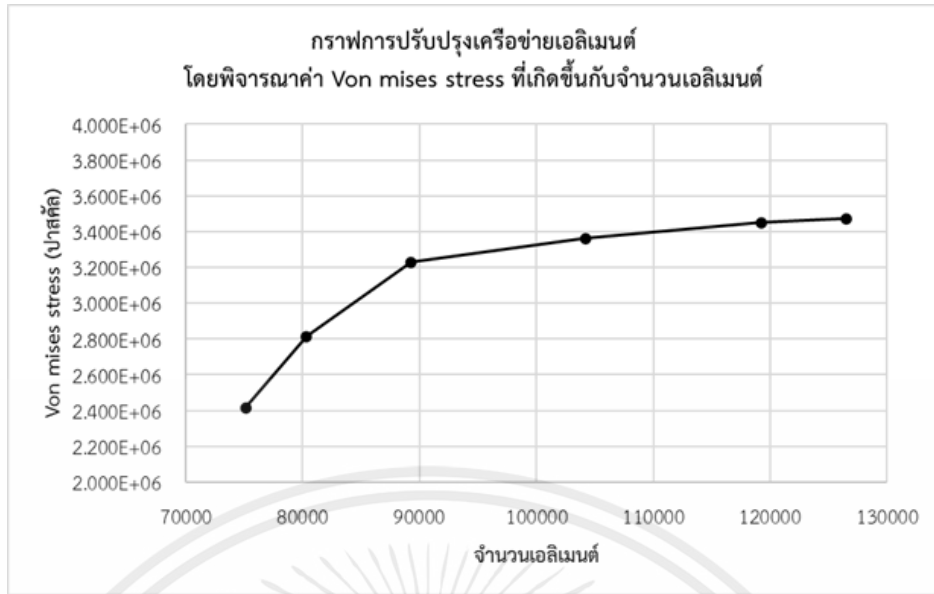
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

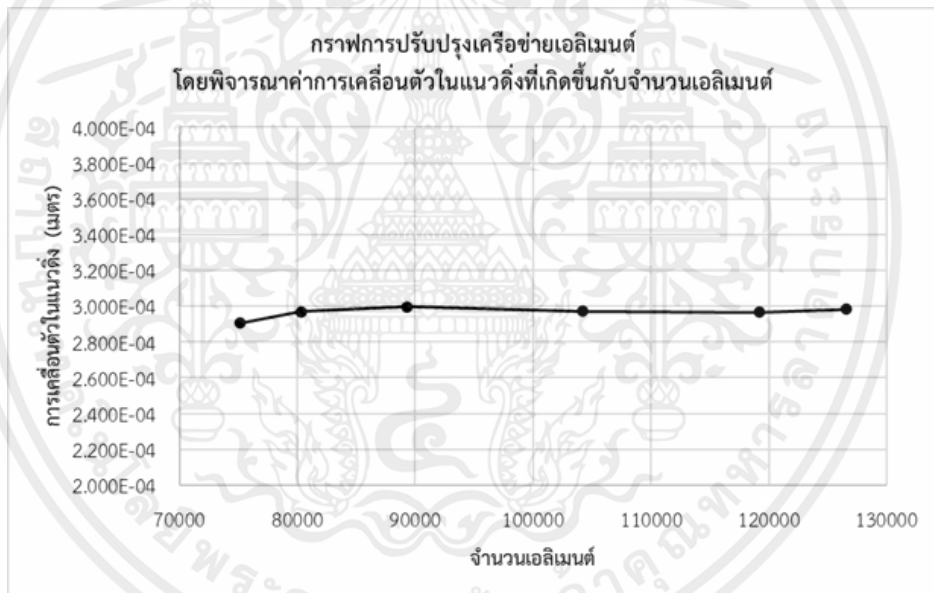
จากการศึกษา วิเคราะห์และออกแบบพัฒนาหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดเพื่อเพิ่มสมรรถนะในการรองรับแรงกระทำทางด้านข้างบนทางรถไฟ ได้จำลองโครงสร้างทางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดโดยจำลองผ่านโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Abaqus ทำการจำลองโครงสร้างทางรถไฟทั้งขณะที่ไม่ได้ยกโค้ง และขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร โดยที่ค่าอัตราส่วนแรงกระทำทางด้านข้างต่อแรงกระทำในแนวตั้งเท่ากับ 0.2 0.4 และ 0.8 จากนั้นสังเกตแรงกระทำทางด้านข้างและแนวตั้งโดยสังเกตแรงกระทำที่เกิดขึ้นบริเวณหมอนคอนกรีตจากนั้นบันทึกผลและเปรียบเทียบค่าที่ได้จากหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยวที่ถูกจำลองผ่านโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Abaqus

4.1 การตรวจสอบการปรับปรุงเครือข่ายเอลิเมนต์ (Mesh convergence)

การตั้งค่าความละเอียดของเอลิเมนต์ที่ต่างกันนำมาซึ่งผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากขนาดของเอลิเมนต์ต่าง ๆ สามารถนำมาประเมินอัตราการความเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ และเลือกใช้ค่าขนาดของเอลิเมนต์ที่เหมาะสมได้ การปรับปรุงเครือข่ายเอลิเมนต์จึงเป็นขั้นตอนสำคัญสำหรับการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำมาใช้ในการประมาณผลลัพธ์ที่เสถียร ถูกต้อง แม่นยำ และเชื่อถือได้ โดยจากการทดสอบจำลองโครงสร้างรถไฟขณะที่มีแรงกระทำแบบสถิตด้วยการตั้งค่าขนาดของเอลิเมนต์ที่ต่างกัน ส่งผลให้แบบจำลองในแต่ละครั้งมีจำนวนเอลิเมนต์ที่ต่างกัน ได้ผลลัพธ์ของค่าความเค้นที่เกิดขึ้น และค่าของการเคลื่อนตัวของแบบจำลองที่ต่างกัน สามารถแสดงออกมาได้ดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Von Mises Stress กับจำนวนเอลิเมนต์



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับจำนวนเอลิเมนต์

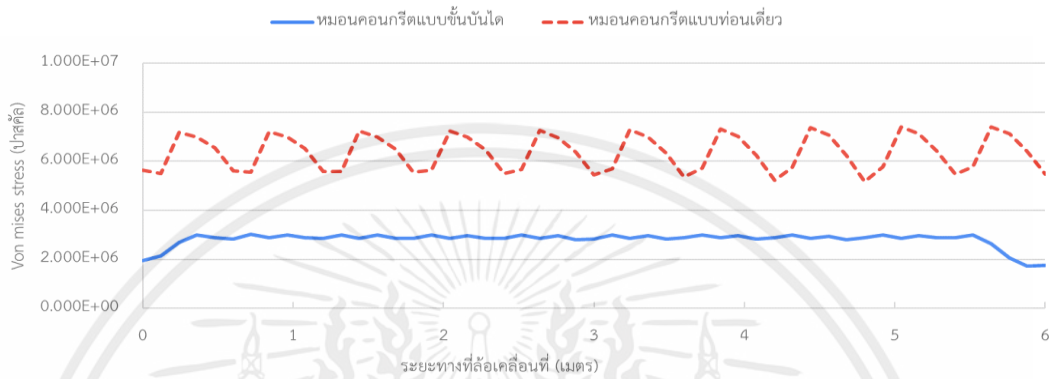
จากกราฟจะทำให้สามารถเลือกค่าที่เหมาะสมของขนาดเอลิเมนต์ในการนำไปใช้งานได้ ค่าที่เลือกนำมาใช้งานคือค่าที่ขนาดของเอลิเมนต์ที่มีขนาดเท่ากับ 0.0275 มีจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 119200 เอลิเมนต์ เป็นจุดที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ทั้งค่าของความเค้น และค่าของการเคลื่อนตัวของแบบจำลองน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ เส้นกราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง อีกทั้งยังเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้ร่วมกับการจำลองรับแรงกระทำแบบไดนามิกโดยไม่เป็นภาระต่อการคำนวณของโปรแกรมมากจนเกินไป

4.2 ผลการวิจัย

4.2.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นบนหมอนคอนกรีตระหว่างหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดกับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

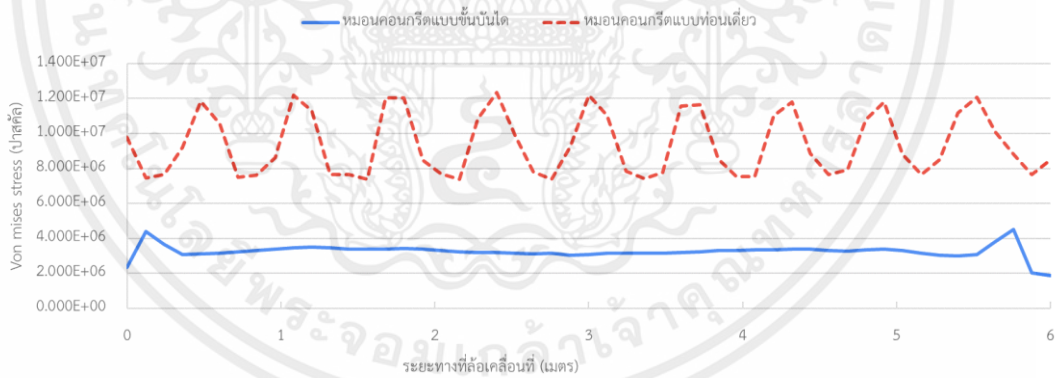
4.2.1.1 ค่า Von Mises Stress

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Von Mises Stress กับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะไม่มีการยกโค้ง)



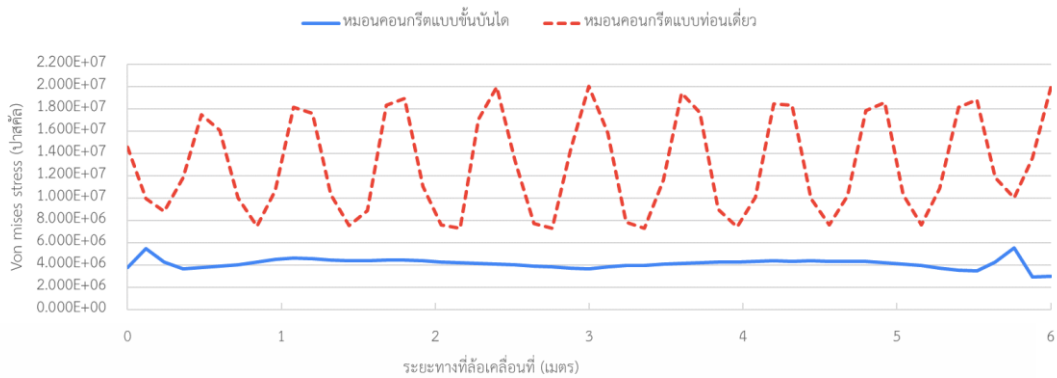
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Von Mises Stress กับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะไม่มีการยกโค้ง)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Von Mises Stress กับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มม., L/V = 0.2)



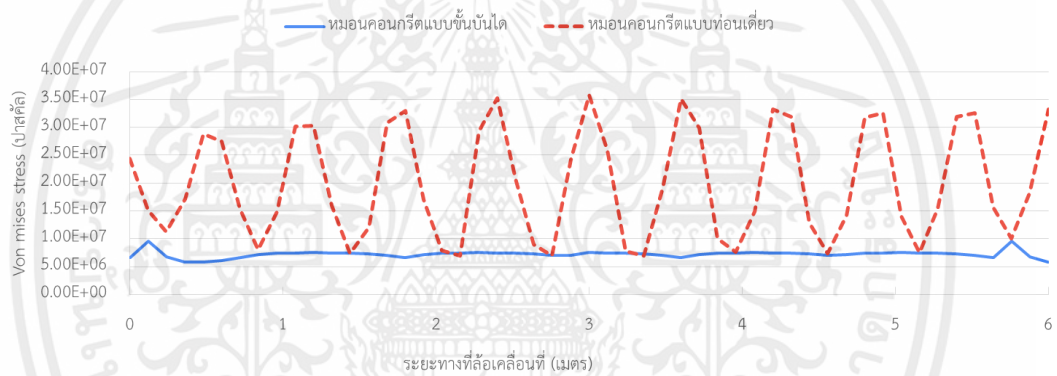
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Von Mises Stress กับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร L/V = 0.2)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Von Mises Stress กับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มม. , L/V = 0.4)



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Von Mises Stress กับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร L/V = 0.4)

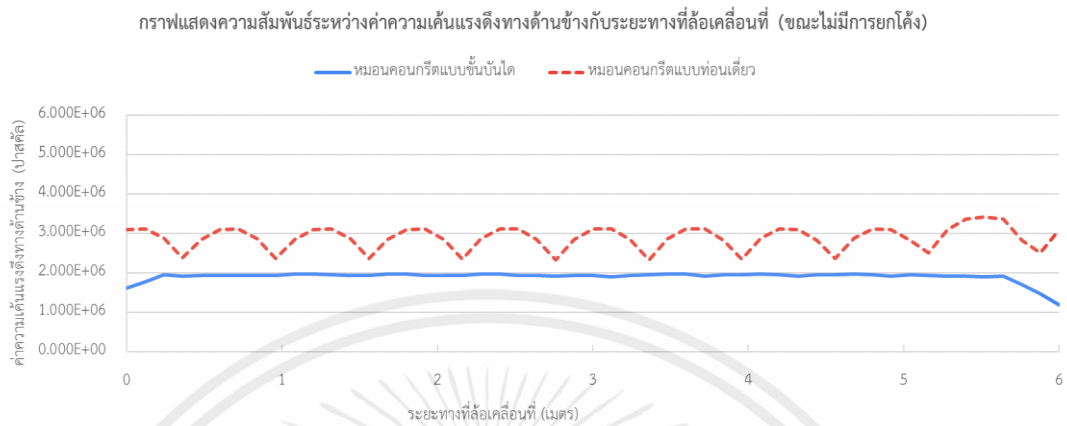
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มม. , L/V = 0.8)



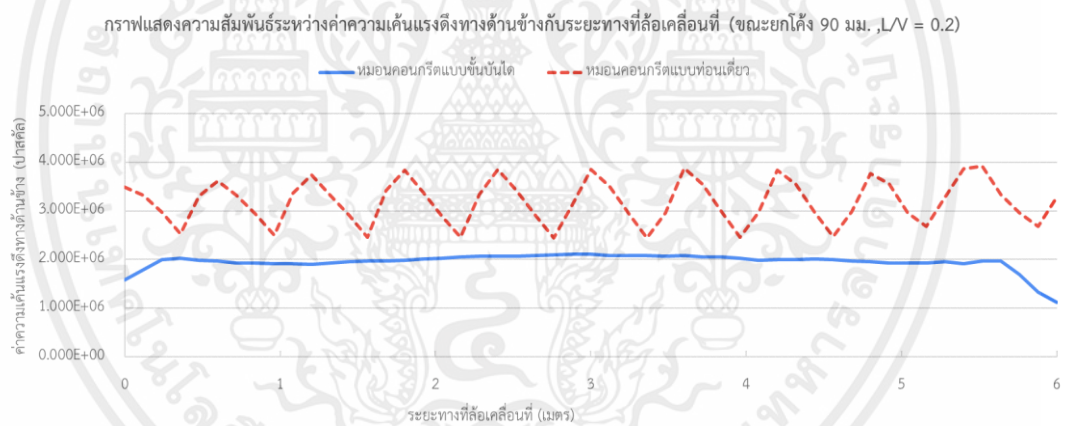
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Von Mises Stress กับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร L/V = 0.8)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Von Mises Stress กับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ ทั้งขณะที่ไม่มีการยกโค้ง หรือขณะมีการยกโค้ง 90 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วน L/V เท่ากับ 0.2 0.4 และ 0.8 พบว่าลักษณะเส้นกราฟค่า Von Mises Stress ของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดมีลักษณะใกล้เคียงเส้นตรงและค่าน้อยกว่าหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

4.2.1.2 ค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้างระหว่างหมอนคอนกรีตชั้นบนได้กับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

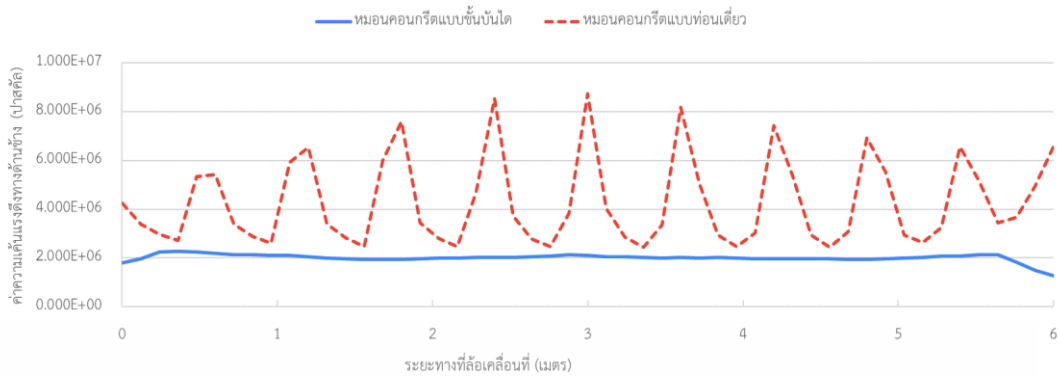


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้างกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะไม่มีการยกโค้ง)



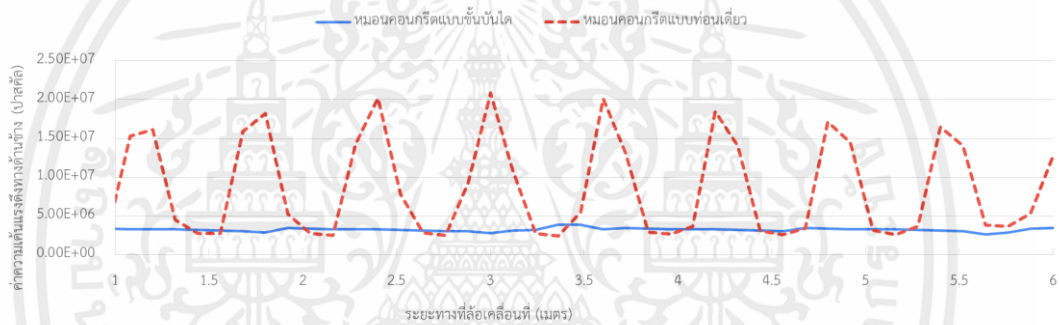
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้างกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.2$)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้างกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มม., $L/V = 0.4$)



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้างกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.4$)

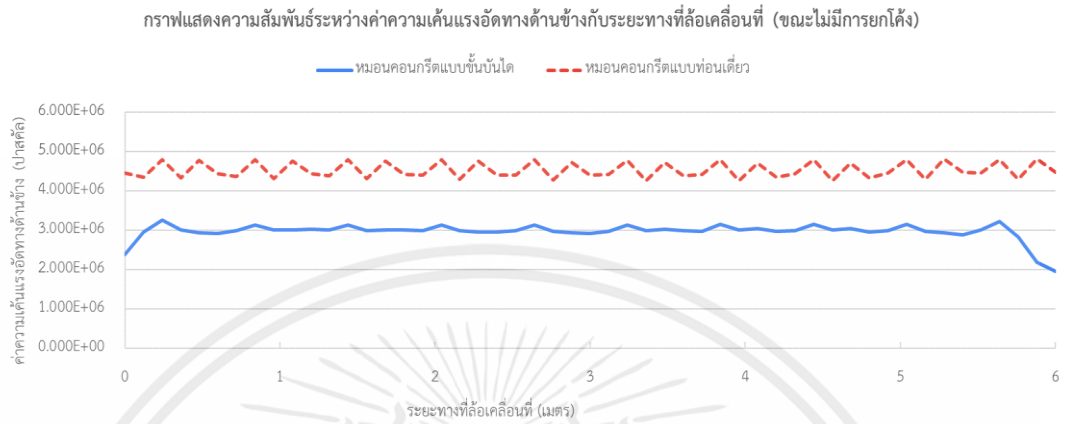
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้างกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มม., $L/V = 0.8$)



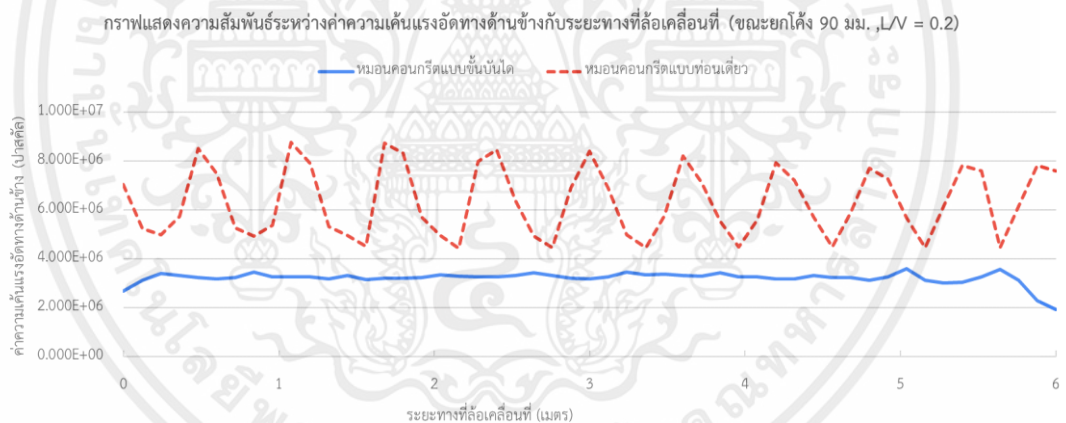
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้างกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.8$)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้างกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ ทั้งขณะที่ไม่มีการยกโค้ง หรือขณะมีการยกโค้ง 90 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วน L/V เท่ากับ 0.2 0.4 และ 0.8 พบว่าลักษณะเส้นกราฟค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้างของหมอนคอนกรีตแบบขั้นบันไดมีลักษณะใกล้เคียงเส้นตรงและค่าน้อยกว่าหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

4.2.1.3 ค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้างระหว่างหมอนคอนกรีตชั้นบนได้กับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

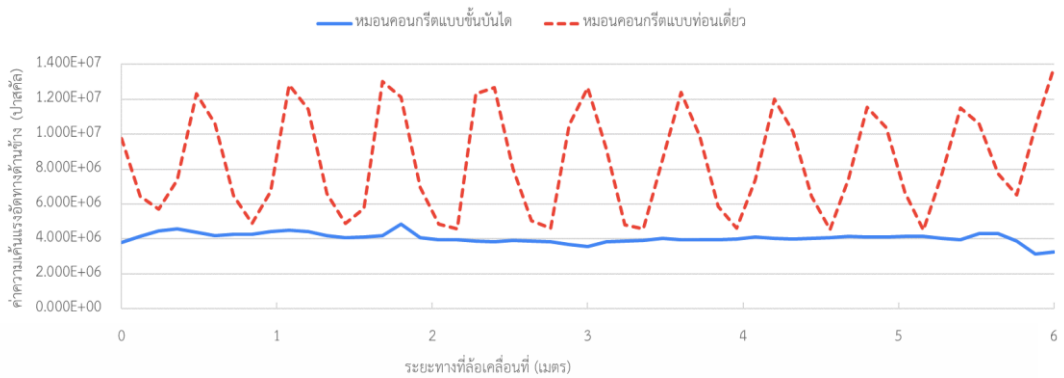


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้างกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะไม่มีการยกโค้ง)



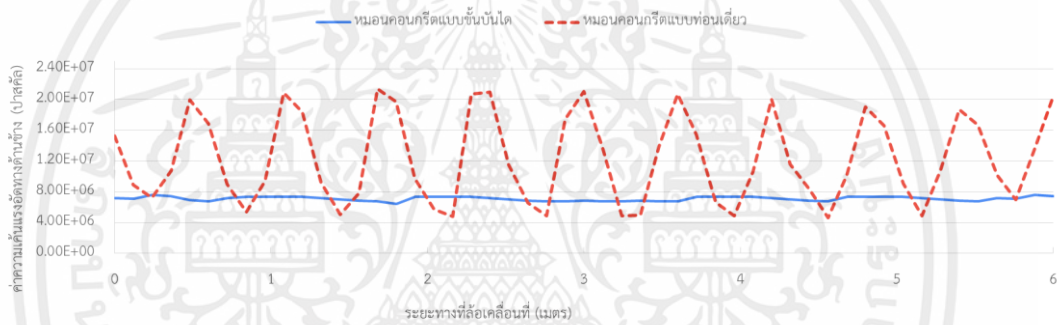
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้างกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.2$)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้างกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มม., $L/V = 0.4$)



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้างกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.4$)

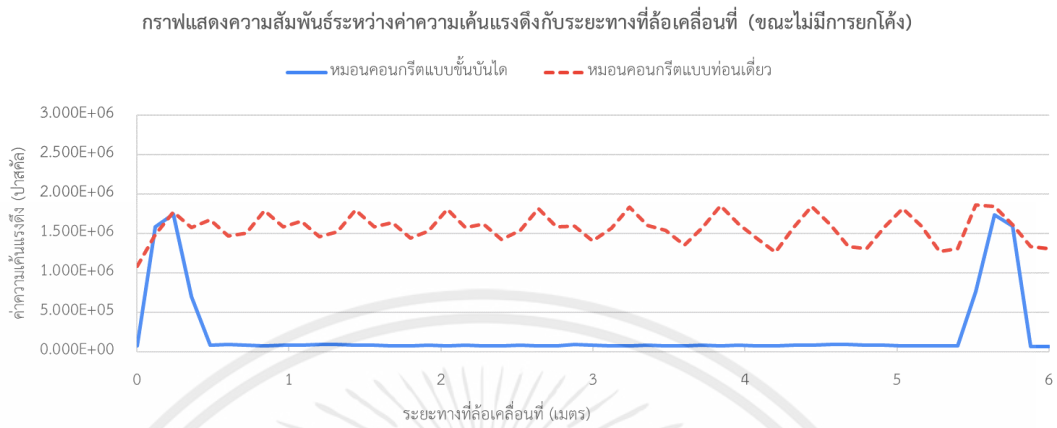
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้างกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มม., $L/V = 0.8$)



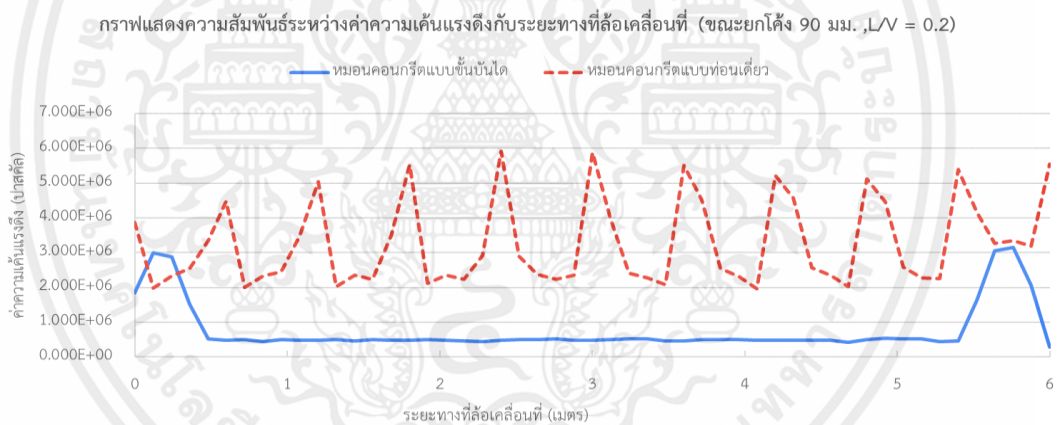
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้างกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.8$)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้างกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ ทั้งขณะที่ไม่มีการยกโค้ง หรือขณะมีการยกโค้ง 90 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วน L/V เท่ากับ 0.2 0.4 และ 0.8 พบว่าลักษณะเส้นกราฟค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้างของหมอนคอนกรีตแบบขั้นบันไดมีลักษณะใกล้เคียงเส้นตรงและค่าน้อยกว่าหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

4.2.1.4 ค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้งระหว่างหมอนคอนกรีตชั้นบนได้กับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

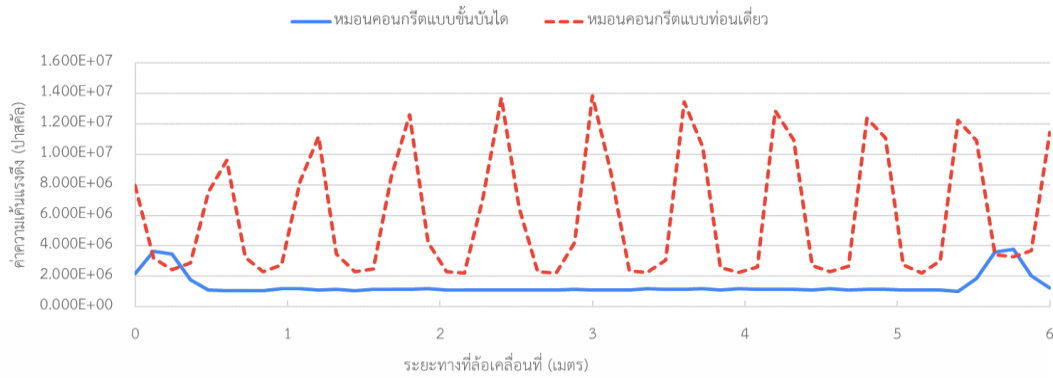


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้งกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะไม่มีการยกโค้ง)

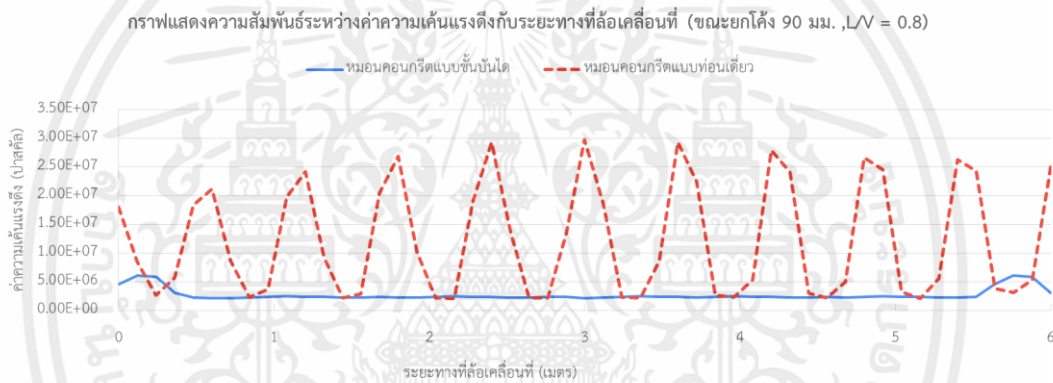


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้งกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.2$)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มม. ,L/V = 0.4)



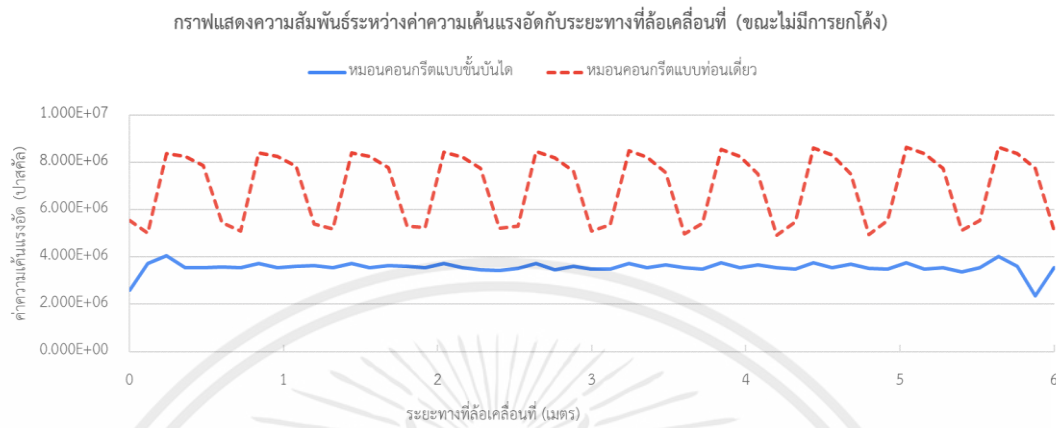
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้งกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร L/V = 0.4)



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้งกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร L/V = 0.8)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้งกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ ทั้งขณะที่ไม่มีการยกโค้ง หรือขณะมีการยกโค้ง 90 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วน L/V เท่ากับ 0.2 0.4 และ 0.8 พบว่าลักษณะเส้นกราฟค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้งของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดส่วนใหญ่มีลักษณะใกล้เคียงกัน เป็นเส้นตรง และค่าน้อยกว่าหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

4.1.2.5 ค่าความเค้นแรงอัดในแนวตั้งระหว่างหมอนคอนกรีตชั้นบนกับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดียว

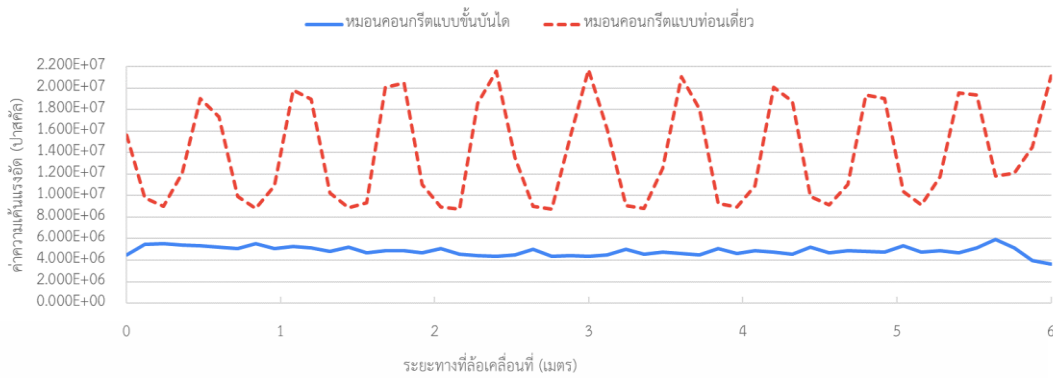


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดในแนวตั้งกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะไม่มีการยกโค้ง)



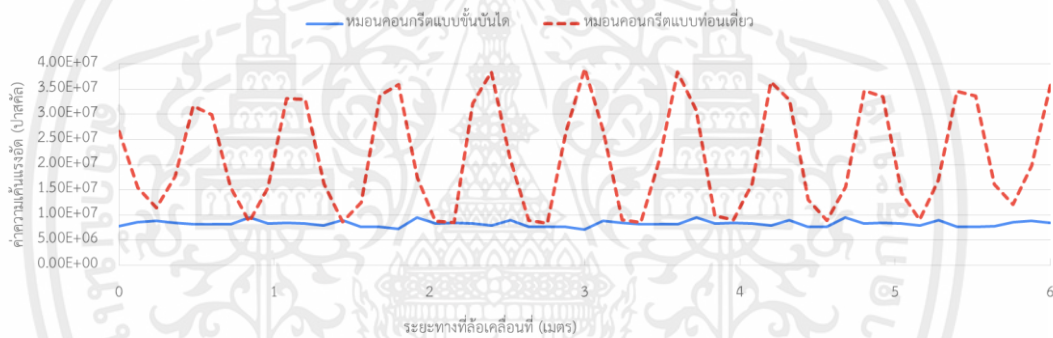
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดในแนวตั้งกับระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร L/V = 0.2)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มม., $L/V = 0.4$)



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดในแนวตั้งกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.4$)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มม., $L/V = 0.8$)

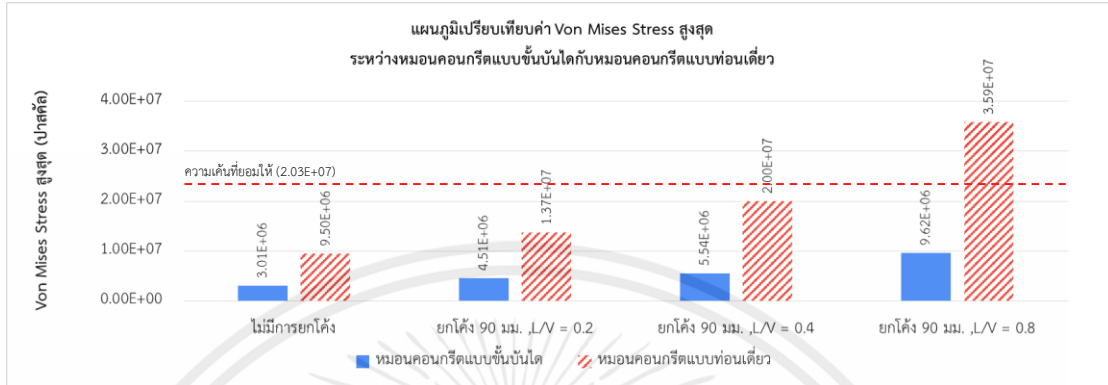


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงอัดในแนวตั้งกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ (ขณะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.8$)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้งกับระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ ทั้งกรณีที่ไม่มีกรยกโค้ง หรือขณะมีการยกโค้ง 90 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วน L/V เท่ากับ 0.2 0.4 และ 0.8 พบว่าลักษณะเส้นกราฟค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้งของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดมีลักษณะใกล้เคียงเส้นตรงและค่าน้อยกว่าหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

4.2.2 แผนภูมิเปรียบเทียบความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบนหมอนคอนกรีต

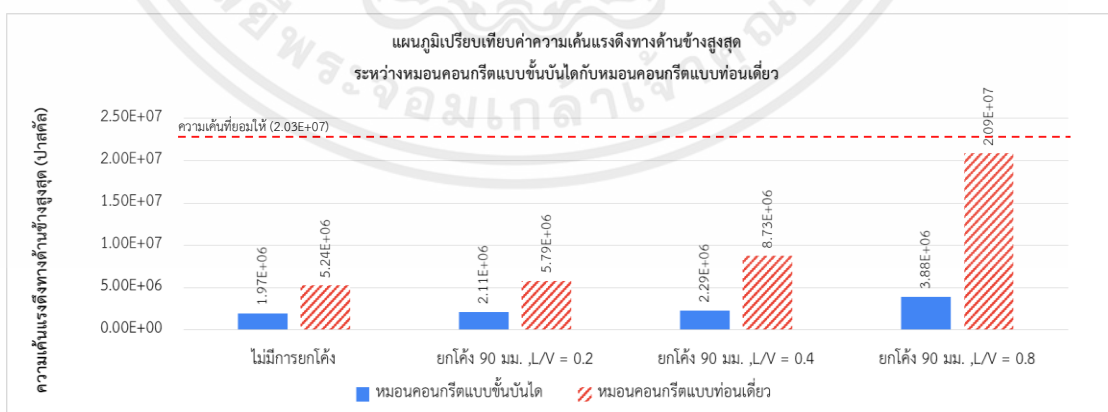
4.2.2.1 ค่า Von Mises Stress สูงสุดระหว่างหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดียวกับหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได



รูปที่ 4.23 แผนภูมิเปรียบเทียบค่า Von Mises Stress สูงสุด ระหว่างหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดเปรียบเทียบกับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

จากรูปที่ 4.23 พบว่า ค่า Von Mises Stress สูงสุดที่เกิดขึ้นบนหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นที่ยอมให้ซึ่งเท่ากับ 20300000 ปาสคัล มีค่าน้อยกว่าหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว ไม่ว่าจะเป็นขณะไม่มีการยกโค้ง หรือที่ระยะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร ขณะ L/V = 0.2 0.4 และ 0.8 โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 68.3% 67.1% 72.4% และ 73.2% ตามลำดับ

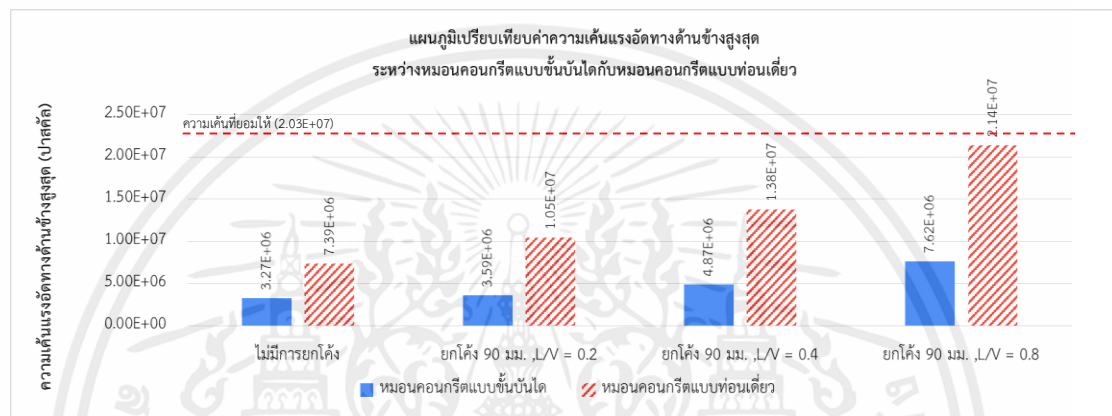
4.2.2.2 ค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้างสูงสุดระหว่างหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดียวกับหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได



รูปที่ 4.24 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้างสูงสุด ระหว่างหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดเปรียบเทียบกับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

จากรูปที่ 4.24 พบว่า ค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้างสูงสุดที่เกิดขึ้นบนหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดมีนั้นน้อยกว่าค่าความเค้นที่ยอมให้ซึ่งเท่ากับ 20300000 ปาสคัล น้อยกว่าหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว ไม่ว่าจะเป็นขณะไม่มีการยกโค้ง และที่ระยะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร ขณะ $L/V = 0.2$ 0.4 และ 0.8 โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 62.3% 63.6% 73.8% และ 81.4% ตามลำดับ

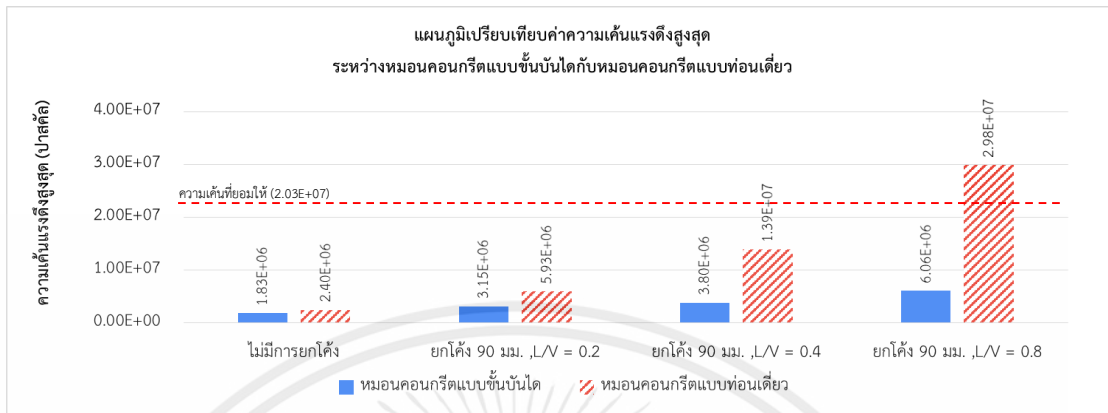
4.2.2.3 ค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้างสูงสุดระหว่างหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยวกับหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได



รูปที่ 4.25 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้างสูงสุด ระหว่างหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดเปรียบเทียบกับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

จากรูปที่ 4.25 พบว่า ค่า ความเค้นแรงอัดทางด้านข้างสูงสุดที่เกิดขึ้นที่หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดนั้นน้อยกว่าค่าความเค้นที่ยอมให้ซึ่งเท่ากับ 20300000 ปาสคัล มีน้อยกว่าหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว ไม่ว่าจะเป็นขณะไม่มีการยกโค้ง และที่ระยะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร ขณะ $L/V = 0.2$ 0.4 และ 0.8 โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 55.8% 65.7% 64.7% และ 64.4% ตามลำดับ

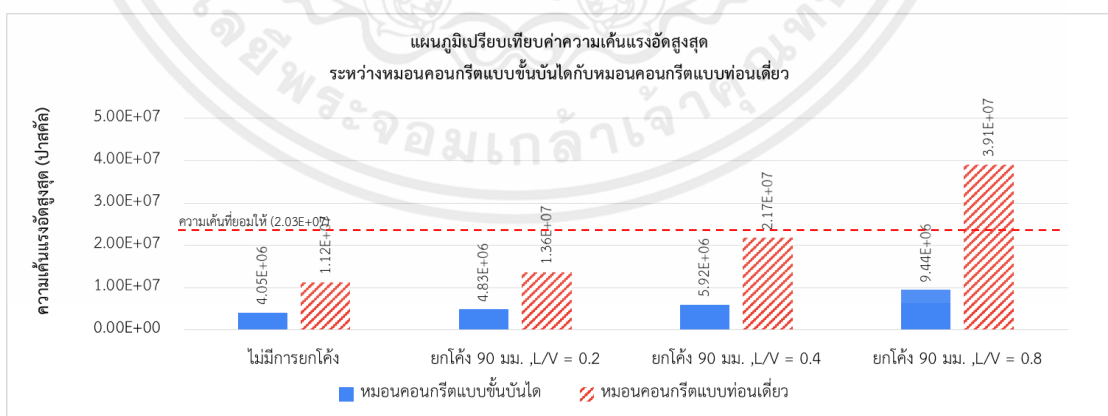
4.2.2.4 ค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้งสูงสุดระหว่างหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว กับหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได



รูปที่ 4.26 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้งสูงสุด ระหว่างหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดเปรียบเทียบกับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

จากรูปที่ 4.26 พบว่า ค่า ความเค้นแรงดึงในแนวตั้งสูงสุดที่เกิดขึ้นบนหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นที่ยอมให้ซึ่งเท่ากับ 20300000 ปาสคัล มีค่าน้อยกว่าหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว ไม่ว่าจะเป็ยขณะไม่มีการยกโค้ง และที่ระยะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร ขณะ L/V = 0.2 0.4 และ 0.8 โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 23.6% 46.8% 72.6% และ 79.7% ตามลำดับ

4.2.2.5 ค่าความเค้นแรงอัดในแนวตั้งสูงสุดระหว่างหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว กับหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได



รูปที่ 4.27 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าความเค้นแรงอัดในแนวตั้งสูงสุด ระหว่างหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดเปรียบเทียบกับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

จากรูปที่ 4.27 พบว่า ค่าความเค้นแรงอัดในแนวตั้งสูงสุดที่เกิดขึ้นบนหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นที่ยอมให้ซึ่งเท่ากับ 20300000 ปาสคัล มีค่าน้อยกว่าหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว ไม่ว่าจะเป็นขณะไม่มีการยกค้ัง และที่ระยะยกค้ัง 90 มิลลิเมตร ขณะ $L/V = 0.2$ 0.4 และ 0.8 โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 64.0% 64.5% 72.8% และ 75.8% ตามลำดับ

4.3 การวิเคราะห์ผล

เมื่อสังเกตที่หมอนคอนกรีตเมื่อใส่แรงแบบไดนามิก พิจารณาค่า Von Mises Stress ค่าความเค้นแรงดึงทั้งทางด้านข้างและแนวตั้ง ค่าความเค้นแรงอัดทั้งทางด้านข้างและแนวตั้ง พบว่า ค่าความเค้นที่กล่าวมาของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดบริเวณปลายทั้งสองของหมอนคอนกรีตจะมีความเค้นสูงกว่าบริเวณอื่น โดยพฤติกรรมนี้อาจเป็นพฤติกรรมโดยทั่วไปของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได เนื่องจากโครงสร้างรางรถไฟหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดมีการเสีรูปร่างที่บริเวณปลายคอนกรีตเสมอ [10] ไม่ว่าจะรถไฟจะวิ่งผ่านรัศมีทางค้ังใด จึงคาดว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณปลายใกล้เคียงกับความถูกต้อง ส่วนในช่วงระหว่างปลายทั้งสอง ความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นคงที่ มีลักษณะเป็นเส้นตรง ส่วนหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยวค่าความเค้นทั้งห้าแบบที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะขึ้นลงไม่คงที่ และไม่เป็นเส้นตรง เนื่องจากหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยวจะมีการวางตัวในลักษณะที่มีช่องว่างระหว่างตัวหมอนแต่ละอัน โดยบริเวณที่มีหมอนคอนกรีตรองรับเส้นกราฟจะมีลักษณะเพิ่มขึ้น แต่บริเวณที่เป็นช่องว่างระหว่างหมอนแต่ละท่อนเส้นกราฟจะมีลักษณะลดลง โดยหมอนทั้ง 2 แบบเมื่ออัตราส่วน L/V มีค่าเพิ่มขึ้น ความเค้นที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นที่เกิดขึ้นของหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดกับหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยวพบว่า ค่า Von Mises Stress สูงสุด ค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้างสูงสุด ค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้งสูงสุด ค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้างสูงสุด และค่าความเค้นแรงอัดในแนวตั้งสูงสุด ที่เกิดขึ้นบนหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดมีค่าน้อยกว่าหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์และออกแบบพัฒนาหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดเพื่อเพิ่มสมรรถนะในการรองรับแรงกระทำทางด้านข้างบนทางรถไฟ ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์หลักคือ มุ่งเน้นวิเคราะห์และออกแบบหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได ไปจนถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ของโครงสร้างทางรถไฟเพื่อที่จะนำหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดมาปรับใช้กับโครงสร้างทางรถไฟของประเทศไทยที่มีรางรถไฟเป็นแบบมีเตอร์เกจให้ปลอดภัย ด้วยการวิเคราะห์และออกแบบผ่านโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Abaqus ผู้วิจัยขอสรุปผลการวิจัยพร้อมทั้งเปรียบเทียบค่าความเค้นต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น อันได้แก่ ค่า Von Mises Stress ค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้าง ค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้ง ค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้าง และค่าความเค้นแรงอัดในแนวตั้ง ระหว่างหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว และหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดจากการที่ใส่แรงแบบไดนามิกลงบนรางรถไฟดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยวและหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดทั้งขณะไม่ได้ยกโค้งและมีระยะยกโค้ง 90 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วน L/V ต่าง ๆ

ชนิดของแรง (ปาสคัล)	ระดับการยกโค้ง (มิลลิเมตร)	หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว	หมอนคอนกรีตแบบชั้นบันได	ความแตกต่าง (เปอร์เซ็นต์)
ค่า Von Mises Stress	0		✓	68.3
	90 (L/V = 0.2)		✓	67.1
	90 (L/V = 0.4)		✓	72.4
	90 (L/V = 0.8)		✓	73.2
ค่าความเค้นแรงดึงทางด้านข้าง	0		✓	62.3
	90 (L/V = 0.2)		✓	63.6
	90 (L/V = 0.4)		✓	73.8
	90 (L/V = 0.8)		✓	81.4
ค่าความเค้นแรงอัดทางด้านข้าง	0		✓	55.8
	90 (L/V = 0.2)		✓	65.7
	90 (L/V = 0.4)		✓	64.7
	90 (L/V = 0.8)		✓	64.4
ค่าความเค้นแรงดึงในแนวตั้ง	0		✓	23.6
	90 (L/V = 0.2)		✓	46.8
	90 (L/V = 0.4)		✓	72.6
	90 (L/V = 0.8)		✓	79.7
ค่าความเค้นแรงอัดในแนวตั้ง	0		✓	63.9
	90 (L/V = 0.2)		✓	64.5
	90 (L/V = 0.4)		✓	72.8
	90 (L/V = 0.8)		✓	75.8

หมายเหตุ : เครื่องหมาย ✓ หมายถึง หมอนคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพมากกว่าทั้งในด้านของความ

เสถียร และค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบนตัวหมอนคอนกรีตที่มีค่าน้อยกว่า
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.1 เมื่อใส่แรงแบบไดนามิกลงบนรางแล้วสังเกตค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนหมอนคอนกรีตพบว่าหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดมีประสิทธิภาพในการรองรับความเค้นที่ดีกว่าหมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยวทั้งในแนวด้านข้าง และในแนวตั้ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำผลวิจัยไปใช้งาน

จากผลการวิจัยที่ได้จากโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์ Abaqus สามารถใช้แนวโน้มของผลลัพธ์ที่ได้เป็นแนวทางในการพัฒนาหมอนคอนกรีตแบบชั้นบันไดต่อไป แต่ยังไม่สามารถนำค่าที่ได้ไปใช้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากตัวแบบจำลองที่ได้จำลองขึ้นมาเปรียบเทียบกับขนาดองค์ประกอบทางโครงสร้างอื่น ๆ เช่น ตัวยึดราง (Fasteners) แผ่นรองราง (Rail Pad) เพลารถไฟ (Axial) จึงต้องศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมเพื่อนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้จริง

5.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

การศึกษานี้เป็นการศึกษาโดยรวมรวมองค์ประกอบต่าง ๆ ของโครงสร้างรางรถไฟ แล้วนำมาประยุกต์ให้เข้ากับขนาดรางรถไฟขนาด 1.000 เมตร ในการทำวิจัยครั้งต่อไปอาจศึกษาเกี่ยวกับอัตราส่วนในการผสมคอนกรีตร่วมด้วย เพื่อให้การเปรียบเทียบชัดเจน และมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

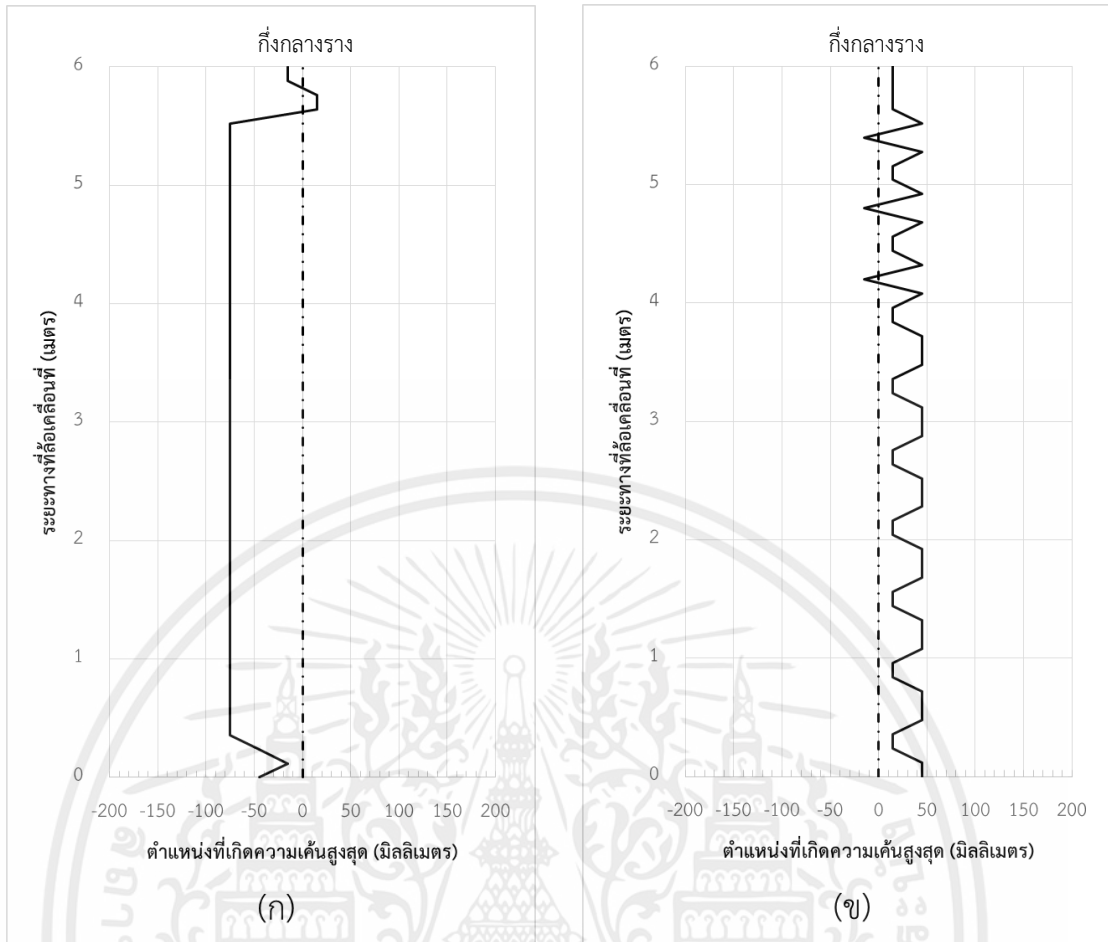
บรรณานุกรม

1. ญัฐ ดวงรัตน์ประทีป, พิมพ์เดือน รังสิยากุล, ชาย รังสิยากุล, กุลภพ สุทธิอาจ. **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2561.
2. ธรรมมา เจียรธรวานิช. **การศึกษาลักษณะของโครงสร้างทางรถไฟในแขวงบำรุงทางนครปฐม**. อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, 2549.
3. ฝ่ายการช่างโยธา. **คู่มือบำรุงทาง 2559**. การรถไฟแห่งประเทศไทย, 2559.
4. ฝ่ายการช่างโยธา. **โครงการวิจัย การรวบรวมองค์ความรู้ด้านขนส่งระบบราง: กรณีศึกษาด้านโครงสร้างพื้นฐาน**. การรถไฟแห่งประเทศไทย, 2558.
5. มนตรี กุลประดิษฐ์. **การศึกษาแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลารถไฟ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2561.
6. วศก.โท ประยูร เปาลีวัฒน์. **ความรู้เกี่ยวกับทางถาวร**. The Improvement of The Railway Training Center, 2537.
7. สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งจราจร. **คู่มือการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างทางรถไฟ**. 2558.
8. สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งจราจร. **มาตรฐานโครงสร้างทางรถไฟ**. 2558.
9. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ท่อเหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับงานโครงสร้างทั่วไป (มอก. 107-2561)**. กระทรวงอุตสาหกรรม, 2561.
10. Ernest J. Barenberg. **Lateral Stability Analysis of Ladder Sleeper Track Systems**. University of Illinois, 2016.
11. Guoqing Jing, et al. **The Contribution of Ballast Layer Components to The Lateral Resistance Of Ladder Sleeper Track**. Construction and Building Materials 202, 2019, p. 796-805.
12. Hajime Wakui, Nobuyuki Matsumoto, Hiromi Inoue. **Ladder Sleeper and New Track Structures Development**. Structure Technology Development Division, 1996.
13. Jack Youqin Huang. **Nadal's Limit (L/V) to Wheel Climb and Two Derailment Modes**. Engineering Physics Volume 5, Issue 1, June 2021, p. 8-14.
14. Kiyoshi Asanuma. **Ladder Track Structure and Performance**. Railway Technology Avalanche No.6, September 1, 2004, p. 35.

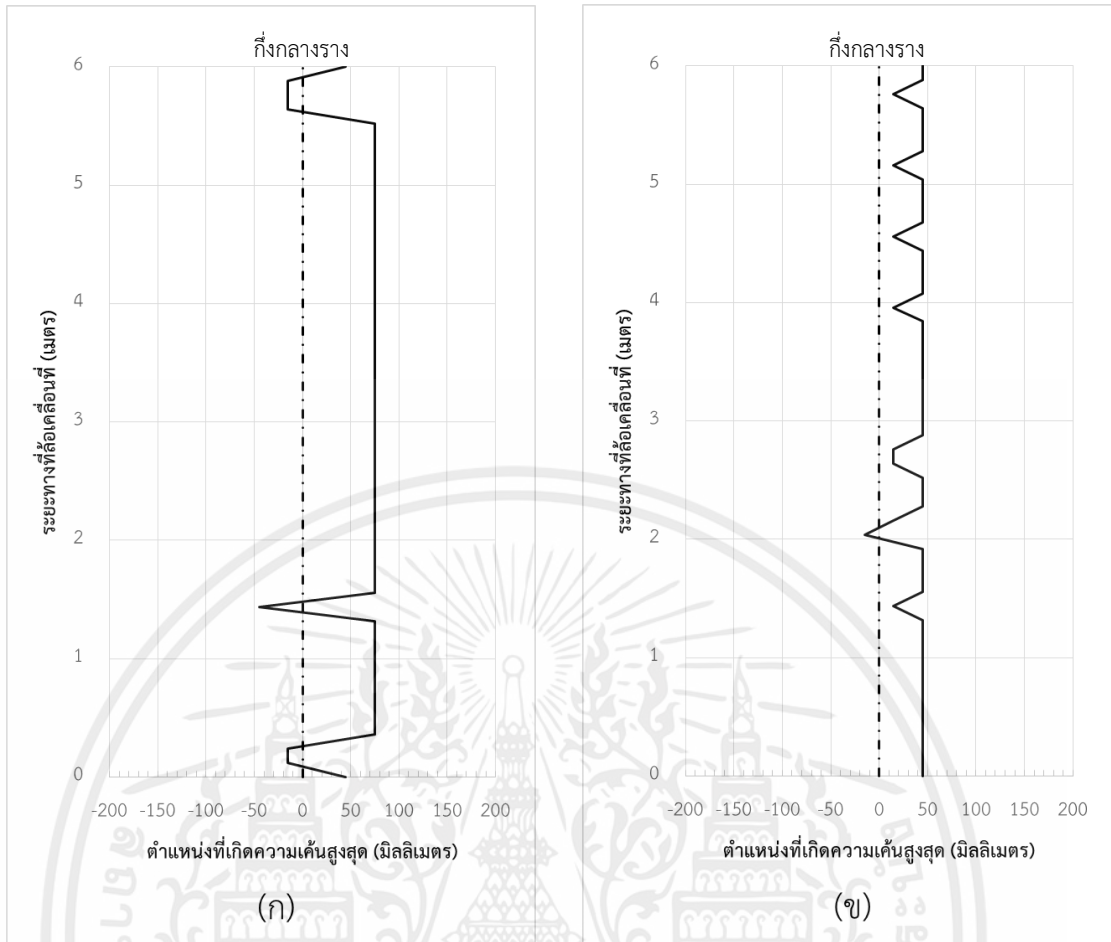
15. Railway Group Standard. **Track Standards Manual - Section 8: Track Geometry.** Safety & Standards Directorate, 1998.
16. Renga Rao Krishnamoorthy, et al. **The Effect of Rubber Pads on The Stress Distribution of Concrete Railway Sleepers.** IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018.
17. Sakdirat Kaewunreun et al. **Modelling Railway Prestressed Concrete Sleeper (Crossties) With Holes and Web Opening.** Procedia Engineering 161, 2016, p. 1240-1246.
18. Sakdirat Kaewunruen, Hao Fu, Caizhi Ye. **Numerical Studies to Evaluate Crack Propagation Behaviour of Prestressed Concrete Railway Sleepers.** Engineering Failure Analysis Volume 131, 2022.
19. Technical Specialist Rolling Stock Performance Standards. **Wheel And Axles Reference Manual.** Engineering Standard Rolling Stock, 2013.
20. Tsutomu Watanabe, et al. **Verification of Longitudinal Level Irregularity Suppression Effect at the Structural Boundary by Ballasted Ladder Track.** Railway Technical Reserch Institute, 2022.
21. Tsutomu Watanabe, Masamichi Sogabe, Hajime Wakui, Jorge Shimabuku, Masahiro Shoji. **Ground Vibration Characteristics of Ballasted Ladder Track.** Procedia Engineering 199, 2017, p. 2741-2746.
22. Xiangyu Qu, et al. **Analysis of the Vibration Migitation Characteristics of the ballasted Ladder Track with Elastic Elements.** School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2019.
23. Zoltan Major, et al. **Numerical Studies to Evaluate Crack Propagation Behaviour of Prestressed Concrete Railway Sleepers.** Infrastructures 2023, 8, 41, 2023.



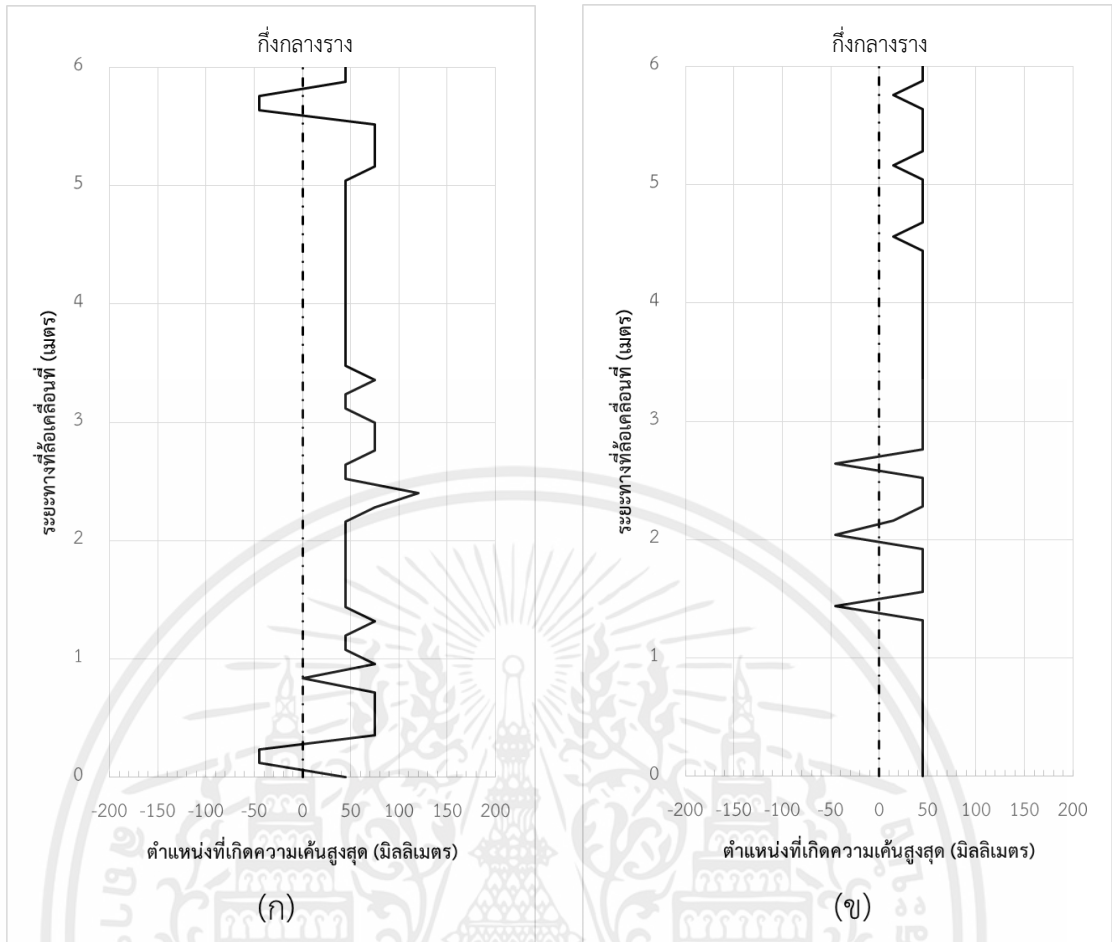
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



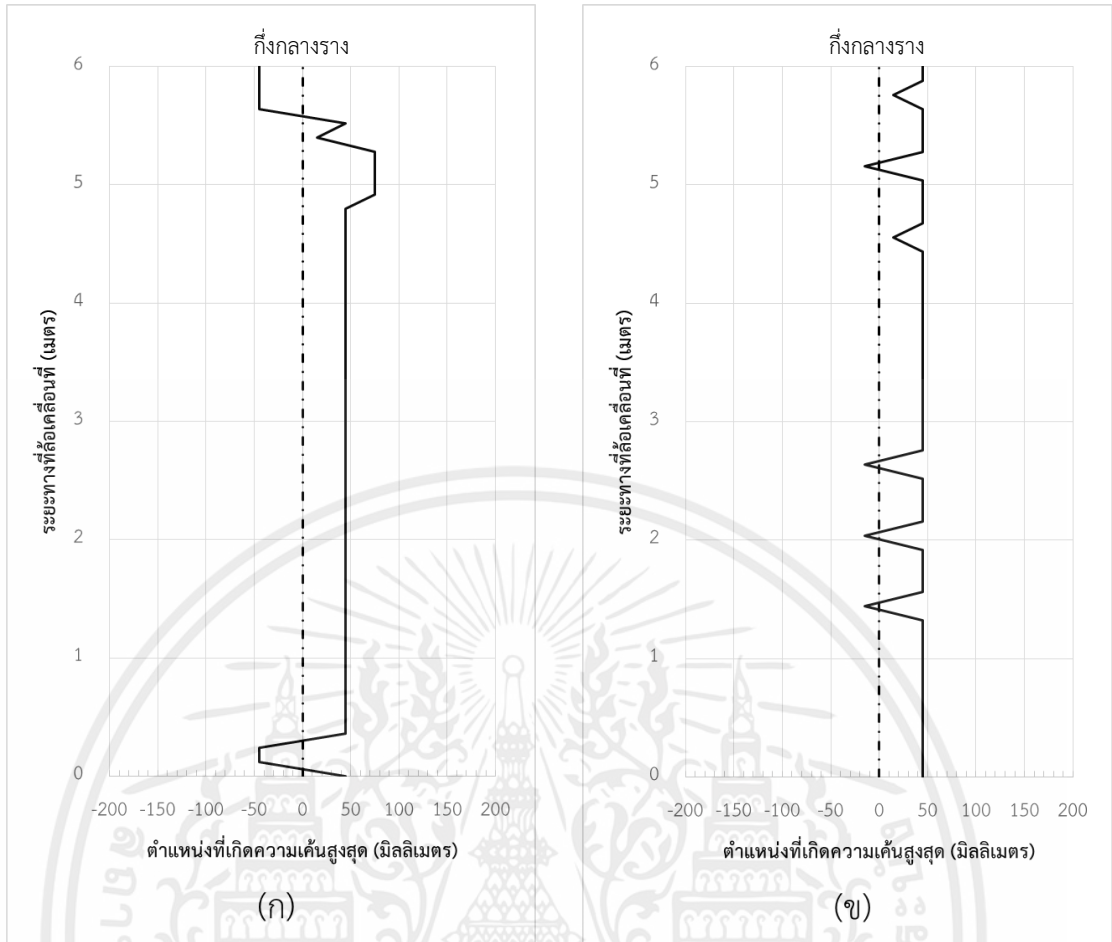
(ก) หมอนคอนกรีตแบบขึ้นบันได (ข) หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว
 รูปที่ ก-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่ลื้อเคลื่อนที่ กับตำแหน่งของความเค้นสูงสุด
 ที่เกิดขึ้นบริเวณใต้ราง (ขณะที่ไม่มีการยกโค้ง)



(ก) หมอนคอนกรีตแบบขั้นบันได (ข) หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดียว
 รูปที่ ก-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ กับตำแหน่งของความเค้นสูงสุด
 ที่เกิดขึ้นบริเวณใต้ราง (ขณะที่มีการยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.2$)



(ก) หมอนคอนกรีตแบบขึ้นบันได (ข) หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดี่ยว
 รูปที่ ก-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่ล่อเคลื่อนที่ กับตำแหน่งของความเค้นสูงสุด
 ที่เกิดขึ้นบริเวณใต้ราง (ขณะที่มีการยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.4$)



(ก) หมอนคอนกรีตแบบขั้นบันได (ข) หมอนคอนกรีตแบบท่อนเดียว
 รูปที่ ก-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ กับตำแหน่งของความเค้นสูงสุด
 ที่เกิดขึ้นบริเวณใต้ราง (ขณะที่มีการยกโค้ง 90 มิลลิเมตร $L/V = 0.8$)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นาย กมนทัต บุญสัจจามันท์
วัน เดือน ปีเกิด 13 พฤษภาคม 2544
ที่อยู่ 49/5 หมู่ 4 ตำบลบางกะจะ อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี 22000
ประวัติการศึกษา 2565 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ - นามสกุล นาย ธนภัทร ศรีภัทรพันธ์
วัน เดือน ปีเกิด 12 ธันวาคม 2543
ที่อยู่ 405/8 ตำบลบ่อพลับ อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000
ประวัติการศึกษา 2565 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ - นามสกุล นาย ธนัท ชื่นฉ่ำ
วัน เดือน ปีเกิด 23 เมษายน 2544
ที่อยู่ 231 แขวงคลองสามประเวศ เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
ประวัติการศึกษา 2565 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง