การศึกษาแนวโน้มของตำแหน่งการเกิดการล้าของล้อและรางรถไฟ ภายใต้การสัมผัสกลิ้งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

STUDY OF FATIGUE CRACK INITIATION LOCATION OF WHEEL AND RAIL UNDER ROLLING CONTACT USING FINITE ELEMENT METHOD

สุเทพ แร่อ่อน
SUTHEP RAEON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560
KMITL-2017-EN-M-030-203

การศึกษาแนวโน้มของตำแหน่งการเกิดการล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

STUDY OF FATIGUE CRACK INITIATION LOCATION OF WHEEL AND RAIL UNDER ROLLING CONTACT USING FINITE ELEMENT METHOD

สุเทพ แร่อ่อน
SUTHEP RAEON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-030-203
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF FATIGUE CRACK INITIATION LOCATION OF WHEEL AND RAIL UNDER ROLLING CONTACT USING FINITE ELEMENT METHOD

SUTHEP RAEON

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-EN-M-030-203

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2017
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาแนวโน้มของตำแหน่งการเกิดการล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
Thesis Title Study of Fatigue Crack Initiation Location of Wheel and Rail Under Rolling Contact Using Finite Element Method
นักศึกษา นายสุเทพ แร่อ่อน
รหัสประจำตัว 55610961
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-030-203

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ฐิตะพล หุยะนันท์	
รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว	
ดร.จิตราภรณ์ วงศางาม	
ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เดไปวา	
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 8 ธันวาคม พ.ศ. 2560 เวลา 09.30-11.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 8 ธันวาคม พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาแนวโน้มของต าแหน่งการเกิดการล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
นักศึกษา	นายสุเทพ แร่อ่อน
รหัสประจำตัว	55610961
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร

บทคัดย่อ

ปัจจุบันระบบขนส่งทางรางได้ถูกนามาใช้ในการขนส่งสินค้าและผู้โดยสารอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นทางเลือกในการขนส่งที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และมีความปลอดภัยสูง การบารุงรักษาและป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับล้อและรางรถไฟจึงเป็นปัจจัยที่มีความสาคัญ ซึ่งส่งผลต่อความปลอดภัย จากการศึกษาข้อมูลทางสถิติ พบว่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับล้อและรางรถไฟส่วนใหญ่ คือ การแตกร้าว ซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ โดยงานวิจัยนี้นาเสนอการศึกษาแนวโน้มของตาแหน่งการเกิดความเสียหายเนื่องจากการล้าจากการสัมผัสกลิ้งของแบบจ ลองสามมิติของล้อและรางรถไฟที่มีการใช้งานในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วงช่วงบางใหญ่ – บางซื่อ ด้วยความเร็ว 80 km/h โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบกับเกณฑ์การล้าของ Dang Van ในกรณีที่ล้อมีการเปลี่ยนแปลงต าแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟ รวมถึงรางรถไฟมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงจาก 0, 1/40, 1/30 และ 1/20 ตามลาดับ ซึ่งพบว่า ความเสียหายจากการล้าที่เกิดขึ้นกับล้อและรางรถไฟ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งจากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side และความเสียหายจากการล้าที่เกิดขึ้นกับล้อและรางรถไฟจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อรางรถไฟมีมุมเอียงเพิ่มขึ้นจนถึงมุมเอียง 1/30 นอกจากนี้ พบว่า ความเสียหายจะเกิดขึ้นในบริเวณใต้ผิวของล้อและรางรถไฟ โดยผลการศึกษาดังกล่าวสามารถนาไปใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการวางแผนการซ่อมบ ารุงรักษา ต่อไป

คำหลัก : ล้อ, รางรถไฟ, มุมเอียงรางรถไฟ, ตาแหน่งการเกิดการล้าของการสัมผัสกลิ้ง, เกณฑ์การล้าของ Dang Van

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Study of Fatigue Crack Initiation Location of Wheel and Rail Under Rolling Contact Using Finite Element Method
Student	Mr. Suthep Raeon
Student ID.	55610961
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Monsak Pimsarn

ABSTRACT

The rail transit system is being widely used for freight and passenger transportation. This is due to its economic worthiness and high safety mode. Maintenance and damage prevention of wheel and rail are important factors affecting the safety of the system. The previous data show that the most damage of wheel and rail is cracking, which leads to the stress of the contact area between wheel and rail. This research compiles the study of the fatigue crack initiation location of wheel and rail under rolling contact at 80 km/h using Finite Element Method (FEM). The three – dimensional model was created using the data of wheel and rail of the MRT Purple line project, Bang Yai to Bang Sue section. The Dang Van criteria was applied to analyze the fatigue crack initiation in case of the wheel's position is changed along the rail lateral displacement and rail inclination at 0, 1/40, 1/30 and 1/20, respectively. The results show that the fatigue crack initiation tends to increase when the wheel is moved from gauge side to field side and the rail inclination increases to 1/30. The model and results from this research can be a primary guideline for maintenance planning.

Keywords : Wheel, Rail, Rail Inclination, Rolling contact fatigue crack initiation, Dang Van criteria

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สาเร็จลุล่วงได้ด้วยคาแนะนา คาปรึกษา และความกรุณาเป็นอย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้ในเชิงวิชาการ อันเป็นแนวทางในการทาวิจัย ชี้จุดข้อบกพร่องและแนวทางในการแก้ไข ปลูกฝังให้มีความมานะ พยายาม และเป็นแบบอย่างที่ดีแก่มาโดยตลอด รวมถึงการให้ความเอาใจใส่ดูแล ติดตามการ ด าเนินงานอย่างสม่ าเสมอ จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลต่าง ๆ ใน โครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง ช่วงบางใหญ่ – บางซื่อ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการท าวิจัย

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คาแนะนา ตลอดจนข้อชี้แนะ จนท าให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ส าเร็จลงได้

สุดท้ายขอขอบคุณบิดามารดาที่มอบชีวิตและอบรมสั่งสอนด้วยความรักและความเอาใจใส่ ตลอดจนสนับสนุนให้มีโอกาสในการศึกษา ตั้งแต่เยาว์วัยจนถึงปัจจุบัน สาหรับคุณงามความดีอันใดที่ เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง

สุเทพ แร่อ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญตาราง VII
สารบัญรูป VIII
บทที่ 1 บทน า 1
1.1 ความส าคัญและที่มาของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 บทน า 5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 13
3.1 บทน า 13
3.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับรถไฟและความเสียหายของล้อและรางรถไฟ 13
3.2.1 ส่วนประกอบที่ส าคัญของรถไฟ 13
3.2.2 ความเสียหายของล้อและรางรถไฟ 17
3.3 ทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ 29
3.4 ทฤษฎีความเสียหาย 32
3.4.1 ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดส าหรับวัสดุเหนียว 34
3.4.2 ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป 36
3.5 ความเสียหายเนื่องจากการล้า 39
3.5.1 การค านวณอายุการล้า 40
3.5.2 เกณฑ์การล้าของ Dang Van 44
3.6 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย....................47
4.1 บทนำ....................47
4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง....................48
4.3 การสร้างแบบจำลองสามมิติของล้อและรางรถไฟ....................52
4.3.1 การสร้างแบบจำลองสามมิติของล้อ....................52
4.3.2 การสร้างแบบจำลองสามมิติของรางรถไฟ....................53
4.4 การจำลองการสัมผัสกลิ้งระหว่างล้อและรางรถไฟ....................53
4.4.1 การนำแบบจำลองของล้อและรางรถไฟเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์....................53
4.4.2 การปรับปรุงแบบจำลองและกำหนดคุณสมบัติทางวัสดุ....................53
4.4.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง....................56
4.4.4 การกำหนดขั้นตอนการสัมผัสกลิ้งของแบบจำลอง....................57
4.4.5 การกำหนดเอลิเมนต์ให้แบบจำลอง....................58
4.4.6 การกำหนดมุมเอียงและตำแหน่งของล้อตามแนวขวางของรางรถไฟ....................59
4.4.7 การพิจารณาผลลัพธ์จากแบบจำลอง....................59
4.5 การวิเคราะห์ตำแหน่งที่มีแนวโน้มเกิดการล้าด้วยเกณฑ์การล้าของ Dang Van....................60
บทที่ 5 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล....................61
5.1 การศึกษาผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง....................61
5.1.1 ระยะของพื้นที่สัมผัสและความดันสัมผัสสูงสุด....................61
5.1.2 การกระจายตัวของความดันสัมผัสและความเค้นในแนวแกน z....................62
5.2 การศึกษาความเค้นจากการสัมผัสกลิ้งของแบบจำลอง....................65
5.2.1 กรณีเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟที่มีมุมเอียง 1/40....................66
5.2.2 กรณีเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของรางรถไฟ....................69
5.3 การวิเคราะห์การล้าจากการสัมผัสกลิ้งของแบบจำลอง....................73
5.3.1 กรณีเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟที่มีมุมเอียง 1/40....................74
5.3.2 กรณีเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของรางรถไฟ....................75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ....78
6.1 บทสรุป....78
6.2 ข้อเสนอแนะ....79
เอกสารอ้างอิง....81
ภาคผนวก....84
ภาคผนวก ก บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์....85
ประวัติผู้เขียน....92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 แสดงสัมประสิทธิ์ m และ n 31

4.1 ระยะของพื้นที่สัมผัสและความดันสัมผัสสูงสุดตามทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ 50

4.2 ความดันสัมผัสจากการคานวณตามทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์....................51

4.3 ความเค้นในแนวแกน z ที่ระยะต่าง ๆ....................51

4.4 แสดงคุณสมบัติทางวัสดุของล้อและรางรถไฟ 54

4.5 แสดงคุณสมบัติการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของล้อและรางรถไฟ 56

4.6 จ านวนเอลิเมนต์ในแต่ละแบบจ าลอง....................58

5.1 การเปรียบเทียบระยะของพื้นที่สัมผัสและความดันสัมผัสสูงสุด 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 รถไฟฟ้าในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง ช่วงบางใหญ่ – บางซื่อ 4
2.1 การกระจายตัวของความดันสัมผัสเทียบกับทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ [3] 6
2.2 การกระจายตัวของความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van และ Loading path [4] 7
2.3 ขนาดของแผ่นดิสก์ซึ่งใช้เป็นแบบจ าลองในการทดสอบ [5] 7
2.4 แบบจ าลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ ที่ใช้ในการศึกษาการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ [6] 8
2.5 ต าแหน่งการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟของล้อเดิม (a) และล้อที่ออกแบบใหม่ (b) [7] 8
2.6 การกระจายตัวของความเค้น von Mises ในการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ [8] 9
2.7 ผลการเปรียบเทียบความเค้น Dang Van ที่ได้จากการค านวณเชิงตัวเลขทั้ง 4 วิธี [9] 10
2.8 รูปร่างของพื้นที่สัมผัสตามทฤษฎีของเฮิรตซ์ ตามแนวขวางของรางรถไฟ [11] 11
2.9 ความเค้นของสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปวงรี [12] 11
2.10 การกระจายความเค้นเฉือนจากแบบจ าลอง FEM (a, b) และแบบจ าลอง CONTRACT (c, d) [13] 12
3.1 โบกี้ [26] 14
3.2 ล้อ (ซ้าย) และชุดล้อพร้อมเพลา (ขวา) 15
3.3 แสดงขนาดและมิติของรางรถไฟตามมาตรฐาน UIC 50 (ซ้าย) และ UIC 60 (ขวา) [25] 15
3.4 แสดงความกว้างของทางรถไฟ 16
3.5 ลักษณะมุมเอียงของรางรถไฟ 16
3.6 รอยแตกร้าวของล้อจากความร้อน [14] 17
3.7 รอยแตกร้าวเนื่องจากการล้าของการสัมผัสกลิ้ง [14] 18
3.8 รอยแตกร้าวที่ผิวซึ่งแพร่กระจายจากรอยแตกร้าวจากการล้าใต้ผิว [14] 18
3.9 รอยแตกร้าวจากการล้า [14] 19
3.10 การการแตกเป็นเศษเล็ก ๆ ของพื้นล้อ [14] 20
3.11 พื้นของล้อลื่นไถล [14] 20
3.12 ล้อที่มีสันคม [14] 21
3.13 พื้นล้อมีลักษณะกลวง [14] 21
3.14 ล้อที่มีการหมุนที่ไม่ดีเนื่องจากเครื่องกัด [14] 22
3.15 ล้อที่มีการหมุนที่ไม่ดีเนื่องวัตถุภายนอก [14] 22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.16 การหลุดล่อนที่ผิวของหัวราง [15]......23

3.17 รอยร้าวที่หัวราง [15]......24

3.18 การแตกหักเป็นเศษเล็ก ๆ [15]......24

3.19 Squats [15]......25

3.20 ต าหนิรูปไข่ [15]......26

3.21 Tongue lipping [15]......26

3.22 รอยแตกร้าวแนวตั้งตามยาว [15]......27

3.23 รอยแตกร้าวทแยงมุม [15]......28

3.24 ผิวรางเป็นลูกฟูก [15]......29

3.25 แบบจ าลองการสัมผัสตามทฤษฎีของเฮิรตซ์ [1]......29

3.26 รัศมีความโค้งหลักของล้อและรางรถไฟ [1]......30

3.27 แสดงค่าความเค้นที่เป็นจุดต้านแรงคราก [22]......33

3.28 สมการที่ (3.19) - (3.21) ในระนาบ σ_A, σ_B [22]......35

3.29 แสดงพลังงานของการเปลี่ยนรูปลูกบาศก์ภายใต้ความเค้น 3 มิติ [22]......36

3.30 แสดงสมการ σ' บนระนาบ $\sigma_A \sigma_B$ [22]......38

3.31 แสดงสมการ σ' บนระนาบ $\sigma_1 \sigma_2$ [22]......39

3.32 เครื่องมือส าหรับทดสอบเพื่อหาอายุการล้าของชิ้นงานของ Moore [22]......41

3.33 ชิ้นงานทดสอบมาตรฐานส าหรับเครื่องทดสอบของ Moore [22]......41

3.34 $S-N$ Diagram ของเหล็กกล้า UNS G41300 โดย S_{ut} = 116 ksi [22]......42

3.35 $S-N$ Diagram ของอะลูมินัมอัลลอยด์ [22]......42

3.36 ความเค้นสลับตรงกัน กระท าซ้ าสองทิศทาง ($R=-1$) [22]......43

3.37 เกณฑ์การล้าของ Dang Van ในระนาบ τ และ P [16]......45

3.38 ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยทั่วไป......46

4.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการด าเนินงาน......48

4.2 แบบจ าลองสามมิติของล้อและรางรถไฟอย่างง่าย......49

4.3 เงื่อนไขขอบเขตในการตรวจสอบแบบจ าลอง......49

4.4 ความดันสัมผัสที่ใช้ในการตรวจสอบแบบจ าลอง......50

4.5 ความเค้นในแนวแกน z ที่ระยะต่าง ๆ......50

4.6 รูปร่างของล้อและรางรถไฟในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง ช่วงบางใหญ่ – บางซื่อ [26]......52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 การสร้างแบบจำลองสามมิติของล้อ	52
4.8 การสร้างแบบจำลองสามมิติของรางรถไฟ	53
4.9 ตำแหน่งของแบบจำลองสามมิติของล้อและรางรถไฟ	54
4.10 คุณสมบัติทางวัสดุของล้อ	55
4.11 คุณสมบัติทางวัสุดของรางรถไฟ	55
4.12 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองล้อและรางรถไฟ	57
4.13 ขั้นตอนการสัมผัสของแบบจำลอง	57
4.14 เอลิเมนต์ของแบบจำลอง	58
4.15 แบบจำลองที่มีมุมเอียงของรางรถไฟต่าง ๆ	59
4.16 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟ	59
5.1 ความดันสัมผัสที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้ตรวจสอบ	62
5.2 กราฟเปรียบเทียบการกระจายตัวของความดันสัมผัส	63
5.3 ความเค้นในแนวแกน z ได้จากแบบจำลองที่ใช้ตรวจสอบ	63
5.4 กราฟเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นในแนวแกน z	64
5.5 กราฟเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนความดันสัมผัสจากทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์กับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	64
5.6 กราฟเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนความเค้นในแนวแกน z จากทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์กับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	65
5.7 ความดันสัมผัสที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40	66
5.8 กราฟเปรียบเทียบความดันสัมผัสสูงสุด ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40	66
5.9 พื้นที่สัมผัสที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40	67
5.10 กราฟเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัส ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40	67
5.11 กราฟเปรียบเทียบความเค้น Tresca ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40	68
5.12 กราฟเปรียบเทียบความเค้น von Mises ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40	68
5.13 ความดันสัมผัสที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในกรณีที่รางรถไฟไม่มีมุมเอียง	69
5.14 ความดันสัมผัสที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/30	69
5.15 ความดันสัมผัสที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/20	69
5.16 กราฟเปรียบเทียบความดันสัมผัส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง	70
5.17 พื้นที่สัมผัสที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในกรณีที่รางรถไฟไม่มีมุมเอียง	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.18 พื้นที่สัมผัสที่ต ำแหน่งต่าง ๆ ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/30 70
5.19 ความดันสัมผัสที่ต ำแหน่งต่าง ๆ ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/20 71
5.20 กราฟเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง..... 71
5.21 กราฟเปรียบเทียบความเค้น Tresca ที่ล้อ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง..... 72
5.22 กราฟเปรียบเทียบความเค้น Tresca ที่รางรถไฟ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง 72
5.23 กราฟเปรียบเทียบความเค้น von Mises ที่ล้อ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง 73
5.24 กราฟเปรียบเทียบความเค้น von Mises ที่รางรถไฟ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง..... 73
5.25 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนความเค้น Dang Van ที่มีมุมเอียงของรางรถไฟ 1/40..... 74
5.26 กราฟเปรียบเทียบต ำแหน่งความเค้น Dang Van ที่มีมุมเอียงของรางรถไฟ 1/40..... 75
5.27 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนความเค้น Dang Van ที่ล้อ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง มุมเอียง..... 76
5.28 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนความเค้น Dang Van ที่รางรถไฟ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง มุมเอียง..... 76
5.29 กราฟเปรียบเทียบต ำแหน่งความเค้น Dang Van เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง 77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยได้ให้ความสาคัญกับการพัฒนาระบบขนส่งทางรางดังเห็นได้จากยุทธศาสตร์การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมขนส่งของไทย พ.ศ. 2558-2565 ของกระทรวงคมนาคมซึ่งได้กาหนดแผนงานการพัฒนาโครงข่ายรถไฟระหว่างเมืองโดยการปรับปรุงระบบอุปกรณ์และโครงสร้างพื้นฐานการขนส่งทางราง และพัฒนาระบบรถไฟทางคู่ที่มีความพร้อมด าเนินการ 6 สายแรก และเร่งผลักดันให้สามารถดาเนินการก่อสร้างทางคู่ขนาดรางมาตรฐาน (Standard gauge) เชื่อมโยงกับประเทศเพื่อนบ้านและสาธารณรัฐประชาชนจีน (จีนตอนใต้) และแผนงานการพัฒนาโครงข่ายขนส่งสาธารณะเพื่อแก้ไขปัญหาจราจรในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยจะเร่งรัดขยายเส้นทางรถไฟฟ้าในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเพื่อให้บริการประชาชนได้อย่างทั่วถึง ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า การขนส่งทางรางเป็นรูปแบบการขนส่งที่ถูกนามาใช้ขนส่งสินค้าและผู้โดยสารอย่างแพร่หลาย หากพิจารณาในด้านค่าใช้จ่าย รถไฟสามารถขนส่งสินค้าได้ครั้งละจานวนมากจึงทาให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่อหน่วยต่ากว่าการขนส่งในรูปแบบอื่น เมื่อเปรียบเทียบการขนส่งทางรางกับการขนส่งทางถนน จะเห็นได้ว่า ในการขนส่งสินค้ารถไฟสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่ารถบรรทุก 3 -5 เท่า ในการขนส่งผู้โดยสารรถไฟสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่ารถโดยสารสาธารณะ 1.7 – 2 เท่า และประหยัดพลังงานกว่ารถโดยสารส่วนบุคคลถึง 5 เท่า นอกจากนี้หากพิจารณาในด้านผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม การขนส่งทางรางส่งผลกระทบต่อส่งสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการขนส่งในรูปแบบอื่น และที่สาคัญที่สุดคือ การขนส่งทางรางเป็นรูปแบบการขนส่งที่มีความปลอดภัยสูงเนื่องจากสามารถควบคุมการจราจรและการเข้ามาใช้เส้นทางได้ (Controlled access) จึงมีโอกาสเกิดอุบัติเหตุน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการเดินทางด้วยรถยนต์ แต่หากขาดการตรวจสอบและบารุงรักษาอย่างมีประสิทธิภาพจะส่งผลให้มีความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุรถไฟตกรางและรถไฟชนกัน ท าให้ผู้โดยสารจ านวนมากได้รับอันตรายและสินค้าได้รับความเสียหาย ดังเห็นได้จากอุบัติเหตุรถไฟตกรางที่เมืองฮัทฟิลด์ ประเทศอังกฤษ ในปี ค.ศ. 2000 ทาให้มีผู้เสียชีวิต 4 คนและมีผู้บาดเจ็บมากกว่า 70 คน รายงานการสอบสวนในปี ค.ศ. 2006 สรุปว่า อุบัติเหตุรถไฟตกรางดังกล่าวมีสาเหตุมาจากการแตกร้าวของรางรถไฟเนื่องจากขาดการตรวจสอบและการบารุงรักษาตามเวลาที่กาหนด โดยสาเหตุหนึ่งที่ทาให้รางรถไฟเกิดการแตกร้าว คือ การล้าของการสัมผัสกลิ้ง (Rolling contact fatigue) เนื่องจากล้อมีน้าหนักกดเพลามาก แต่พื้นที่สัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟมีขนาดเล็กจึงส่งผลให้ความดันสัมผัสในบริเวณดังกล่าวมีค่ามาก และเมื่อมีการกลิ้งของล้อผ่านไปมาซ้า ๆ จะทาให้เกิดความเค้นสลับไปมา (Repeated cyclic stress) ดังนั้น การศึกษาแนวโน้มของต าแหน่งการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้งจึงสามารถใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการซ่อมบารุงให้มีประสิทธิภาพต่อไป ทั้งนี้ในประเทศไทยยังไม่ให้ความสาคัญต่อการศึกษาในลักษณะดังกล่าวมากนัก เนื่องจากผู้ให้บริการด้านระบบขนส่งทางรางส่วนใหญ่จะมีวางแผนการซ่อมบ ารุงตามระยะการใช้งานที่ถูกก าหนดโดยผู้ผลิตจากต่างประเทศ

จากการศึกษางานวิจัยในประเทศไทย พบว่า งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยแรกที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษาแนวโน้มของต าแหน่งการเกิดการล้าของล้อและรางรถไฟ ในขณะที่ล้อมีการกลิ้งด้วยความเร็วคงที่ตามที่กาหนด ภายใต้แรงกดในแนวดิ่งเนื่องจากน้าหนักกดเพลา โดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS ในการสร้างแบบจาลองสามมิติ แล้วจึงทาการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งตัวแปรที่นามาศึกษาเปรียบเทียบ คือ การเปลี่ยนแปลงตาแหน่งของล้อตามแนวขวางของรางรถไฟที่มีมุมเอียง 1/40 และรางรถไฟที่มีมุมเอียงต่าง ๆ จากนั้นจึงทาการวิเคราะห์ต าแหน่งที่มีแนวโน้มจะเกิดการล้าด้วยเกณฑ์การล้าของ Dang Van เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาการล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้ง รวมถึงใช้เป็นข้อมูลประกอบในการวางแผนการซ่อมบ ารุงล้อและรางรถไฟในอนาคต ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการจ าลองการสัมผัสกลิ้งระหว่างล้อและรางรถไฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
2. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความดันสัมผัส พื้นที่สัมผัส และความเค้นต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับล้อและรางรถไฟ
3. เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้เกณฑ์การล้าของ Dang Van ในการหาตาแหน่งการเกิดการล้าของล้อและรางรถไฟ
4. เพื่อศึกษาแนวโน้มการเกิดการล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้ง เมื่อล้อมีการเปลี่ยนแปลงต าแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟที่มีมุมเอียง 1/40
5. เพื่อศึกษาแนวโน้มการเกิดการล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้ง เมื่อรางรถไฟมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงจาก 0, 1/40, 1/30 และ 1/20 ตามล าดับ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวโน้มของต าแหน่งการเกิดการล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้งด้วยความเร็วคงที่ ปราศจากแรงขับเคลื่อนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้รูปร่างของล้อและรางรถไฟที่มีการใช้งานในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง ช่วงบางใหญ่ – บางซื่อ ซึ่งอยู่ในความรับผิดชอบของการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) เพื่อเปรียบเทียบความเค้นต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เมื่อล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟ (Lateral displacement) และรางรถไฟมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง (Rail inclination) โดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างแบบจำลองสามมิติ และวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบกับเกณฑ์การล้าของ Dang Van เพื่อหาตำแหน่งที่มีแนวโน้มจะเกิดการล้า ดังนั้นจึงกำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1. กำหนดให้ศึกษาเฉพาะรูปร่างของล้อและรางรถไฟ ที่มีการใช้งานในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง ช่วงบางใหญ่ – บางซื่อ

2. กำหนดให้ศึกษาการล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้ง บนสมมติฐานว่าล้อและรางรถไฟอยู่ในสภาวะสมบูรณ์ ไม่มีการสึกหรอและการบิดตัวเนื่องจากการใช้งาน

3. กำหนดให้ศึกษาการล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้งที่มีความเร็วคงที่ 80 km/h (ความเร่งเป็นศูนย์) ปราศจากแรงขับเคลื่อน

4. กำหนดให้ออกแบบสร้างแบบจำลองสามมิติของล้อและรางรถไฟโดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS

5. กำหนดให้จำลองการสัมผัสกลิ้งของล้อและรางรถไฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

6. กำหนดให้ล้อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟ ซึ่งประกอบด้วย -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3 และ +4 mm

7. กำหนดให้รางรถไฟมีมุมเอียง 0, 1/40, 1/30 และ 1/20 ตามลำดับ

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากหนังสือ วารสาร และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง โดยจัดเป็นหมวดหมู่ ดังต่อไปนี้

1.1 ความรู้พื้นฐานของงานวิศวกรรมรถไฟ

1.2 ทฤษฎีกลศาสตร์การสัมผัสระหว่างวัตถุและการสัมผัสของล้อและรางรถไฟ

1.3 ทฤษฎีความเสียหายและการล้าที่เกี่ยวข้อง

1.4 ความรู้พื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.5 การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2. ศึกษาทฤษฎีการสัมผัสที่มีผลต่อการกระจายตัวของความดันสัมผัสและความเค้นในแนวตั้งฉากที่ความลึกต่าง ๆ ในบริเวณที่ล้อและรางรถไฟมีการสัมผัสกัน

3. ศึกษาการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับแบบจำลองการสัมผัสของล้อและรางรถไฟอย่างง่าย และทำการเปรียบเทียบผลของความดันสัมผัส รวมถึงความเค้นในแนวตั้งฉากที่ความลึกต่าง ๆ กับทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์

4. ศึกษาตำแหน่งที่มีแนวโน้มเกิดความเสียหายจากการล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้ง โดยพิจารณาทั้งล้อและรางรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยมุ่งเน้นศึกษาตาแหน่งที่มีแนวโน้มเกิดความเสียหายจากการล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้ง ด้วยการนาเทคโนโลยีด้าน CAE (Computer Aided Engineering) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมและงานวิศวกรรมต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ในการหาค่าความเค้นต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ เพื่อเป็นข้อมูลส าหรับการศึกษาการเกิดการล้า โดยประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย

1. ทาให้ทราบตาแหน่งที่มีแนวโน้มเกิดความเสียหายจากการล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนการซ่อมบ ารุ

2. ได้แบบจาลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อเป็นต้นแบบสาหรับเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ต าแหน่งที่มีแนวโน้มเกิดการล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้ง

3. สามารถถ่ายทอดเทคโนโลยีการจาลองการสัมผัสกลิ้งของล้อและรางรถไฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากผลงานวิจัย

รูปที่ 1.1 รถไฟฟ้าในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง ช่วงบางใหญ่ – บางซื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

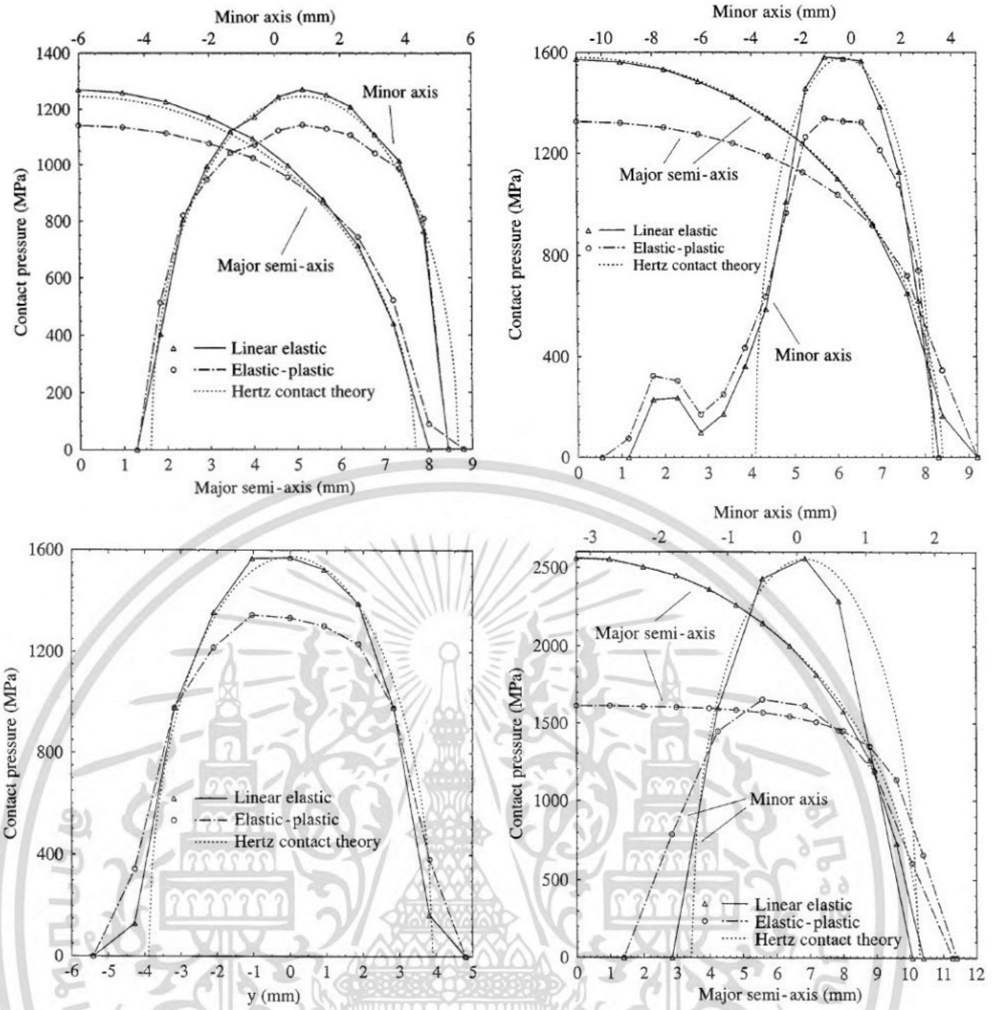
2.1 บทนำ

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การศึกษาการกระจายตัวของความเค้นและการล้าจากการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ ส่วนใหญ่จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์แบบจาลองแบบสามมิติ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ตามทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ รวมถึงผลการทดลองจริง ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวถือเป็นองค์ความรู้ที่สาคัญ ดังนั้น รายละเอียดในบทนี้จึงเป็นการทบทวน วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการล้าจากการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2000 Yan และ Fischer ได้ศึกษาความดันสัมผัสของล้อตามมาตรฐาน UICORE และรางรถไฟตามมาตรฐาน UIC60 เมื่อล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟ โดยใช้แบบจาลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ และใช้ทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องแบบจ าลองดังกล่าว รวมถึงพิจารณาการสัมผัสของรางเครนและส่วนประกอบของประแจสับรางรถไฟด้วย ซึ่งพบว่า ถ้าบริเวณที่มีการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟไม่มีการเปลี่ยนแปลงรัศมีความโค้ง ล้อและรางรถไฟมีคุณสมบัติทางวัสดุเป็นแบบยืดหยุ่น และขนาดของพื้นที่สัมผัสเล็กกว่ารัศมีความโค้งของล้อและรางรถไฟในบริเวณดังกล่าวมาก ผลการคานวณเชิงตัวเลขของการกระจายตัวของความดันสัมผัสจะมีความสอดคล้องกับทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ นอกจากนี้ยังพบว่าการคานวณการไหลเวียนของแรงเนื่องจากแรงเสียดทาน ไม่สามารถค นวณได้โดยตรงด้วยทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์

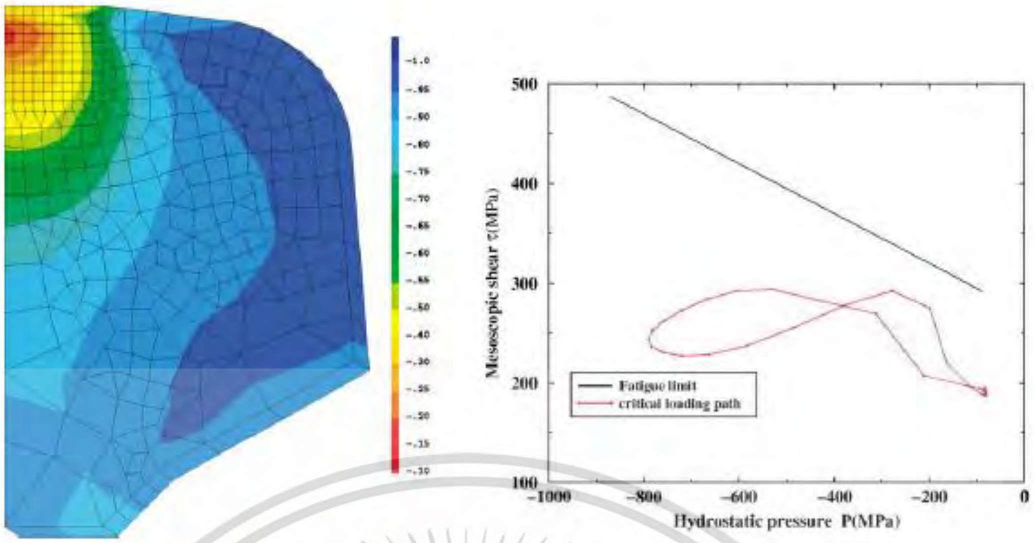
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 การกระจายตัวของความดันสัมผัสเทียบกับทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ [3]

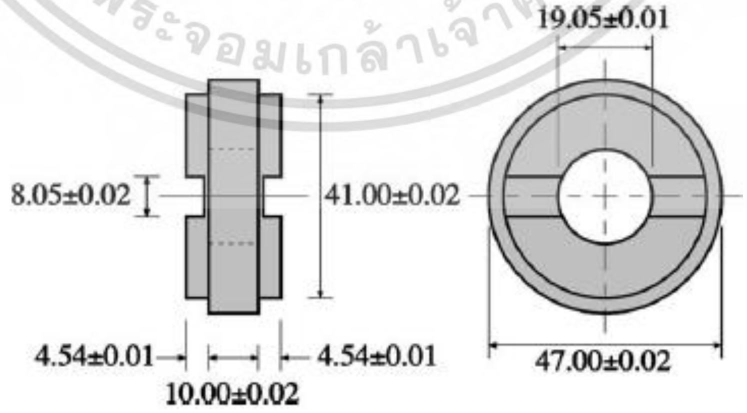
ในปี ค.ศ. 2002 Dang Van และ Maitourman ได้ศึกษาการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟจากการกลิ้งซ้ำ ๆ โดยใช้ “Stationary methods” ในการคำนวณ Mechanical stabilized states of rail-like structure ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแรงสัมผัส และทำนายปริมาณความล้าที่เกิดขึ้นโดยอาศัยการเชื่อมโยงระหว่างระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์สองมิติ การขยายตัวของ Fourier ในทิศทางตามแนวยาวของรางรถไฟ และสมมติฐาน Steady-state เพื่อลดภาระในการคำนวณในแต่ละขั้นตอน และใช้แบบจำลองสามมิติของการสัมผัสกลิ้งในการตรวจสอบการล้าแบบ High-cycle ของรางรถไฟด้วยเกณฑ์การล้าของ Dang Van โดยพบว่า หากใช้ร่วมกับเกณฑ์การล้าที่เหมาะสมจะสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการทำนายการเริ่มต้นเกิดรอยแตกร้าวจากความล้าที่ดีได้ (ทั้งในแบบ High หรือ low cycle) นอกจากนี้ วิธีการคำนวณแบบสองมิติเพียงพอสำหรับทำนายการแตกร้าวที่เกิดขึ้นแบบ Kidney-shape แต่สำหรับการแตกร้าวแบบ Squat ต้องใช้การคำนวณแบบสามมิติเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การกระจายตัวของความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van และ Loading path [4]

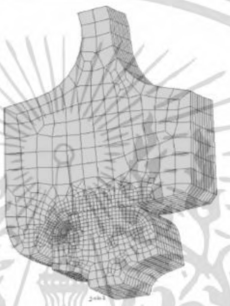
ในปี ค.ศ. 2002 Kapoor และคณะ ได้ศึกษาการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกใต้ผิวสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ โดยการสร้างแบบจาลองการสัมผัสของแผ่นดิสก์ 2 แผ่น ซึ่งใช้วัสดุตามมาตรฐาน JIS E1101 และ JIS E5402 เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากลักษณะของผิวสัมผัส โดยพบว่า ผิวของแผ่นดีสก์ทั้งสองมีการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกลึกประมาณ 10 ไมโครเมตรจากผิว หลังจากที่มีการกลิ้ง 100,000 รอบ โดยมีน้าเป็นสารหล่อลื่น พร้อมทั้งใช้โปรแกรมในการคานวณความดันสัมผัสและผลลัพธ์ความเค้น จากการวัดรูปแบบความขรุขระ ซึ่งพบว่า พื้นผิวสัมผัสที่มีความขรุขระจะท าให้ความดันสัมผัสสูงสุดสูงกว่าพื้นผิวสัมผัสที่มีความเรียบ ทาให้ความเค้นมีค่าสูงเพียงพอที่จะเกิดการสะสมของความเค้นตกค้าง ทาให้เกิดการไหลของพลาสติกภายในของผิวรางรถไฟ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าความขรุขระของพื้นผิวเป็นสาเหตุที่ท าให้พื้นผิวมีการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก



รูปที่ 2.3 ขนาดของแผ่นดีสก์ซึ่งใช้เป็นแบบจ าลองในการทดสอบ [5]

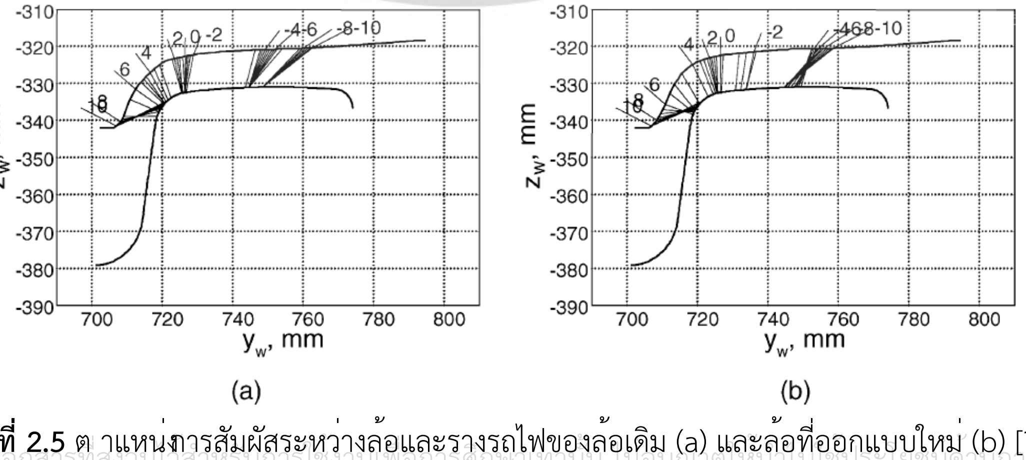
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ. 2005 Sladkowski และ Sitarz ได้ศึกษาการกระจายตัวของขอบเขตการสัมผัสและความเค้นของล้อและรางรถไฟจากอิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อและรางรถไฟที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงสัมผัส รวมถึงการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะของชุดล้อ โดยใช้แบบจ าลองทางคณิตศาสตร์ที่มีพื้นฐานจากวิธีการของเฮิร์ตซ์และแบบจาลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ จากผลการวิจัยพบว่า การกระจายตัวของขอบเขตการสัมผัสและความเค้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามรูปร่างของล้อและรางรถไฟ โดยผลการวิจัยดังกล่าวสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนารูปร่างของล้อและรางรถไฟ ซึ่งปัจจุบันในประเทศยูเครนได้มีการทดสอบรูปร่างของรางรถไฟที่ได้มีการออกแบบและพัฒนาขึ้นมาใหม่



รูปที่ 2.4 แบบจ าลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ ที่ใช้ในการศึกษาการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ [6]

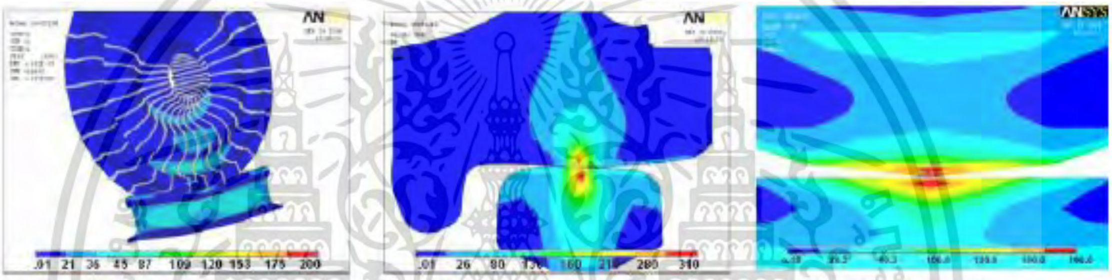
ในปี ค.ศ. 2005 Shevtsov และคณะได้ศึกษาขั้นตอนในการออกแบบรูปร่างของล้อที่ใช้หลักการของ Rolling radii difference function ซึ่งพิจารณาลักษณะทางเรขาคณิตในการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ ประกอบกับหลักเกณฑ์ตามข้อกาหนดของล้อและรางรถไฟ ได้แก่ เสถียรภาพของชุดล้อ ความคุ้มค่าของต้นทุนในการออกแบบและการสึกหรอต่าสุดของล้อและรางรถไฟ โดยใช้วิธีการคานวณเชิงตัวเลขในการหาค่าที่เหมาะสม และสร้างแบบจาลองสาหรับตรวจสอบการสึกหรอรวมถึงประสิทธิภาพตามข้อกาหนดด้านความปลอดภัยของล้อและรางรถไฟ เพื่อนาไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบรูปร่างของล้อแทรม



รูปที่ 2.5 ต าแหน่งการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟของล้อเดิม (a) และล้อที่ออกแบบใหม่ (b) [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ.2009 Tehrani และ Saket ได้ศึกษาการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ เพื่อหาค่าความเค้นเฉือน และใช้ทฤษฎีการเริ่มต้นของรอยแตกร้าวจากการล้าในสภาวะความเค้นผสมหลายทิศทาง(Multi-axial fatigue crack initiation) ประกอบกับกราฟ S-N (อายุการล้า) ของวัสดุที่อยู่ภายใต้แรงดึง-อัด และการบิดสลับไปมาเพื่อทานายอายุการล้า นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบของแรงกด ความแข็งของวัสดุและค่าความต้านทานการล้า (Fatigue strength) ของวัสดุ ต่ออายุการล้าของล้อ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติเพื่อวิเคราะห์ความเค้นในขณะที่ล้อและรางรถไฟอยู่ภายใต้แรงกด และล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟ เพื่อหาค่าตาแหน่งของการสัมผัสที่ส่งผลให้เกิดความเค้นเฉือนสูงสุด ซึ่งจะเป็นตัวขับเคลื่อนท ให้เกิดรอยแตกร้าวจากการล้าของการสัมผัสกลิ้ง

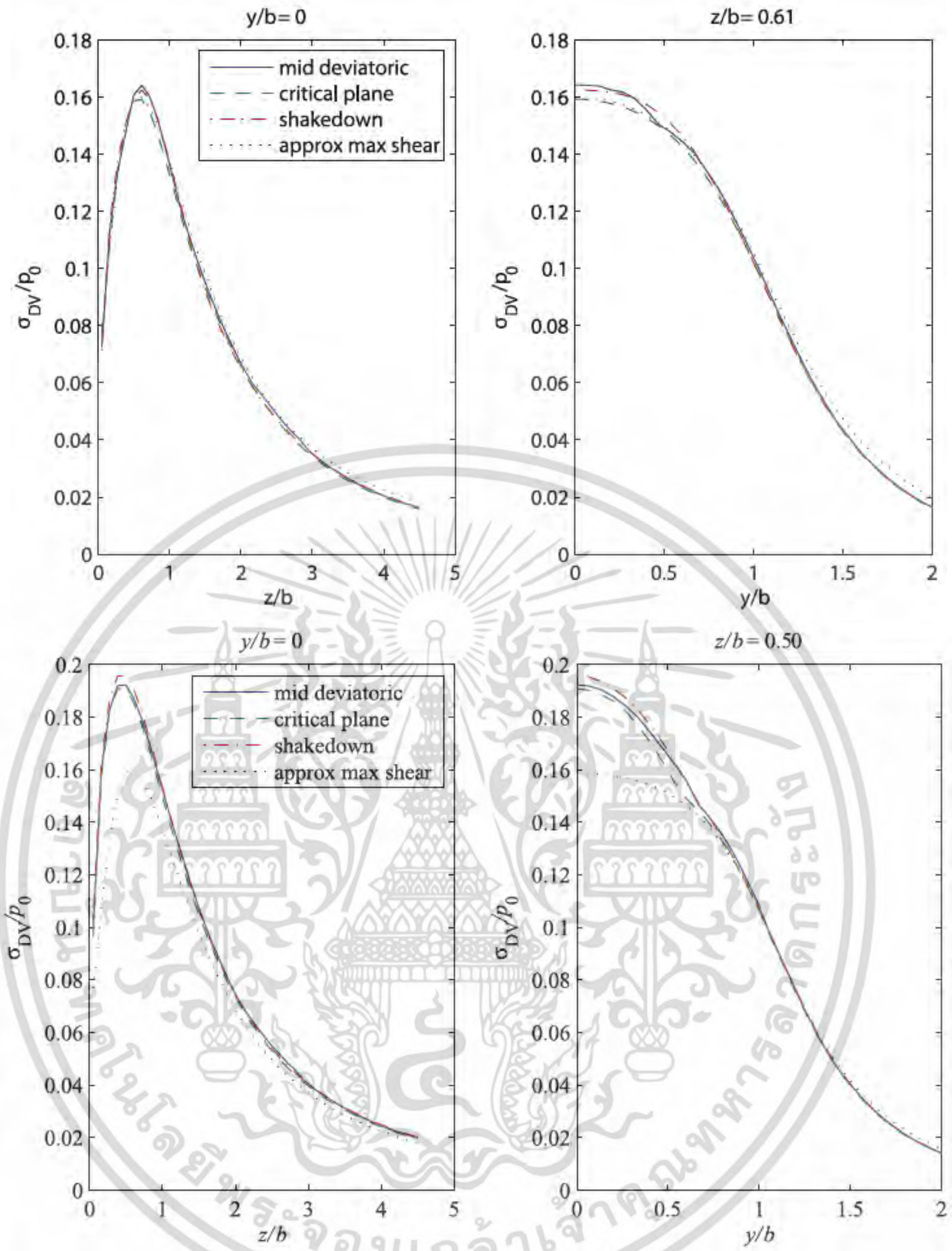


(a) wheel/rail contact (b) Front section view (C) Left section view

รูปที่ 2.6 การกระจายตัวของความเค้น von Mises ในการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ [8]

ในปี ค.ศ. 2012 Sandstorm ได้ศึกษาการประเมินความเค้น Dang Van ที่เกิดขึ้นใต้ผิวจากการสัมผัสกลิ้งแบบเฮิรตซ์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางเรขาคณิต (A) และตัวแปรของวัสดุ (c) โดยการเปรียบเทียบความแม่นยาและประสิทธิภาพของผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการคานวณเชิงตัวเลข 4 วิธี พบว่า รูปแบบการกระจายตัวและค่าสูงสุดของความเค้น Dang Van ในระนาบ $y-z$ ที่ได้จากการคานวณด้วยหลักการพื้นฐานของ. Mesoscopic shakedown, Evaluation of mid deviatoric stress, Evaluation at a critical plan และการประมาณจาก The maximum shear stress มีความสอดคล้องกัน โดยวิธีการคานวณด้วยหลักการพื้นฐานของ Evaluation of mid deviatoric stress มีประสิทธิภาพมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างทรัพยากรที่ใช้ในการคานวณและความแม่นยาของผลลัพธ์ นอกจากนี้ยังพบว่า วิธีการคานวณด้วยหลักการพื้นฐานของ Maximum shear stress จะให้ผลลัพธ์ที่แม่นยา ในกรณีการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ เนื่องจากวิธีดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการคานวณสูง จึงมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับการประเมินความเค้น Dang Van ซึ่งต้องมีการประเมินหลายครั้ง

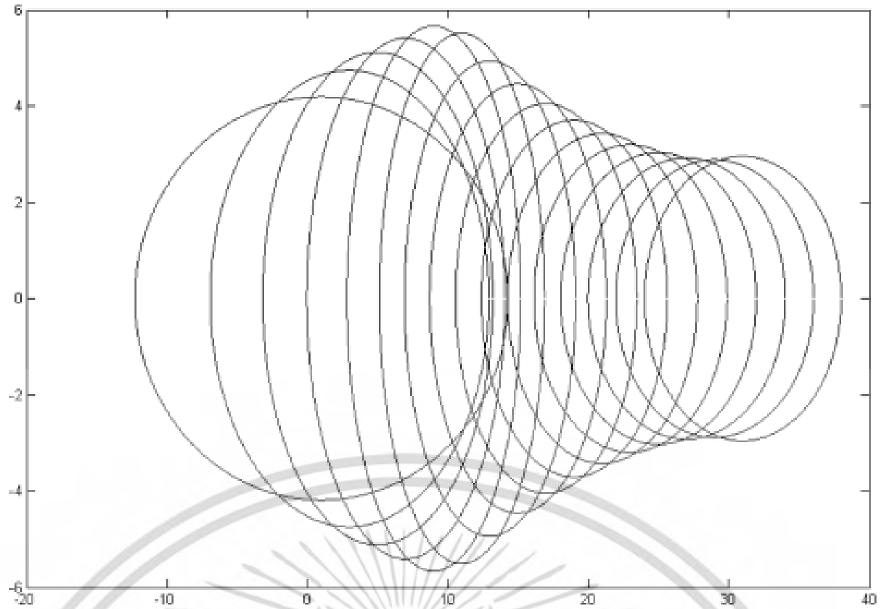
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ผลการเปรียบเทียบความเค้น Dang Van ที่ได้จากการค านวณเชิงตัวเลขทั้ง 4 วิธี [9]

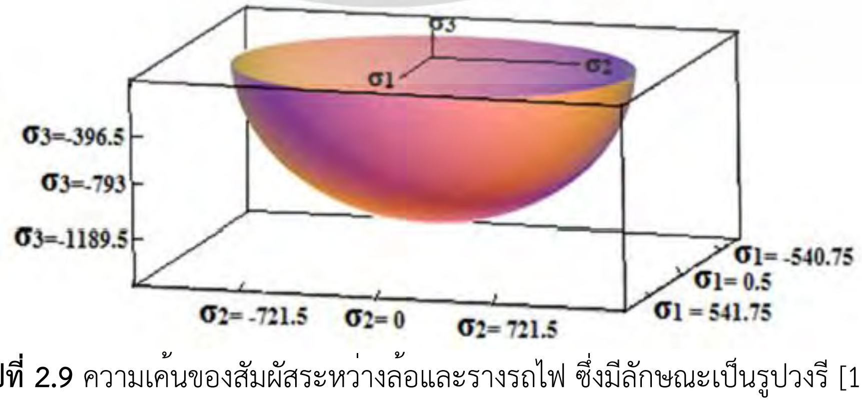
ในปี ค.ศ. 2013 Ashofteh ได้ศึกษาความเค้นสัมผัสสูงสุดในบริเวณพื้นที่สัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อล้อมีการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของรางรถไฟในตาแหน่งต่าง ๆ (Lateral displacement) เนื่องจากรูปร่างของล้อที่มีลักษณะเป็นทรงกรวย ท าให้ต าแหน่งที่ล้อสัมผัสกับรางรถไฟไม่คงที่ จึงส่งผลให้ความเค้นสัมผัสมีการเปลี่ยนแปลงในทุกตาแหน่งที่ล้อมีการเคลื่อนที่ รวมถึงรูปร่างและมุมเอียงของรางรถไฟ เส้นผ่านศูนย์กลาง โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ทฤษฎีของเฮิรตซ์ในการศึกษาเปรียบเทียบ ซึ่งพบว่าปัจจัยต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น มีผลทาให้ความเค้นในบริเวณพื้นที่สัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้อายุการใช้งานของล้อลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 รูปร่างของพื้นที่สัมผัสตามทฤษฎีของเฮิรตซ์ ตามแนวขวางของรางรถไฟ [11]

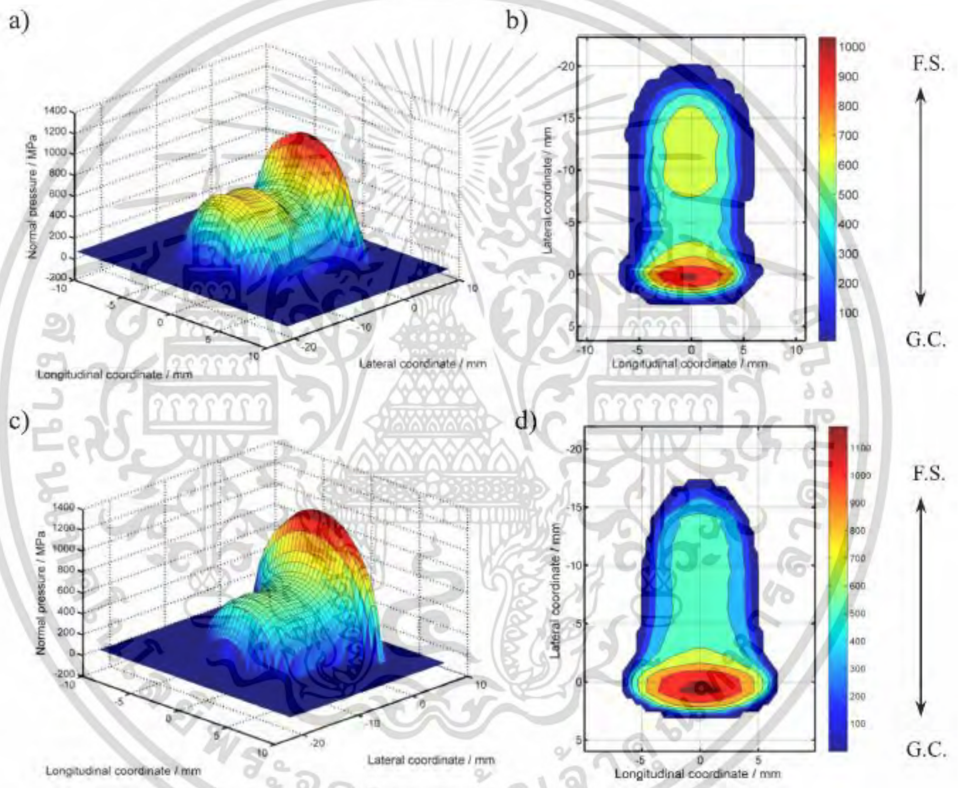
ในปี ค.ศ. 2013 Srivastava และคณะได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงการความเค้นของการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ ซึ่งได้รับอิทธิพลจากรูปร่างทางเรขาคณิตของล้อและรางรถไฟ เช่น การเปลี่ยนแปลงรัศมีความโค้งของล้อและรางรถไฟ ในบริเวณที่มีการสัมผัสกัน และความเอียงของพื้นล้อ โดยใช้แบบจาลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติและทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ พบว่า เมื่อรัศมีความโค้งของล้อเพิ่มขึ้นจะท ให้ความกว้างของพื้นที่สัมผัสซึ่งเป็นรูปวงรีเพิ่มขึ้น แต่ความยาวลดลงซึ่งมีแนวโน้มส่งผลให้ความเสียดทานของการลื่นไถลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เมื่อความเอียงของพื้นล้อเพิ่มขึ้นจะทาให้ความยาวของการสัมผัสเพิ่มขึ้นและทาให้ความกว้างลดลง ซึ่งส่งผลให้พื้นที่สัมผัสลดลงตามไปด้วย จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ พบว่า มีความผิดพลาดร้อยละ 2 – 3 โดยการนาเสนอผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจะช่วยให้การออกแบบรูปร่างของล้อและรางรถไฟต้องให้ความสาคัญกับพื้นที่สัมผัส ความเค้นสัมผัส และรูปร่างทางเรขาคณิตของล้อและรางรถไฟ รวมถึงความดันสัมผัสด้วย



รูปที่ 2.9 ความเค้นของสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปวงรี [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ.2017 Ma และคณะได้ศึกษาการตรวจสอบความเค้นเฉือนและพื้นที่การลื่นไถลของแบบจาลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของล้อและรางรถไฟ เพื่อเปรียบเทียบกับแบบจาลองที่ได้จากโปรแกรม CONTACT ซึ่งยังไม่มีการกล่าวถึงมากนัก โดยพิจารณาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและแรงฉุดที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสและบริเวณใต้ผิวสัมผัสเนื่องจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อและรางรถไฟ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจาลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกับผลลัพธ์ของแบบจ าลองที่ได้จากโปรแกรม CONTACT นอกจากนี้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานและแรงฉุดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ตาแหน่งที่ความเค้นมีความเข้มข้นมีการเปลี่ยนแปลงจากบริเวณใต้ผิวไปยังบริเวณผิวสัมผัส



รูปที่ 2.10 การกระจายความเค้นเฉือนจากแบบจ าลอง FEM (a, b) และแบบจ าลอง CONTRACT (c, d) [13]

โดยงานวิจัยนี้จะนาเสนอการศึกษาแนวโน้มของตาแหน่งการเกิดการล้าจากการสัมผัสกลิ้งของแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟ ที่มีการใช้งานในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วงช่วงบางใหญ่ – บางซื่อ ซึ่งมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 80 km/h โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบกับเกณฑ์การล้าของ Dang Van เพื่อเปรียบเทียบในกรณีที่ล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟที่มีมุมเอียง 1/40 และรางรถไฟมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้งเป็นสิ่งที่มีความสาคัญก่อนการเริ่มดาเนินการวิจัย ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึง ความรู้เบื้องต้นที่เกี่ยวกับรถไฟและความเสียหายของล้อและรางรถไฟ ทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ ทฤษฎีความเสียหาย ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดสาหรับวัสดุเหนียว ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป ความเสียหายเนื่องจากการล้า เกณฑ์การล้าของ Dang Van รวมถึงหลักการพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับรถไฟและความเสียหายของล้อและรางรถไฟ

3.2.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของรถไฟ

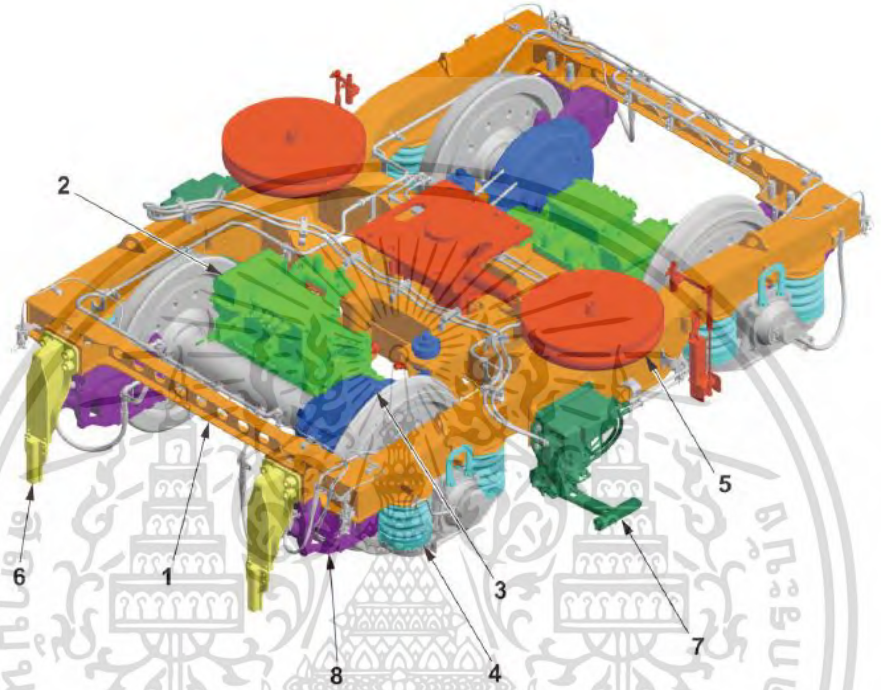
ในการเคลื่อนที่ของรถไฟ การสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟถือปัจจัยหนึ่งที่มีความส าคัญ ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการขับเคลื่อน ความรู้สึกสบาย และความปลอดภัยของผู้โดยสาร โดยส่วนประกอบหลักที่มีความเกี่ยวข้อง คือ โบกี้ ล้อ และรางรถไฟ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1.1 โบกี้

โบกี้ (Bogie) หรือ แคร่ เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งกับตัวรถไฟมีหน้าที่รับน้าหนักของขบวนรถไฟ โดยจะช่วยให้ตัวรถไฟสามารถเคลื่อนที่ด้วยความมั่นคงนุ่มนวลทั้งในทางตรงและทางโค้ง โดยโบกี้จะรับการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรถไฟทาให้ผู้โดยสารรู้สึกสบาย ในการออกแบบโบกี้นั้น วิศวกรจะพยายามลดการสั่นสะเทือนจากล้อไม่ให้ขึ้นมาถึงตัวรถไฟ โดยโบกี้มีส่วนประกอบหลัก ดังนี้ 1. Bogie frame 2. Traction motor 3. Driving gear 4. Primary suspension 5. Secondary suspension 6. Stone guard 7. Current collection device และ 8. Brake caliper โดย Primary suspension อยู่ระหว่างเพลาล้อกับโบกี้และ Secondary suspension อยู่ระหว่างโบกี้กับตัวรถไฟ นอกจากนี้ยังมีการต้องติดตั้งโช้คอัพ (Shock absorber) เพื่อลดการสั่นสะเทือนที่ผิดปกติให้หายไปโดยเร็วที่สุด ส่วนการออกแบบโบกี้สาหรับรถไฟที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่าจะมีการใช้โช้คอัพแบบง่ายๆ เช่น รถสินค้า 4 ล้อ หรือรถโดยสารในสมัยเริ่มต้นซึ่งใช้สปริงแบบเหล็กแผ่น (Leaf spring) โดยไม่มีการติดตั้งโช้คอัพ แต่อาศัยแรงเสียดสีระหว่างแผ่นเหล็กสปริงเมื่อเกิดการสั่นในแนวดิ่ง เพื่อช่วยลดการสั่นสะเทือนไปพร้อมกับการทาหน้าที่เป็นระบบรับน้าหนักชั้นแรก รถเหล่านี้สามารถวิ่งได้ด้วยความเร็ว 50-70 km/h เท่านั้น เพราะแรงเสียดสีระหว่างแผ่นเหล็กสปริงมีค่าไม่แน่นอนจึงไม่สามารถควบคุมการสั่นได้ตามความต้องการ การสั่นสะเทือนที่ไม่พึงประสงค์จะลดลงโดยใส่โบกี้เข้าไป เพื่อให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสั่นสะเทือนพื้นฐานของรถ 4 ล้อไปปรากฏอยู่ที่ตัวโบกี้ แต่การสั่นสะเทือนที่ไม่ตรงกัน (Out of phase) ของโบกี้หน้าและหลังก็ยังเป็นเหตุให้ตัวรถเกิดการหมุนรอบจุดศูนย์ถ่วง (Center of Gravity; CG) เพียงแต่มีระดับความรุนแรงลดลง ในทานองเดียวกันการสั่นสะเทือนในแนวแกนอื่นของตัวรถก็ยังคงอยู่



รูปที่ 3.1 โบกี้ [26]

3.2.1.2 ล้อ

ล้อ (Wheel) เป็นอุปกรณ์ที่ทาหน้าที่ประคองตัวรถให้เคลื่อนที่ไปตามรางรถไฟ โดยมีบังใบ (Flange) ซึ่งอยู่ด้านในล้อทาหน้าที่บังคับไม่ให้ตกราง พื้นล้อหรือเทรด (Thread) คือ ส่วนที่ล้อสัมผัสกับหัวราง เส้นผ่านศูนย์กลาง ณ จุดสัมผัส (Diameter on thread) คือ เส้นผ่านศูนย์กลางล้อที่วัดจากจุดสัมผัส ระยะส่ายตัว (Wheel flange play) คือ ระยะห่างจากจุดที่พื้นล้อด้านบนสัมผัสหัวรางถึงจุดที่บังใบล้อสัมผัสหัวรางด้านข้าง ซึ่งการรถไฟแห่งประเทศไทยกาหนดระยะส่ายตัวออกด้านข้างล้อไว้ข้างละ 6.75 mm การศึกษาและปรับปรุงล้อรถไฟได้กระทามาอย่างต่อเนื่อง ล้อรถไฟในปัจจุบันมีรูปร่างเป็นรูปทรงกรวย (Truncated-cone shape) พื้นล้อเป็นระนาบเอียงเนื่องจากต้องการให้ชุดล้อมีคุณสมบัติคัดท้ายตัวเอง (Self steering) กล่าวคือ เมื่อผลักให้ชุดล้อเคลื่อนที่ไปบนรางรถไฟ ล้อด้านที่วิ่งด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าจะวิ่งนาหน้าล้อที่วิ่งด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าเพลาล้อก็จะเอียงไปในทางที่จะคัดท้ายให้ชุดล้อเคลื่อนกลับไปในทางตรงกันข้ามซึ่งล้อด้านที่เคยวิ่งด้วยเส้นผ่านศูนย์เล็กกว่าจะเปลี่ยนเป็นวิ่งด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่าและวิ่งออกหน้าล้อด้านตรงข้ามเป็น

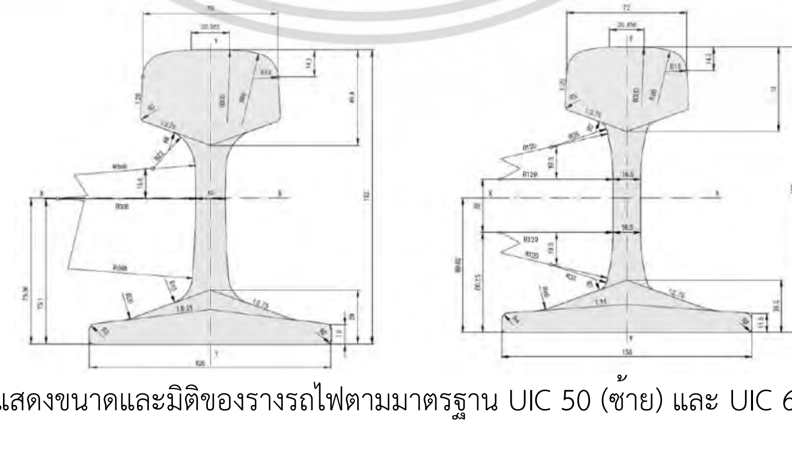
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคัดท้ายให้เกิดการส่ายตัวกลับสลับกันไปมา ดังนั้นหากเป็นการเคลื่อนที่ในสภาพปกติ แรงกระแทกระหว่างบังใบล้อกับหัวรางจะมีความรุนแรงน้อยกว่าล้อที่มีพื้นล้อเป็นรูปทรงกระบอก

รูปที่ 3.2 ล้อ (ซ้าย) และชุดล้อพร้อมเพลา (ขวา)

3.2.1.3 รางรถไฟ

รางรถไฟ (Rail) ในปัจจุบันผลิตจากเหล็กรีดร้อนประกอบด้วยส่วนสาคัญ 3 ส่วนคือ หัวราง เอวราง และฐานราง ในอดีตจะมีการยึดรางรถไฟเข้ากับไม้หมอนแล้วใช้ตะปูรางตอกยึดฐานรางไว้กับไม้หมอน ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีการยึดรางรถไฟอย่างหลากหลาย และพบว่ามีการใช้หมอนคอนกรีตมากขึ้นเนื่องจากหมอนไม้ต้องใช้ไม้เนื้อแข็งซึ่งหายากและมีราคาแพง ในขณะที่หมอนคอนกรีตอัดแรงจะมีอายุการใช้งานนานถึง 60 ปี แต่ข้อเสียคือเมื่อเกิดอุบัติเหตุรถตกราง ทางรถไฟที่ใช้หมอนคอนกรีตจะซ่อมยากกว่าหมอนไม้ ขนาดของรางรถไฟจะมีผลกับความเร็วของขบวนรถและน้าหนักกดเพลาเนื่องจากรางรถไฟจะรับแรงกดที่ส่งผ่านจากเพลาล้อลงไปที่โครงสร้างทางรถไฟ การกาหนดขนาดของรางรถไฟจะกาหนดเป็นน้าหนักต่อหน่วยความยาว เช่น ตามมาตรฐาน UIC จะกาหนดเป็นกิโลกรัมต่อเมตร ตามมาตรฐานอังกฤษจะกาหนดเป็นปอนด์ต่อหลา ซึ่งในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง ช่วงบางใหญ่ – บางซื่อ ใช้รางรถไฟแบบ UIC 60



รูปที่ 3.3 แสดงขนาดและมิติของรางรถไฟตามมาตรฐาน UIC 50 (ซ้าย) และ UIC 60 (ขวา) [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

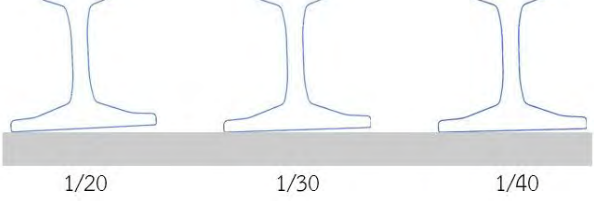
หน้าที่หลักสำคัญของรางรถไฟ คือ รับน้ำหนักขบวนรถไฟ และประคองรถไฟให้วิ่งไปตามทาง โดยหน้าที่ในการรับน้ำหนักขบวนรถไฟนั้น จะเป็นตัวกำหนดความสามารถของการรับน้ำหนักของทางรถไฟให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด เรียกว่า น้ำหนักกดเพลา (Axle load) และการกระจายของน้ำหนักบนทาง (Load concentration) โดยมีตัวเลขเป็นข้อกำหนดในการออกแบบทางรถไฟและขบวนรถไฟ ความกว้างของทางรถไฟ (Track gauge) คือ ระยะห่างระหว่างหัวรางด้านในทั้งสองด้านมีหลายแบบขึ้นอยู่กับขนาด ดังนี้

ขนาดความกว้างมากกว่า	1,600 mm	เรียกว่า บอร์ดเกจ (Broad gauge)
ขนาดความกว้าง	1,435 mm	เรียกว่า สแตนดาร์ดเกจ (Standard gauge)
ขนาดความกว้าง	1,067 mm	เรียกว่า แค็ปเกจ (Cape gauge)
ขนาดความกว้าง	1,000 mm	เรียกว่า มิเตอร์เกจ (Meter gauge)

โดยหัวรางด้านในทั้งสองด้านซึ่งใช้วัดระยะห่างตามที่กล่าวไปข้างต้น จะเรียกว่าด้าน Gauge side ส่วนหัวรางด้านนอกซึ่งอยู่ตรงข้ามกับด้าน Gauge side จะเรียกว่าด้าน Field side ดังแสดงในรูปที่ 3.4

รูปที่ 3.4 แสดงความกว้างของทางรถไฟ

นอกจากนี้ในการออกแบบและติดตั้งรางรถไฟจะมีการกำหนดให้มีมุมเอียงราง (Rail inclination) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยรางรถไฟในประเทศเยอรมนีและประเทศออสเตรียจะมีมุมเอียง 1/40 รางรถไฟในประเทศสวีเดนจะมีมุมเอียง 1/30 และรางรถไฟในประเทศฝรั่งเศสและประเทศโรมาเนียจะมีมุมเอียง 1/20



รูปที่ 3.5 ลักษณะมุมเอียงของรางรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

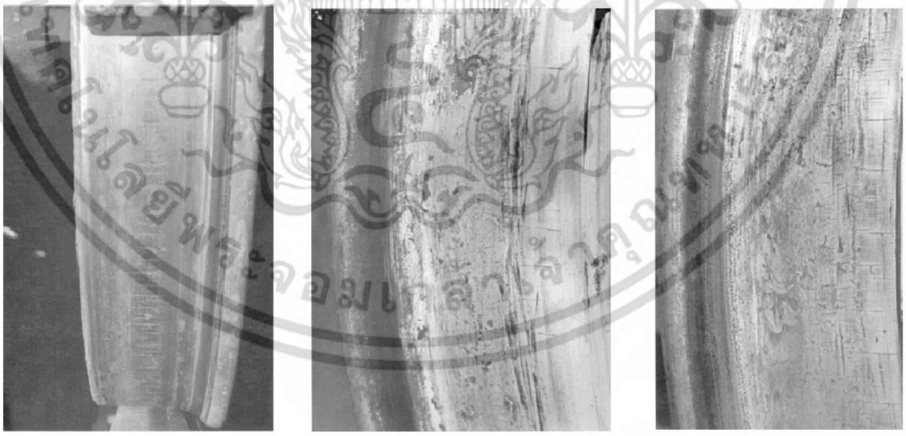
3.2.2 ความเสียหายของล้อและรางรถไฟ

เนื่องจากสภาวะกดดันทางเศรษฐกิจส่งผลให้ต้องมีการลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่ง จึงมีการเพิ่มน้ าหนักบรรทุก เพิ่มความหนาแน่นของการจราจรรวมถึงความเร็วในการขนส่ง โดยในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาได้มีการเพิ่มน้ำหนักกดเพลาจาก 22.5 ถึง 32.5 ตัน ส่งผลให้อัตราการเกิดความเสียหายของล้อและรางรถไฟเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 2 กลุ่ม คือ ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับล้อ และความเสียหายที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.2.1 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับล้อ

รอยแตกร้าวจากความร้อน (Thermal cracks)

ความเสียหายจากความร้อนเป็นประเภทความเสียหายของล้อที่รุนแรงที่สุด ซึ่งเกิดจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิร้อนเย็นสลับไปมาในบริเวณพื้นล้อ รวมถึงส่วนของขอบล้อที่มีการเบรค ซึ่งจะส่งผลให้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางโลหะของล้อทาให้เกิดรอยแตกร้าวในที่สุด รอยแตกร้าวที่เกิดจากความร้อนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณขอบของล้อและสามารถแก้ไขได้ด้วยการกลึงล้อ แต่หากไม่มีการด าเนินการใด ๆ เพื่อเป็นการป้องกัน รอยแตกร้าวจากความร้อนจะสามารถทาให้ล้อแตกหักได้ โดยรอยแตกร้าวจากความร้อนในล้อที่สามารถพบได้ทั่วไปจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 รอยแตกร้าวของล้อจากความร้อน [14]

การล้าจากการสัมผัสกลิ้ง (Rolling contact fatigue)

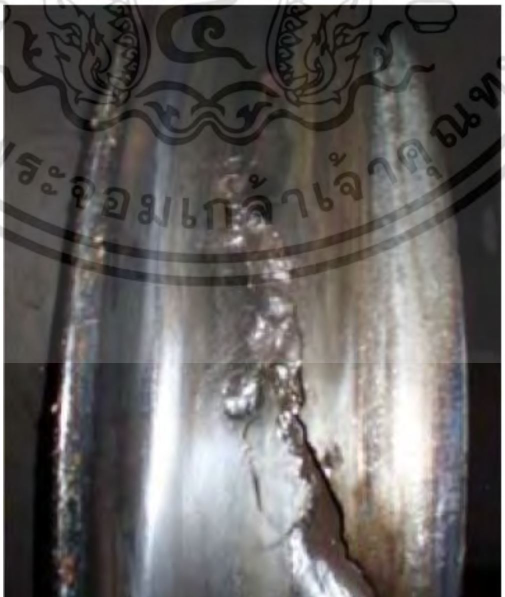
การล้าจากการสัมผัสกลิ้งจะเกิดขึ้นเมื่อล้อได้รับความเค้นสัมผัสซ้า ๆ เนื่องจากการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง โดยจะเกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสของพื้นล้อ และมีลักษณะเป็นบั้งและมีแนวการวางตัวไม่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของล้อ ซึ่งการล้าจากการสัมผัสกลิ้งเป็นสาเหตุหลักที่ทาให้เกิดรอยแตกร้าวในลักษณะที่มีการแตกเป็นเศษเล็ก ๆ (Spalling) ดังแสดงในรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.7 รอยแตกร้าวเนื่องจากการล้าของการสัมผัสกลิ้ง [14]

การล้าใต้ผิว (Subsurface fatigue)

รอยแตกร้าวจากการล้าใต้ผิวจะเกิดขึ้น 3 – 25 mm ใต้พื้นล้อ เนื่องจากความเค้นเฉือนจากการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟมีค่าสูงสุด จึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโลหะ โดยทั่วไปจะใช้อุปกรณ์อัลตร้าโซนิคในการตรวจสอบและระบุตาแหน่งรอยแตกร้าวใต้ผิว ซึ่งในรูปที่ 3.8 แสดงให้เห็นถึงรอยแตกร้าวที่ผิวของล้อซึ่งมีสาเหตุจากการแพร่กระจายของรอยแตกร้าวจากการล้าใต้ผิว



รูปที่ 3.8 รอยแตกร้าวที่ผิวซึ่งแพร่กระจายจากรอยแตกร้าวจากการล้าใต้ผิว [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยแตกร้าวจากการล้า (Fatigue cracks)

รอยแตกร้าวจากการล้ามีสาเหตุจากปัจจัยภายนอกหรือความผิดพลาดในการผลิต ซึ่งรอยแตกราวดังกล่าว ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเพียงล าพังดังแสดงในรูปที่ 3.9

รูปที่ 3.9 รอยแตกร้าวจากการล้า [14]

การแตกเป็นเศษเล็ก ๆ หรือพื้นล้อหลุดล่อน (Spalling or Shelled tread)

การแตกเป็นเศษเล็ก ๆ เป็นกระบวนการที่ชิ้นส่วนของวัสดุแตกและหลุดออกจากผิวของพื้นล้อในหลายต าแหน่ง มากหรือน้อยอย่างต่อเนื่องบริเวณรอบ ๆ ขอบนอกสุด ความเสียหายนี้จะปรากฏขึ้นเนื่องจากความเสียหายจากความร้อน การลื่นไถลหรือการเกิดความเค้นที่มากเกินไปในบริเวณจุดสัมผัส การแตกเป็นเศษเล็ก ๆ เกิดจากการรวมกันของปัจจัยอย่างน้อยสองอย่าง ได้แก่ สภาพรางรถไฟที่แย่และความเร็วที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดความเค้นสูงจากการกระแทก แรงในแนวดิ่งที่มากเกินไป การเบรคที่มากเกินไป (ความเสียหายจากความร้อนและ/ หรือการลื่นไถล) หรือความแข็งของล้อไม่เพียงพอ โดยในรูปที่ 3.10 จะแสดงการการแตกเป็นเศษเล็ก ๆ ของพื้นล้อที่สามารถมองเห็นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.10 การการแตกเป็นเศษเล็ก ๆ ของพื้นล้อ [14]

ล้อลื่นไถล (ล้อแบน) (Skidded wheels (Wheel flattening))

เมื่อล้อหยุดหมุนในขณะที่รถไฟยังมีการเคลื่อนที่อยู่จะส่งผลให้ล้อได้รับความเสียหาย โดยจะเรียกว่า ล้อลื่นไถล หรือล้อแบน (Skidded wheels (Wheel flattening)) ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกเป็นเศษเล็ก ๆ ของพื้นล้อ รวมถึงความเสียหายอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นกับล้อ นอกจากนี้ล้อลื่นไถลหรือล้อแบนจะส่งผลให้เกิดแรงกระแทกที่รุนแรงระหว่างล้อและรางรถไฟ ทาให้อายุการใช้งานของส่วนประกอบต่าง ๆ ของโบกี้ลดลง รวมถึงเป็นอันตรายต่อโครงสร้างของทางรถไฟด้วย โดยล้อลื่นไถล (ล้อแบน) จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.11

รูปที่ 3.11 พื้นของล้อลื่นไถล [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บังใบล้อเป็นสันคม (Arrises)

บังใบล้อเป็นสันคมจะเกิดขึ้นล้อมีการกลิ้งไปทางมุมเอียงของบังใบ ทาให้เกิดการสึกหรอและ ท าให้บังใบล้อมีรูปร่างเป็นสันคม ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของล้อ ดังแสดงในรูปที่ 3.12

รูปที่ 3.12 ล้อที่มีสันคม [14]

การสึกหรอของพื้นและบังใบล้อ (Tread/flange wear)

การสึกหรอของพื้นและบังใบล้อสามารถแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ตามลักษณะของการสึกหรอ รวมถึงพื้นล้อที่มีลักษณะกลวง ดังแสดงในรูปที่ 3.13

รูปที่ 3.13 พื้นล้อมีลักษณะกลวง [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ล้อเสียหาย (Damaged wheels)

ความเสียหายในกลุ่มนี้ประกอบด้วยความเสียหายที่เกิดจากความผิดพลาดในการผลิตรูปทรงของล้อไม่กลม รวมถึงล้อได้รับความร้อนมากเกินไป ซึ่งในกรณีที่ความเสียหายมีสาเหตุจากความผิดพลาดในการผลิตจะส่งผลให้รอยแตกร้าวที่เกิดจากการล้า มีการแพร่กระจายและปรากฏในบริเวณก้านล้อ นอกจากนี้ในกรณีที่พื้นล้อหมุนไม่กลมซึ่งอาจมีสาเหตุจากใบมีดเครื่องกัดทางานผิดพลาดหรือศูนย์กลางการหมุนของล้อไม่ตรงกับศูนย์กลางของเพลา จะทาให้เกิดแรงกระแทกที่รุนแรงจากภายนอกหรืออาจเรียกว่า ความเสียหายของล้อจากภายนอก ซึ่งแรงกระแทกจากภายนอกดังกล่าวจะทาให้เกิดรอยแตกร้าวจากการล้า โดยจะมีการแพร่กระจายอย่างรวดเร็วในทุกส่วนของล้อ โดยในรูปที่ 3.14 และรูปที่ 3.15 จะแสดงความเสียหายที่เกิดจากความผิดพลาดในการผลิตแบบต่าง ๆ

รูปที่ 3.14 ล้อที่มีการหมุนที่ไม่ดีเนื่องจากเครื่องกัด [14]

รูปที่ 3.15 ล้อที่มีการหมุนที่ไม่ดีเนื่องวัตถุภายนอก [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.2 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟ

ผิวรางหลุดล่อน (Shelling)

ผิวรางหลุดล่อนเป็นความเสียหายที่เกิดจากการสูญเสียวัสดุเนื่องจากการล้าใต้ผิว โดยการหลุดล่อนจะเกิดขึ้นที่มุมของหัวรางด้านที่อยู่สูงกว่าในบริเวณทางโค้ง โดยผิวรางที่หลุดล่อนจะมีลักษณะเป็นรูปวงรีและมีการกระจายตัวเช่นเดียวกับรอยแตกร้าวใต้ผิว ซึ่งขนานกับผิวของรางรถไฟ เมื่อรอยแตกร้าวเหล่านี้เกิดขึ้นบนพื้นผิวจะท ให้โลหะหลุดออกมาจากบริเวณดังกล่าว ในบางครั้งรอยแตกอาจมีการแพร่กระจายตัวในทิศทางพุ่งลงด้านล่างซึ่งจะเป็นสาเหตุทาให้รางรถไฟมีการแตกหักตามแนวขวาง โดยคุณสมบัติทางโลหะเป็นปัจจัยที่มีความสาคัญในการเริ่มต้นเกิดรอยแตกร้าวใต้ผิว นอกจากนี้ออกไซด์ฝังในและความเค้นตกค้างในระหว่างการผลิต มีส่วนทาให้ผิวรางเกิดการหลุดล่อน โดยในรูปที่ 3.16 จะแสดงการหลุดล่อนที่ผิวในบริเวณมุมของหัวราง ซึ่งความเสียหายดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ด้วยการเจียรรางรถไฟ

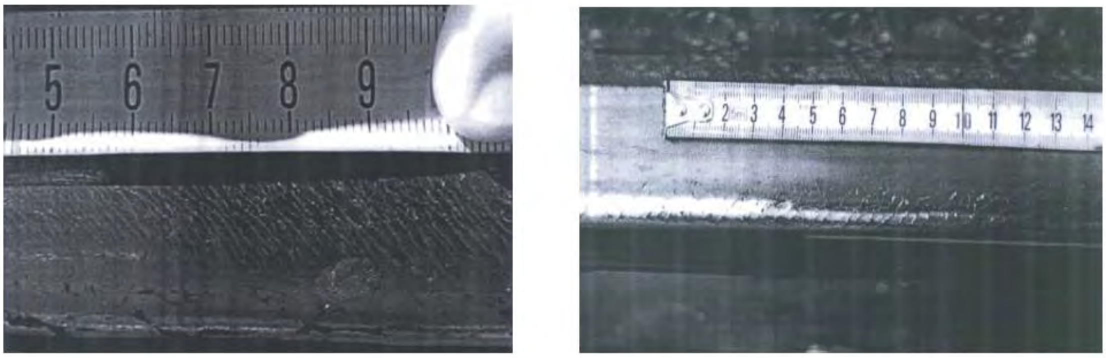
รูปที่ 3.16 การหลุดล่อนที่ผิวของหัวราง [15]

รอยร้าวที่หัวราง (Head checks)

โดยทั่วไปแล้วความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้นในบริเวณด้านบนของรางรถไฟจะมีค่าต่าเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณด้านข้างของรางรถไฟ อย่างไรก็ตามความเค้นสัมผัสจะมีค่าสูงในบริเวณมุมของรางด้านที่อยู่สูงกว่าในบริเวณที่มีรัศมีความโค้ง 1000 เมตร ถึง 1500 เมตร โดยรอยร้าวที่หัวรางจะเกิดขึ้นในบริเวณทางรถไฟที่มีรัศมีความโค้งแคบ (น้อยกว่า 1000 เมตร) ที่มุมของหัวรางด้านที่อยู่สูง

รอยร้าวที่หัวรางจะสามารถพบได้ในบริเวณที่มีการเชื่อม ซึ่งทาให้บริเวณดังกล่าวมีรูปร่างแตกต่างจากรางรถไฟในบริเวณอื่นเล็กน้อย โดยรูปร่างที่แตกต่างกันเป็นปัจจัยสาคัญที่ส่งผลกระทบต่อความเค้นสัมผัส รอยร้าวที่หัวรางเป็นความเสียหายที่เริ่มเกิดขึ้นที่ผิว โดยจะเกิดขึ้นที่มุม 30 – 60 องศา เมื่อเทียบกับรางรถไฟตามแนวยาว ดังแสดงในรูปที่ 3.17 หากไม่สามารถควบคุมรอยร้าวที่หัวรางได้ ความเสียหายดังกล่าวจะเป็นสาเหตุให้รางรถไฟแตก โดยทั่วไปจะแก้ไขด้วยการเจียรรางรถไฟ แต่หากรอยร้าวที่หัวรางรถไฟมีความรุนแรงก็จะท าการเปลี่ยนรางรถไฟในบริเวณนั้น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 รอยร้าวที่หัวราง [15]

การแตกหักเป็นเศษเล็ก ๆ (Spalling)

เมื่อแนวการแพร่กระจายของรอยแตกร้าวที่เกิดที่ผิวถูกตัดด้วยรอยแตกร้าวอื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกันในบริเวณหัวราง จะส่งผลให้วัสดุของรางรถไฟหลุดออกมาเป็นเศษเล็ก ๆ ซึ่งความเสียหายดังกล่าวเรียกว่า การแตกหักเป็นเศษเล็ก ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 โดยการแตกหักเป็นเศษเล็ก ๆ จะเกิดขึ้นในระยะหลังการแพร่กระจายตัวของรอยแตกร้าว การแตกหักเป็นเศษเล็ก ๆ มักพบได้บ่อยในสภาพอากาศหนาวเย็น เนื่องจากค่าความตึงของวัสดุของทางรถไฟเพิ่มขึ้น

รูปที่ 3.18 การแตกหักเป็นเศษเล็ก ๆ [15]

Squats

ความเสียหายแบบ Squats จะเกิดขึ้นที่ด้านบนของรางรถไฟในบริเวณทางตรง ซึ่งแตกต่างจากความเสียหายแบบผิวหลุดล่อน (Shelling) โดยรอยแตกร้าวจะเริ่มเกิดขึ้นที่ผิวเนื่องจากการล้าจากการสัมผัสกลิ้ง (RCF) ความเสียหายแบบ Squats จะเกิดขึ้นจากรอยแตกร้าวสองชนิด คือ รอยแตกร้าวนาและรอยแตกร้าวตามซึ่งมีทิศทางตรงกันข้าม โดยรอยแตกร้าวนาจะเกิดขึ้นในทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

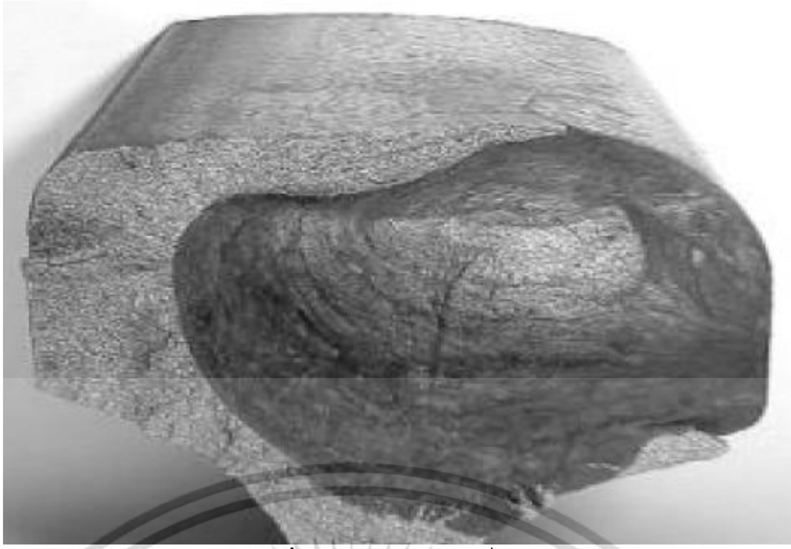
เดียวกับการจราจร แต่รอยแตกร้าวตามจะมีการแพร่กระจายที่เร็วกว่า หากไม่มีการป้องกันอย่างทันท่วงที รอยแตกร้าวตามจะมีการแตกแขนงและอาจจะมีการขยายตัวไปยังบริเวณเอวของราง (Rail web) ความเสียหายแบบ Squats ในเบื้องต้นจะมีลักษณะเหมือนรอยยุบที่บริเวณด้านบนของรางรถไฟ ซึ่งการยุบตัวคือผลลัพธ์ที่เกิดจากรอยแตกร้าว ซึ่งมีการแพร่กระจายและขยายตัวไปตามแนวราบใต้ผิวทางวิ่งและแยกออกจากตัวรางรถไฟ ความเสียหายนี้สามารถป้องกันได้โดยการเจียรรางรถไฟ จากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการเจียรรางรถไฟมีบทบาทสาคัญในการลดความเสียหายที่ทาให้รางรถไฟแตก การเปลี่ยนรางรถไฟที่เร็วเกินไป รวมถึงการตกราง

รูปที่ 3.19 Squats [15]

ตำหนิรูปไข่ (Tache ovale)

ตาหนิรูปไข่ (Tache ovale) คือ ความเสียหายที่เกิดขึ้นใต้ผิวที่ความลึกประมาณ 10 – 15 mm ใต้ผิวของหัวรางดังแสดงในรูปที่ 3.20 ซึ่งมีสาเหตุจากการสะสมของไฮโดรเจนในระหว่างกระบวนการผลิตรางรถไฟ หรือความผิดพลาดในขั้นตอนการเชื่อมราง นอกจากนี้ความร้อนและความเค้นสะสมยังเป็นสาเหตุของความเสียหายดังกล่าวด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 ต าหนิรูปไข่ [15]

การไหลของพลาสติกและ Tongue lipping (Plastic flow and Tongue lipping)

การไหลของพลาสติกจะเกิดขึ้นในบริเวณหัวราง อาจมีความลึกถึง 15 mm ในบริเวณด้านข้างของรางรถไฟ (Field side) รวมถึงรางรถไฟที่อยู่ในช่วงทางโค้งในด้านที่อยู่ต่ ากว่า เนื่องจากมีการบรรทุกเกินพิกัด สาหรับ Tongue lipping เป็นรูปแบบของการเสียรูปแบบพลาสติก แต่มีการเริ่มต้นเกิดการแตกร้าวที่ผิว โดยรอยแตกร้าวเหล่านี้จะทาให้วัสดุของรางรถไฟมีการแยกชั้น และเมื่อได้รับภาระจากน้าหนักกดเพลาที่มีค่าสูง จะส่งผลให้เนื้อวัสดุที่มีการแยกชั้นออกมามีการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกดังแสดงในรูปที่ 3.21 ทั้งนี้ความเสียหายดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ด้วยการเจียรรางรถไฟเพื่อให้รูปร่างมีลักษณะตามที่ก าหนดไว้

รูปที่ 3.21 Tongue lipping [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยแตกร้าวจากรูสลักเกลียว (Bolt hole crack)

รูสลักเกลียวจะปรากฏที่บริเวณเอวของรางมักจะเริ่มจากจุดที่ใช้ในการยึดประกับราง (Fishplate) ซึ่งเป็นจุดที่มีความอ่อนแอในการต่อต้านการเกิดรอยแตกร้าว เมื่อต้องเผชิญกับความเค้นที่มีความเข้มข้นและความเค้นเฉือนในบริเวณเอวของราง โดยรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะมีการแพร่กระจายในลักษณะเป็นรัศมีท ามุม45 องศา ตลอดระนาบของเอวราง ซึ่งรอยแตกร้าวนี้มีโอกาสที่จะทาให้เกิดการแตกหักของรางรถไฟสูงมาก จึงมีความจาเป็นที่ต้องเปลี่ยนรางรถไฟในช่วงดังกล่าวอย่างเร่งด่วน

รอยแตกร้าวแนวตั้งตามยาว (Longitudinal vertical crack)

รอยแตกร้าวแนวตั้งตามยาว เกิดจากความบกพร่องในกระบวนการผลิต สามารถพบได้มากในบริเวณเอวรางและอาจมีการขยายตัวไปจนถึงหัวรางด้วย หากรอยแตกร้าวนี้ถูกตัดด้วยรอยแตกร้าวอื่น อาจทาให้รางรถไฟเกิดการแตกหัก โดยในสภาวะที่มีอากาศหนาวเย็นจะมีโอกาสทาให้เกิดการแตกหักในลักษณะนี้ในทันทีทันใด

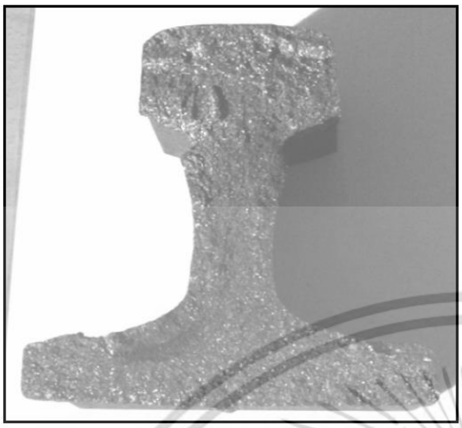
รูปที่ 3.22 รอยแตกร้าวแนวตั้งตามยาว [15]

รอยแตกร้าวทแยงมุม (Transverse crack)

รอยแตกร้าวทแยงมุมส่วนใหญ่จะมีการพัฒนาจากพื้นที่ตัดขวางของรอยเชื่อมรางรถไฟที่มีความบกพร่อง โดยความบกพร่องของรอยเชื่อมจะมีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของวัสดุที่ใช้เชื่อมหรือรางรถไฟที่มีความบกพร่องจากกระบวนการผลิต ซึ่งรอยแตกร้าวทแยงมุมในบริเวณรอยเชื่อมจะมีสาเหตุจากความบกพร่องจากกระบวนการเชื่อม เช่น รูพรุน สารฝังใน แนวของรางรถไฟไม่ตรงกัน เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.23 รอยร้าวทแยงมุมที่เกิดขึ้นจากบริเวณกึ่งกลางของหัวรางหรือตีนรางอาจจะมีสาเหตุจากตาหนิรูปไข่ (Tache ovale) โดยรอยแตกร้าวนี้จะเริ่มเกิดขึ้นที่ใต้ผิวและเมื่อเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านไปจะมีการแพร่กระจายไปจนถึงผิวของหัวรางจะส่งผลให้รางรถไฟแตก ทั้งนี้การใช้โลหะที่มีความสะอาดและการท าให้หัวรางมีความแข็งลึกขึ้นจะสามารถหลีกเลี่ยงรอยแตกร้าวในลักษณะนี้ได้



รูปที่ 3.23 รอยแตกร้าวทแยงมุม [15]

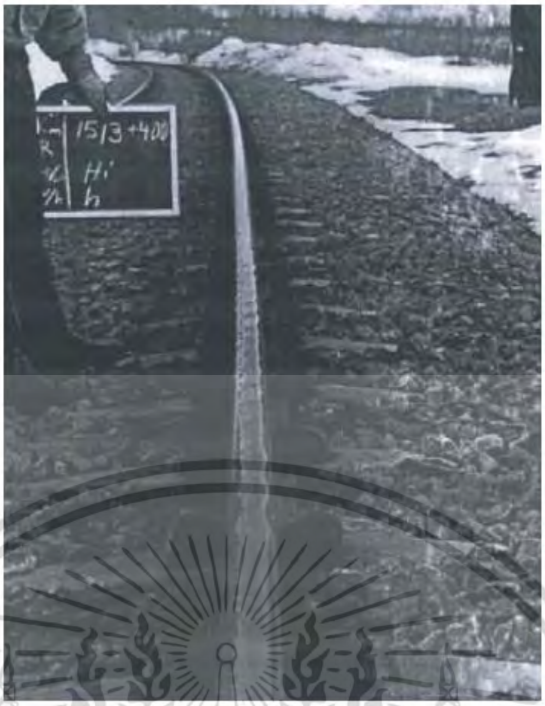
การโก่งของรางรถไฟ (Buckling)

การโก่งของรางรถไฟมีสาเหตุจากการขยายตัวของรางรถไฟตามแนวยาวเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น เป็นความเสียหายหนึ่งที่สามารถพบได้บ่อย โดยรางรถไฟที่มีการใช้งานในปัจจุบันจะมี 2 แบบ คือ รางรถไฟแบบเชื่อมต่อเนื่อง และรางรถไฟแบบไม่เชื่อมต่อเนื่อง ซึ่งรางรถไฟทั้งสองแบบมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน โดยรางรถไฟแบบไม่เชื่อมต่อเนื่องจะมีพื้นที่บริเวณรอยต่อของรางที่สามารถรองรับการขยายตัวทาให้ไม่เกิดการโกง เหมาะแก่การใช้งานในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 25° อย่างไรก็ตามรางรถไฟแบบไม่เชื่อมต่อเนื่องจะมีการสะสมความเค้นที่มีความเข้มข้นสูงในบริเวณรอยต่อซึ่งจะมีค่าสูงมากในรางรถไฟความเร็วสูง ในขณะที่รางรถไฟแบบเชื่อมต่อเนื่องจะมีการกระจายตัวของความเค้นอย่างสม่าเสมอ และไม่ต้องการการซ่อมบารุงมากนักจึงทาให้สามารถช่วยลดต้นทุนได้ แต่เนื่องจากรางรถไฟแบบเชื่อมต่อเนื่องไม่มีพื้นที่สาหรับการขยายตัวตามแนวยาว ทาให้มีข้อจากัดเรื่องอุณหภูมิในการใช้งาน นอกจากนี้การโก่งของรางรถไฟเป็นความเสี่ยงที่อาจส่งผลให้รถไฟตกราง จึงมีความจ าเป็นต้องวิเคราะห์หาสาเหตุเพื่อวางแผนการซ่อมบ ารุงต่อไป

ผิวรางเป็นลูกฟูก (Corrugation)

เป็นความบกพร่อง ของรางรถไฟที่มีลักษณะเป็นคลื่น เช่นเดียวกับการสึกหรอของรางรถไฟ ดังแสดงในรูปที่ 3.24 โดยผิวรางเป็นลูกฟูกมีสาเหตุจากการสึกหรอ การล้าหรือการไหลของพลาสติก ซึ่งความเสียหายดังกล่าวไม่ส่งผลให้เกิดการตกรางในทันที แต่อาจส่งผลให้เครื่องยึดเหนี่ยวมีการคลายตัว หินโรยทางรถไฟเสื่อมสภาพ ระดับเสียงและการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นท าให้ผู้โดยสารรู้สึกไม่สบาย

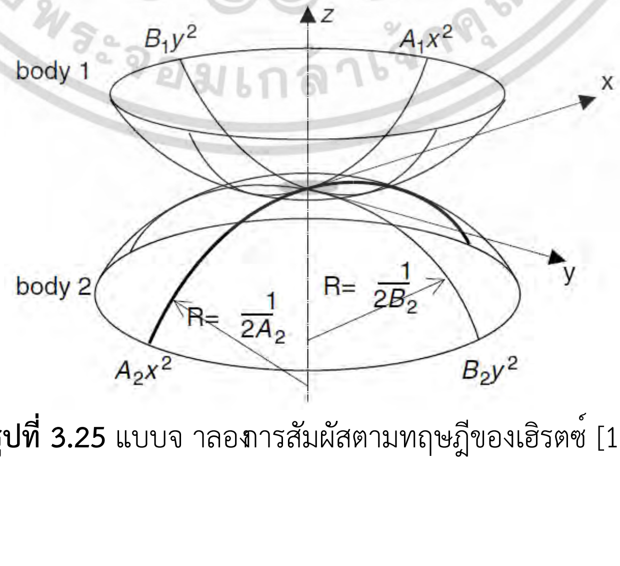
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 ผิวรางเป็นลูกฟูก [15]

3.3 ทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์

ทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ (Hertz contact theory) ถูกเผยแพร่ในปี ค.ศ. 1882 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ชื่อ Heinrich Hertz ได้ทาการศึกษาการสัมผัสของของแข็งยืดหยุ่น โดยได้อธิบายคุณสมบัติการสัมผัสกันของเลนส์ โดยความเค้นสัมผัสของเฮิรตซ์ (Hertzian stress contact) คือความเค้นที่เกิดจากการสัมผัสระหว่างพื้นผิวโค้งของเลนส์ภายใต้แรงกระทาในแนวตั้งฉาก ดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 แบบจ าลองการสัมผัสตามทฤษฎีของเฮิรตซ์ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวได้ถูกน ามาประยุกต์ใช้ในการศึกษาการสัมผัสของล้อและรางรถไฟ กล่าวคือ เมื่อล้อกดลงบนรางรถไฟจะส่งผลให้พื้นที่สัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟมีลักษณะเป็นรูปวงรี โดยมีที่ระยะครึ่งของวงรีสัมผัสตามแนวแกนหลัก (Major semi-axes of contact ellipse) คือ a และระยะครึ่งของวงรีสัมผัสตามแนวแกนรอง (Minor semi-axes of contact ellipse) คือ b ซึ่งสามารถค านวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$a = m\left[\frac{3\pi P\left(K_1 + K_2\right)}{4K_3}\right]^{\frac{1}{3}} \tag{3.1}$$

$$b = n\left[\frac{3\pi P\left(K_1 + K_2\right)}{4K_3}\right]^{\frac{1}{3}} \tag{3.2}$$

โดย P คือ แรงกระท าในแนวตั้งฉากทั้งหมด และ

$$K_1 = \frac{1-\nu_W^2}{\pi E_W} \tag{3.3}$$

$$K_2 = \frac{1-\nu_R^2}{\pi E_R} \tag{3.4}$$

$$K_3 = \frac{1}{2}\left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R'_2}\right] \tag{3.5}$$

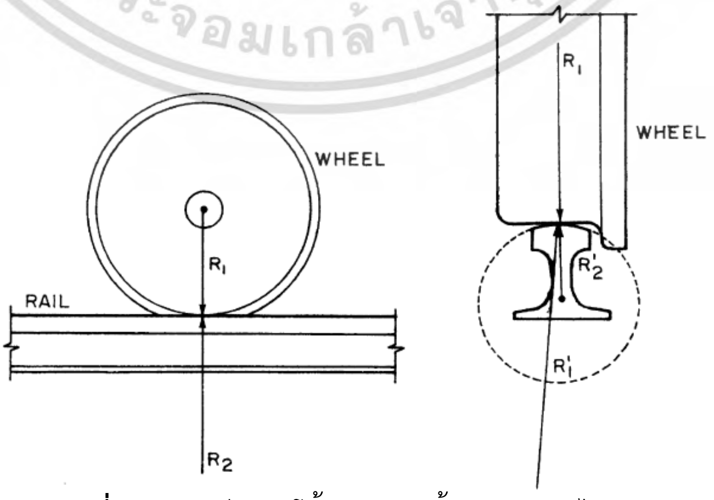
โดย R_1 คือ รัศมีการกลิ้งหลักของล้อ

R_1' คือ รัศมีความโค้งของล้อที่จุดสัมผัสตามแนวขวาง

R_2 คือ รัศมีการกลิ้งหลักของรางรถไฟที่จุดสัมผัส ($R_2 = \infty$)

R'_2 คือ รัศมีความโค้งของรางรถไฟที่จุดสัมผัสตามแนวขวาง

ดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 รัศมีความโค้งหลักของล้อและรางรถไฟ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ ν_W , ν_R คือ อัตราส่วนพัวซองของวัสดุของล้อและรางรถไฟตามลำดับ

E_W , E_R คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุของล้อและรางรถไฟตามลำดับ

ทั้งนี้ รัศมีความโค้งของวัตถุจะมีค่าเป็นบวกถ้าจุดศูนย์กลางของรัศมีความโค้งอยู่ภายในวัตถุ และในสมการ (3.1) และ (3.2) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วน $\frac{K_4}{K_3}$ โดย K_4 สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$K_4 = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R'_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R'_2}\right)^2 + 2\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R'_1}\right)\left(\frac{1}{R_2}-\frac{1}{R'_2}\right)\cos 2\psi\right] \quad (3.6)$$

โดยที่ ψ คือมุมระหว่างระนาบหลักซึ่งประกอบด้วยรัศมีความโค้ง $\frac{1}{R_1}$ และ $\frac{1}{R_2}$

สัมประสิทธิ์ m และ n แสดงในตารางที่ 1 ในรูปของ θ ซึ่ง θ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{K_4}{K_3}\right) \quad (3.7)$$

ตารางที่ 3.1 แสดงสัมประสิทธิ์ m และ n

θ(deg)	m	n	θ(deg)	m	n	θ(deg)	m	n
0.5	61.40	0.1018	10	6.604	0.3112	60	1.4860	0.7170
1	36.89	0.1314	20	3.813	1.4123	65	1.3780	0.7590
1.5	27.48	0.1522	30	2.731	0.493	70	1.2840	0.8020
2	22.26	0.1691	35	2.397	0.530	75	1.2020	0.8460
3	16.50	0.1964	40	2.136	0.567	80	1.1280	0.8930
4	13.31	0.2188	45	1.926	0.604	85	1.0610	0.9440
6	9.79	0.2552	50	1.754	0.641	90	1.0000	1.0000
8	7.86	0.285	55	1.611	0.678			

ความดันสัมผัสในแนวตั้งฉากที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในพื้นที่สัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$p(x,y) = p_0\left\{1-\left(\frac{x}{a}\right)^2-\left(\frac{y}{b}\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

$$p_0 = \frac{3P}{2\pi ab} \quad (3.9)$$

โดย $p(x,y)$ คือ ความดันสัมผัสในแนวตั้งฉากที่ตำแหน่งต่าง ๆ

p_0 คือ ความดันสัมผัสในแนวตั้งฉากสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของพื้นที่สัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้น (Stress) ในแนวตั้งฉากที่ความลึกต่าง ๆ ใต้ผิวสัมผัสที่จุดกึ่งกลางของพื้นที่สัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟสามารถค านวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{\sigma_z}{p_0} = -\frac{b}{e^2 a}\left(\frac{1-T^2}{T}\right) \quad (3.10)$$

$$T = \left(\frac{b^2+z^2}{a^2+z^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.11)$$

$$e = \left(1-\frac{b^2}{a^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.12$$

โดย e คือ ค่าความเยื้องศูนย์ของรูปวงรี

3.4 ทฤษฎีความเสียหาย

ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับวัสดุในรูปแบบต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการทรุดตัว การบิดเบือนรูปร่างอย่างถาวร การเกิดรอยร้าว และการแตกหัก คือ ความเสียหายซึ่งทาให้เครื่องจักรกลไม่สามารถทางานได้ตามที่ออกแบบไว้ เครื่องมือสาหรับทดสอบเครื่องจักรกลเพิ่งจะเริ่มมีในปี 1970 และมีการนาชิ้นงานทดสอบมาดึง ดัด และบิด พร้อมทั้งรวบรวมข้อมูลผลการทดลอง เพื่อศึกษาแนวคิดเกี่ยวกับความเครียดในชิ้นงาน ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด และขีดจากัดความยืดหยุ่นของวัสดุและสร้างเป็นทฤษฎีความยืดหยุ่นของวัสดุ

ถ้าความเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรเป็นความเสียหายอย่างง่าย การทดสอบอย่างง่ายก็จะสามารถบอกข้อเท็จจริงของความเสียหายได้ อย่างไรก็ตามยังไม่มีทฤษฎีความเสียหายสากลที่ใช้ได้กับวัสดุโดยทั่วไป ส าหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันในสภาวะความเค้นต่าง ๆ แต่ได้มีการตั้งสมมติฐานโดยการพิจารณาโครงสร้างของวัสดุ และมีการจาแนกวัสดุตามพฤติกรรมความยืดหยุ่นของวัสดุออกเป็นวัสดุเหนียว วัสดุเปราะ และวัสดุเหนียวที่จะเสียหายในรูปแบบความเปราะ

วัสดุจะมีความยืดหยุ่นก็ต่อเมื่อวัสดุนั้นมีการกลับคืนรูปทรง หรือมีความยาวเท่ากับความยาวเริ่มต้น เมื่อแรงที่กระท าต่อวัสดุตัวอย่างถูกเคลื่อนย้ายออกไปแล้ว พฤติกรรมความยืดหยุ่นนี้จะเกิดขึ้นในขณะที่ความเค้นยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด หรือพูดได้ว่าวัสดุจะมีความยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic) ถ้าความเค้นมีมากเกินขีดจากัดของสัดส่วน (Proportional limit) วัสดุจะยังคงมีการตอบสนองต่อความยืดหยุ่น แต่จะก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเครียดอย่างต่อเนื่อง เมื่อเพิ่มความเค้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งถึงขีดจากัดของความยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่เมื่อน าแรงภายนอกออกแล้ววัสดุตัวอย่างจะกลับมามีขนาดตามเดิม

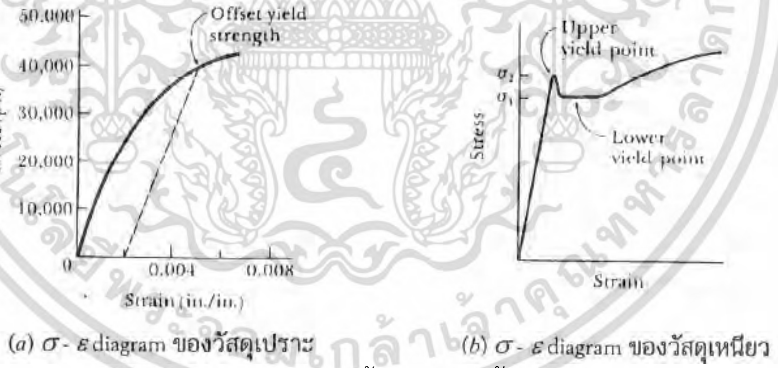
การเพิ่มความเค้นขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย จะท าให้ขีดจ ากัดของความยืดหยุ่นมีค่าต่ าลงและส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร พฤติกรรมนี้เรียกว่า “การคราก (Yielding)” ความเค้นที่ก่อให้เกิดการครากนี้เรียกว่า “ความเค้นคราก หรือจุดคราก (Yield stress or Yield point) – σ_y ”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้น ณ จุดนี้ถือเป็นหลักในการออกแบบโดยทั่วไป การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร หรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก (Plastic deformation) สาหรับวัสดุที่ไม่มีจุดคราก เช่น เหล็กหล่อ ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุเปราะ ก็อาจใช้ความต้านแรงดึง (Ultimate stress) $-\sigma_u$ เป็นหลักในการออกแบบ

วัสดุใด ๆ ที่ถูกแรงกระท าแล้วเกิดความเครียดที่มีค่ามาก ๆ ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก เรียกว่า "วัสดุเหนียว" เช่น เหล็กเหนียว (Mild steel) โดยทั่วไปวิศวกรจะเลือกวัสดุเหนียวในการออกแบบ เนื่องจากวัสดุสามารถดูดซับพลังงานหรือแรงที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลันได้ และถ้าวัสดุถูกกระทาด้วยแรงมากเกินไปจะทาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปอย่างมากก่อนที่จะเกิดการแตกหัก วัสดุเหนียวจะมีค่า $\varepsilon_f \geq 0.05$ และมีค่าความต้านแรงครากอย่างชัดเจน ซึ่งมักจะมีค่าเดียวกันส หรับการดึงและการอัด ($S_{yt} = S_{yc} = S_y$)

สาหรับวัสดุที่มีจุดครากต่ามาก หรือไม่มีจุดครากก่อนเกิดการแตกหัก และ $\varepsilon_f < 0.05$ จะเรียกว่า "วัสดุเปราะ" เช่น อะลูมิเนียม โดยมาก $\sigma - \varepsilon$ diagram จะแสดงเป็นรูปโค้งที่ไม่มีจุดครากที่แน่ชัด ดังนั้น จึงนิยามความต้านแรงคราก (Yield strength) จากวิธีทางกราฟฟิกที่เรียกว่า Offset method โดยเลือกใช้จุดที่มีค่าความเครียดเท่ากับ 0.2% (0.002) และวัดจากจุดนี้ที่อยู่บนแกน ε แล้วลากเส้นขนานกับส่วนที่เป็นเส้นตรงไปจนตัดกับส่วนโค้งของกราฟ ก็จะได้ค่าความเค้นที่เป็นความต้านแรงคราก ดังแสดงในรูปที่ 3.27



(a) σ- ε diagram ของวัสดุเปราะ (b) σ- ε diagram ของวัสดุเหนียว

รูปที่ 3.27 แสดงค่าความเค้นที่เป็นจุดต้านแรงคราก [22]

เมื่อชิ้นงานที่ออกแบบไม่สามารถทางานได้ตามที่ออกแบบไว้ เราเรียกว่า เกิดความเสียหาย ต้องทาการซ่อมแซมหรือทิ้งไป คาว่าเสียหายในที่นี้มีความหมายกว้างมาก เช่น ชิ้นงานอาจจะได้รับแรงมากจนเกินไปจนเกิดการครากขึ้น การเกิดรอยร้ายหรือรอยแตกหัก เกิดการโค้งงอมากกว่าปกติจนเสียรูป หรือเกิดการล้าจนหักพังในที่สุด สภาพการใช้งานที่ไม่ตรงเงื่อนไขในการออกแบบ เช่น ลักษณะและขนาดของแรงที่กระทา ลักษณะผิวของชิ้นงาน หรือสภาวะแวดล้อมในการใช้งานที่แตกต่างไปจากเงื่อนไขในการออกแบบ อาจเป็นสาเหตุของความเสียหายเหล่านี้ อย่างไรก็ตามในการเลือกใช้ทฤษฎีต่าง ๆ วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องระลึกไว้เสมอว่าวัสดุส่วนใหญ่จะมีพฤติกรรมเป็นเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปราะเมื่อมีคาร์บอนผสมอยู่สูง และจะมีพฤติกรรมเป็นเหล็กเหนียวเมื่อมีปริมาณคาร์บอนน้อยลง นอกจากนั้นที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุจะแข็งแต่เปราะง่าย ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น วัสดุจะมีสภาพอ่อนตัวแต่เหนียวขึ้น และเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้น วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องกาหนดค่าตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ เช่น แรง ความเค้น การยืดตัว อายุการใช้งาน อุณหภูมิการใช้งาน และอื่น ๆ ให้มีค่าต่ากว่าค่าสูงสุดที่ได้จากการคานวณโดยใช้ทฤษฎีต่าง ๆ ในอัตราส่วนของค่าสูงสุดที่ชิ้นงานสามารถรองรับได้ ต่อค่าที่ใช้ในการออกแบบนี้ เรียกว่า แฟกเตอร์ในการออกแบบ หรือค่าความปลอดภัย ใช้สัญลักษณ์ n ส าหรับการออกแบบที่ใช้ความเค้นเป็นหลัก

$$\text{ค่าความปลอดภัย} = \frac{\text{ความเค้นสูงสุดที่ชิ้นงานจะรองรับได้}}{\text{ความเค้นที่ยอมรับได้ในการใช้งาน}} \text{ หรือ } n = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{allow}} \tag{3.13}$$

มีทฤษฎีต่าง ๆ ที่ใช้เป็นหลักเกณฑ์ในการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับชิ้นงานที่ออกแบบซึ่งเกี่ยวข้องกับงานวิจัย ดังนี้

3.4.1 ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดสำหรับวัสดุเหนียว

ทฤษฎีนี้ได้ถูกนาเสนอโดย เฮนรี่ เทสคา (Henri Tresca) ในปี ค.ศ.1868 ซึ่งเกิดจากการสังเกตว่า วัสดุเหนียวจะเกิดการคราก เนื่องจากผลของการเลื่อน หรือเฉือนในระนาบของผลึก โดยทฤษฎีนี้กล่าวว่า “วัสดุจะเริ่มคราก เมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้น มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับความเค้นเฉือนสูงสุดขณะที่เริ่มครากของชิ้นทดสอบด้วยการดึงอย่างง่าย”

สาหรับการทดสอบแรงดึงอย่างง่าย $\sigma = \frac{P}{A}$ ความเค้นเฉือนสูงสุดจะเกิดขึ้นบนระนาบที่ทามุม 45° กับระนาบของแนวดึง โดยมีขนาด $\tau_{\max} = \frac{\sigma}{2}$ ดังนั้น ความเค้นเฉือนสูงสุดที่จุดครากจึงมีค่า $\tau_{\max} = \frac{S_y}{2}$ สาหรับสภาวะความเค้นใน 3 มิติ ความเค้นหลักในแต่ละระนาบจะมีขนาดเรียงตามลาดับ คือ $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ นั่นคือ ความเค้นเฉือนสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ $\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ ดังนั้น ส าหรับสภาวะความเค้นโดยทั่วไปจะได้

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq \frac{S_y}{2} \quad \text{เมื่อ } \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \tag{3.14}$$

หรือ

$$\sigma_1 - \sigma_3 \geq S_y \tag{3.15}$$

ให้สังเกตว่า สมการนี้บอกให้ทราบว่า ความต้านแรงครากในการเฉือนจะมีค่าดังนี้

$$S_{sy} = 0.5 S_y \tag{3.16}$$

เพื่อวัตถุประสงค์ในการออกแบบ เราสามารถปรับปรุงสมการที่ (3.14) ให้มีค่าแฟกเตอร์ในการออกแบบรวมอยู่ด้วย คือ

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{S_y}{n} \tag{3.17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาหรับปัญหาความเค้นในระนาบสามารถวิเคราะห์ได้ง่าย โดยกาหนดให้ความเค้นหลักในระนาบใดระนาบหนึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์ และหาความเค้นที่เหลือ σ_A และ σ_B จากสมการ

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \qquad (3.18)$$

โดย $\sigma_A \geq \sigma_B$ ดังนั้น สาหรับความเค้นใน 3 มิติ การใช้สมการ (3.14) ในการพิจารณาความเค้นในระนาบจึงมี 3 กรณีที่ต้องพิจารณา

กรณีที่ 1 : $\sigma_A \geq \sigma_B \geq 0$ สาหรับกรณีนี้ $\sigma_1 = \sigma_A$ และ $\sigma_3 = 0$ ดังนั้นเงื่อนไขของสมการที่ (3.14) จึงเป็น

$$\sigma_A = S_y \qquad (3.19)$$

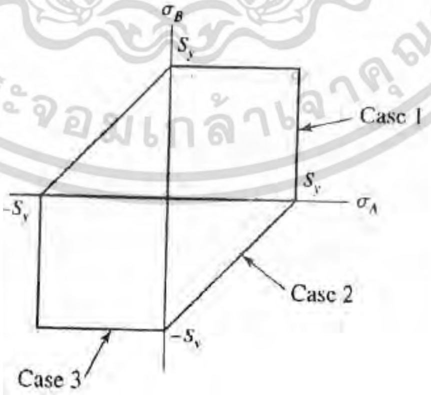
กรณีที่ 2 : $\sigma_A \geq 0 \geq \sigma_B$ สาหรับกรณีนี้ $\sigma_1 = \sigma_A$ และ $\sigma_3 = \sigma_B$ ดังนั้นเงื่อนไขของสมการที่ (3.14) จึงเป็น

$$\sigma_A - \sigma_B = S_y \qquad (3.20)$$

กรณีที่ 3 : $0 \geq \sigma_A \geq \sigma_B$ สาหรับกรณีนี้ $\sigma_1 = 0$ และ $\sigma_3 = \sigma_B$ ดังนั้นเงื่อนไขของสมการที่ (3.14) จึงเป็น

$$\sigma_B = -S_y \qquad (3.21)$$

สมการที่ (3.19) ถึง (3.21) แสดงให้เห็นโดยเส้น 3 เส้นในระนาบ σ_A, σ_B ตามรูปที่ 3.28 ส าหรับเส้นที่เหลือซึ่งไม่มีเครื่องหมายแสดงไว้เป็นกรณีที่ $\sigma_B \geq \sigma_A$ ซึ่งจะไม่ถูกน าไปใช้ตามปกติ ส่วนการแปลงสมการที่ (3.19) ถึง (3.21) ให้เป็นสมการที่ใช้ในการออกแบบ แค่เพียงแทนค่า S_y ด้วย $\frac{S_y}{n}$



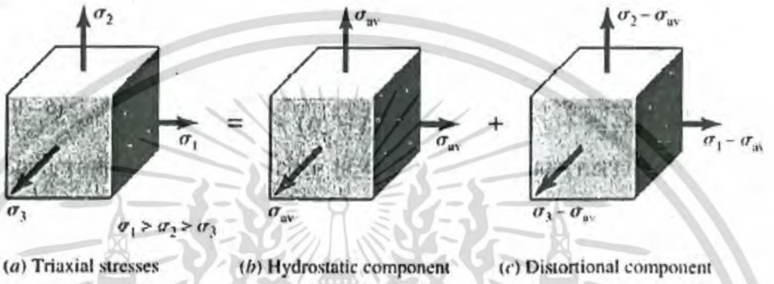
รูปที่ 3.28 สมการที่ (3.19) - (3.21) ในระนาบ σ_A, σ_B [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป

ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป (Distortion – Energy Theory) นี้เกิดจากการสังเกตพลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปของวัสดุเหนียว โดยทฤษฎีนี้กล่าวว่า “วัสดุจะเริ่มคราก เมื่อพลังงานของการเปลี่ยนรูปต่อหน่วยปริมาตรของชิ้นงานที่อยู่ภายใต้ความเค้นรวม มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานของการเปลี่ยนรูปเนื่องจากการครากที่เกิดขึ้นในการทดสอบด้วยการดึงอย่างง่าย”

ในการพัฒนาสมการสาหรับทฤษฎีนี้ ให้พิจารณาพลังงานของการเปลี่ยนรูปในชิ้นส่วนรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์เล็ก ๆ ที่อยู่ภายใต้ความเค้นใน 3 มิติ σ_1, σ_2 และ σ_3 ดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 แสดงพลังงานของการเปลี่ยนรูปลูกบาศก์ภายใต้ความเค้น 3 มิติ [22]

โดย

$$\sigma_{av} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \tag{3.22}$$

ดังนั้น ชิ้นส่วนในรูปที่ 3.29 (b) จะมีปริมาตรเปลี่ยนแปลงไปโดยไม่มีการบิดเบือนรูปร่างเชิงมุม ถ้าเราถือว่า σ_{av} เป็นองค์ประกอบของ σ_1, σ_2 และ σ_3 องค์ประกอบนี้ก็จะนาไปลบออกได้ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.29 (c) ซึ่งองค์ประกอบนี้จะเป็นองค์ประกอบที่อยู่ภายใต้การบิดเบือนรูปร่างเชิงมุม โดยที่ปริมาตรไม่มีการเปลี่ยนแปลง

พลังงานความเครียดต่อหน่วยปริมาตรภายใต้ความเค้นใน 3 มิติ คือ

$$u = \frac{1}{2}\left(\in_1 \sigma_1 + \in_2 \sigma_2 \in_3 \sigma_3\right) \tag{3.23}$$

$$= \frac{1}{2E}\left[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu\left(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1\right)\right] \tag{3.24}$$

พลังงานความเครียดที่ท าให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะปริมาตร u_ν จึงหาได้โดยแทนค่า σ_{av} ส าหรับ σ_1, σ_2 และ σ_3 ในสมการ (3.24) ซึ่งจะได้

$$u_\nu = \frac{3\sigma_{av}^2}{2E}\left(1 - 2\nu\right) \tag{3.25}$$

ถ้าแทนค่าสมการ (3.22) ยกก าลังสอง ลงในสมการ (3.25) และจัดให้อยู่ในรูปอย่างง่ายจะได้

$$u_\nu = \frac{1 - 2\nu}{6E}\left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + 2\sigma_1\sigma_2 + 2\sigma_2\sigma_3 + 2\sigma_3\sigma_1\right) \tag{3.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น จะสามารถหาพลังงานของการเปลี่ยนรูปได้จากการนาสมการที่ (3.26) ไปลบออกจาก สมการ (3.24) จะได้

$$u_d = u - u_v = \frac{1+v}{3E}\left[\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}{2}\right] \quad (3.27)$$

ให้สังเกตว่า พลังงานของการเปลี่ยนรูปจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อ $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$

สาหรับการทดลองแรงดึงอย่างง่าย ที่จุดคราก $\sigma_1 = S_y$ และ $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ดังนั้นพลังงานของการเปลี่ยนรูปจะมีค่าเท่ากับ

$$u_d = \frac{1+v}{3E} S_y^2 \quad (3.28)$$

ดังนั้น สาหรับสภาวะความเค้นในสมการที่ (3.27) จะทาให้สามารถทานายจุดครากของชิ้นงานได้ ถ้าสมการที่ (3.27) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสมการที่ (3.28) ซึ่งจะได้

$$\left[\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}{2}\right]^{\frac{1}{2}} \ge S_y \quad (3.29)$$

ในการทดสอบแรงดึงอย่างง่าย จะเกิดความเค้น σ จากการครากของชิ้นงานจะเกิดขึ้นเมื่อ $\sigma \ge S_y$ ดังนั้น เทอมทางซ้ายมือของสมการที่ (3.29) จะเป็นค่าความเค้นที่มีผลต่อพลังงานของการเปลี่ยนรูป (Effective stress) ซึ่งนิยมเรียกว่า “von Mises stress” ตามชื่อของผู้คิดค้นทฤษฎีนี้ โดยใช้สัญลักษณ์ σ' ดังนั้น จึงสามารถเขียนสมการที่ (3.29) ได้เป็น

$$\sigma' \ge S_y \quad (3.30)$$

เมื่อ

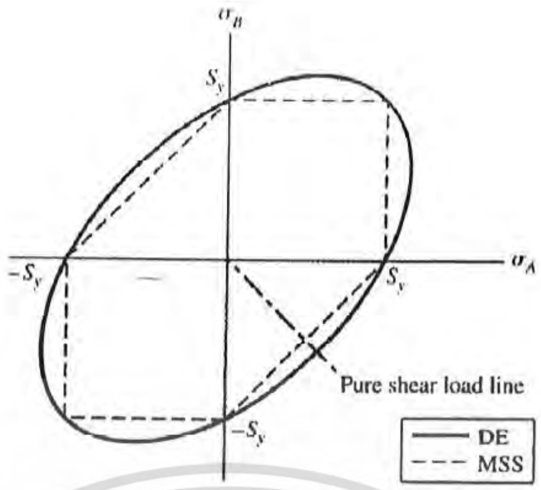
$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}{2}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.31)$$

ส าหรับควมเค้นในระนาบ ก าหนดให้ σ_A และ σ_B เป็นความเค้นหลักซึ่งมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\sigma' = \left(\sigma_A^2 - \sigma_A\sigma_B + \sigma_B^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.32)$$

สมการที่ (3.32) นี้เป็นสมการของวงรีบนระนาบ $\sigma_A\sigma_B$ ดังแสดงตามรูปที่ 3.30 โดย $\sigma' = S_y$ เส้นประในรูป คือ ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (MSS) ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีขีดจ ากัดมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 แสดงสมการ σ' บนระนาบ $\sigma_A\sigma_B$ [22]

การใช้องค์ประกอบของความเค้นใน 3 มิติ xyz จะสามารถเขียน von Mises stress ได้ดังนี้

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\left(\sigma_x-\sigma_y\right)^2+\left(\sigma_y-\sigma_z\right)^2+\left(\sigma_z-\sigma_x\right)^2+6\left(\tau_{xy}^2+\tau_{yz}^2+\tau_{zx}^2\right)\right]^{1/2} \qquad (3.33)$$

ดังนั้น ส าหรับความเค้นในระนาบ $\sigma_z = 0$

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\left(\sigma_x-\sigma_y\right)^2+\left(\sigma_y-\sigma_z\right)^2+\left(\sigma_z-\sigma_x\right)^2+6\left(\tau_{xy}^2+\tau_{yz}^2+\tau_{zx}^2\right)\right]^{1/2} \qquad (3.34)$$

$$\sigma' = \left(\sigma_x^2-\sigma_x\sigma_y+\sigma_y^2+3\tau_{xy}^2\right)^{1/2} \qquad (3.35)$$

ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป มีชื่อเรียกอย่างอื่นว่า

ทฤษฎี von Mises หรือ von Mises – Hencky

ทฤษฎีพลังงานความเค้นเฉือน (Shear – energy theory)

ทฤษฎีความเค้นเฉือนออกตะฮีดรัล (Octahedral – shear – stress theory)

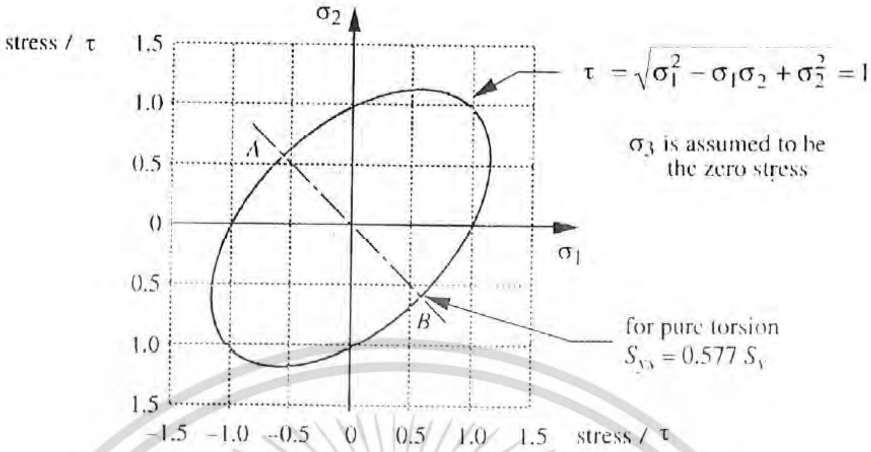
โมเดลสาหรับทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด จะไม่สนใจความเค้นหลักบนระนาบที่เอียงทามุม 45° กับระนาบของการดึง ซึ่งมีค่า $\frac{P}{2A}$ และไม่สนใจ Hydrostatic stress ซึ่งมีค่า $\frac{P}{3A}$ และนี่คือเหตุผลที่ทาให้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด แตกต่างไปจากทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป หรือทฤษฎีความเค้นเฉือนออกตะฮีดรัล

ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลโดยทั่วไป จะพิจารณาความเค้นในระนาบ ซึ่ง $\sigma_3 = 0$ เมื่อใช้ค่าความปลอดภัย n และก าหนดค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจริง (von Mises stress), σ' คือ

$$\sigma' = \frac{S_y}{n} \qquad (3.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ $\left(\sigma'\right)^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2$ ซึ่งเป็นสมการวงรี ดังรูปเช่นเดียวกับรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.31 แสดงสมการ σ' บนระนาบ $\sigma_1\sigma_2$ [22]

หากพิจารณากรณีที่การครากเกิดจากความเค้นเฉือนเพียงอย่างเดียว นั่นคือ $\sigma_x = \sigma_y = 0$ จะได้

$$\sqrt{3\tau_{xy}^2} = S_y \text{ หรือ } \tau_{xy} = \frac{S_y}{\sqrt{3}} = 0.577S_y \qquad (3.37)$$

ดังนั้น เมื่อใช้ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป จะสามารถทานายค่าความเค้นต้านแรงเฉือนได้ คือ

$$S_{xy} = 0.577S_y \qquad (3.38)$$

ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความต้านแรงเฉือนครากที่ท านายจากทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดประมาณ 15%

3.5 ความเสียหายเนื่องจากการล้า

สาเหตุของการล้าจะเริ่มจากมีรอยร้าวหรือรอยต าหนิเล็ก ๆ (ซึ่งอาจจะไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า) เกิดขึ้นบริเวณที่วัสดุไม่ต่อเนื่องกัน เช่น บริเวณที่มีการเปลี่ยนขนาดของพื้นที่หน้าตัด ร่องลิ่ม รูเจาะ รอยประทับตราจากการตรวจสอบ หรือรอยร้าวภายในชิ้นงานที่เกิดจากกระบวนการผลิต เมื่อมีแรงกระท าแบบวัฏจักรเกิดขึ้น ค่าความเค้นหนาแน่นบริเวณรอยต าหนิต่าง ๆ จะสูงขึ้น และเป็นสาเหตุทาให้รอยตาหนิขยายตัวขึ้นจนกลายเป็นรอยร้าวที่เห็นได้ชัดเจน และในที่สุดชิ้นงานก็จะเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็ว

ความเสียหายเนื่องจากการล้าจะปรากฏให้เห็นคล้ายกับการแตกร้าวของวัสดุเปราะ โดยพื้นผิวของรอยแตกหักจะค่อนข้างเรียบปราศจากรอยคอด และมีทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนของความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เค้น แต่อย่างไรก็ตามลักษณะการแตกหักเนื่องจากการล้าจะแตกต่างจากการแตกร้าวของวัสดุเปราะ โดยจะมีระยะการล้าอยู่ 3 ขั้นตอน

ขั้นที่ 1 การเริ่มเกิดรอยร้าวในโครงสร้างของเนื้อวัสดุ เนื่องจากการใช้งานแบบวัฏจักร รอยร้าวนี้อาจไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ขั้นที่ 2 เมื่อมีแรงกระท าแบบวัฏจักรเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ค่าความเค้นหนาแน่นบริเวณรอยร้าวจะสูงขึ้น และเป็นสาเหตุท าให้รอยร้าวขยายตัวขึ้น ซึ่งจะเป็นรอยเหมือนคลื่น เรียกว่า Bench-marks ในขั้นนี้ความเสียหายจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และขั้นที่ 3 เมื่อวัสดุไม่สามารถรองรับโหลดได้อีกต่อไป จะเกิดการแตกหักอย่างทันทีทันใด สาหรับรูปแบบของความเสียหายในขั้นตอนนี้เรียกว่า Chevron line โดยมีทิศทางพุ่งออกจากจุดที่เกิดรอยร้าวในครั้งแรก และมีลักษณะเหมือนกับความเสียหายของวัสดุเปราะ

สาหรับเงื่อนไขต่าง ๆ ที่จะเป็นตัวเร่งให้รอยร้าวหรือรอยตาหนิเล็ก ๆ เกิดการแตกหักเนื่องจากการล้า จะประกอบไปด้วยความเค้นตกค้างที่สะสมอยู่ในชิ้นงาน อุณหภูมิการใช้งานที่เพิ่มขึ้น สภาวะแวดล้อมที่เกิดการกัดกร่อน และความถี่ของวงรอบการใช้งานแบบวัฏจักร ในเบื้องต้นเราสามารถควบคุมอัตราส่วนและทิศทางการขยายตัวของรอยร้าวได้โดยระบุความเค้นใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีรอยร้าวเกิดขึ้นจะมีปัจจัยอื่นเข้ามามีอิทธิพลต่อการแตกหัก ดังที่กล่าวมาในข้างต้น โดยรอยร้าวจะขยายออกตามระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบที่เกิดความเค้นเฉือนสูงสุด

3.5.1 การคำนวณอายุการล้า

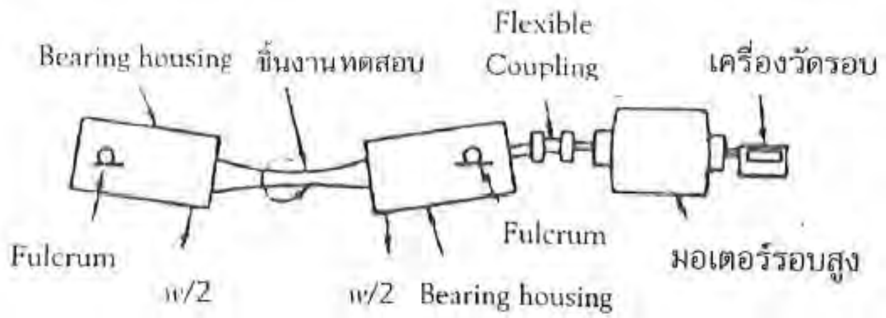
วิธีการหลัก 3 วิธีที่ถูกนามาใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบชิ้นงานที่อาจเกิดความเสียหายเนื่องจากการล้าประกอบด้วย Stress-life method, Strain life method และ Linear – elastic fracture mechanics ซึ่งวิธีการเหล่านี้ เป็นวิธีการที่จะพยายามทานายอายุการล้าของชิ้นงานเป็นวงรอบการรับโหลดที่จะเกิดความเสียหาย N โดยทั่วไปจะแบ่งเป็นวงรอบการใช้งานต่ า(Low-cycle fatigue) จะหมายถึงชิ้นงานที่มีอายุการใช้งานในช่วงวงรอบ $1 \leq N \leq 10^3$ รอบ และวงรอบการใช้งานสูง (High-cycle fatigue) จะหมายถึงชิ้นงานที่มีอายุการใช้งานในช่วงวงรอบ $N > 10^3$ รอบ

3.5.1.1 วิธีการหาอายุการล้าจากความเค้นใช้งาน

วิธีหาอายุการล้าจากความเค้นใช้งาน (Stress – life method) จะคานวณอายุการล้าบนพื้นฐานของระดับความเค้นเพียงอย่างเดียว ดังนั้น จึงมีความเที่ยงตรงค่อนข้างต่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งสาหรับชิ้นงานที่มีวงรอบการใช้งานต่า อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ก็จะเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการออกแบบชิ้นงานที่ทราบวงรอบการนาไปใช้งานที่แน่นอน และใช้สาหรับทานายอายุการใช้งานสูงที่มีข้อมูลสนับสนุนเพียงพอ ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการนี้สามารถน าไปใช้ได้ง่าย

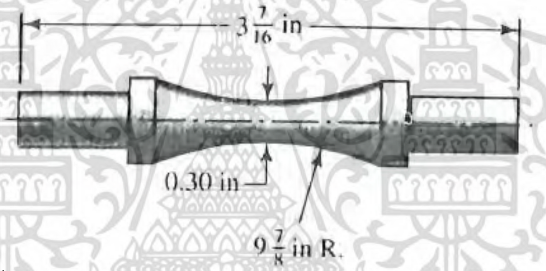
การพิจารณาความต้านแรงของวัสดุภายใต้การกระทาของโหลดแบบวัฏจักร ชิ้นงานทดสอบจะต้องถูกนาไปรับแรงกระทาซ้า ๆ ที่มีขนาดแน่นอน แล้วนับวงรอบการใช้งานที่ชิ้นงานทดสอบถูกทาลาย R.R. Moore ได้สร้างเครื่องมือสาหรับทดสอบ เพื่อหาอายุการล้าของชิ้นงาน ดังแสดงตามรูปที่ 3.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 เครื่องมือส าหรับทดสอบเพื่อหาอายุการล้าของชิ้นงานของ Moore [22]

ชิ้นงานทดสอบถูกนาไปรับแรงดัดเพียงอย่างเดียว โดยนาก้อนน้ำหนักมาถ่วง สาหรับตัวชิ้นงานทดสอบจะถูกนามาขัดมันในทิศทางตามแนวแกน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการยืดตัวตามแนวเส้นรอบวง โดยมีรูปร่างและขนาดมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 3.33



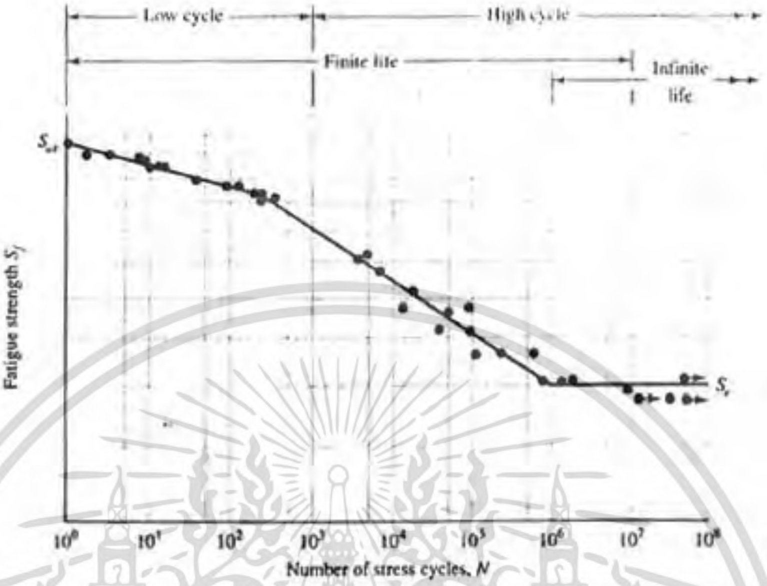
รูปที่ 3.33 ชิ้นงานทดสอบมาตรฐานส าหรับเครื่องทดสอบของ Moore [22]

ในการหาความต้านทานการล้าของวัสดุ จ าเป็นที่จะต้องท าการทดสอบชิ้นงานที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกันหลาย ๆ ครั้ง ภายใต้โหลดการดัดขนาดเดียวกัน ในขณะที่ทาการทดสอบ ชิ้นงานตามรูปที่ 3.33 จะอยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งทาให้เกิดความเค้นดัดแบบวัฏจักรที่ผิวนอกของเพลาอยู่ตลอดเวลาที่เพลาหมุน โดยความเค้นดัดที่จุดใด ๆ บนผิวของเพลา จะเป็นความเค้นแบบกระทาสองทิศทาง และมีค่าอัตราส่วนความเค้น $R = -1$ ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานการล้าของวัสดุ นิยมเขียนเป็นกราฟ ค่าความต้านทานการล้า (Fatigue strength) หรือความทนทาน (Endurance strength) เทียบกับอายุของชิ้นงาน N รอบ ($S-N$ diagram) ในสเกล Semilog หรือสเกล log – log ซึ่งจากผลการทดสอบกับวัสดุชนิดต่าง ๆ ปรากฏว่ากราฟ $S-N$ มีอยู่ 2 ลักษณะ ดังนี้

(1) โลหะจาพวกเหล็ก กราฟ $S-N$ ประกอบด้วยเส้นตรง 2 เส้น ตัดกันเป็นมุม ที่อายุการหมุน $N \approx 10^6$ รอบ ดังแสดงตามรูปที่ 3.34 ซึ่งหมายความว่า ค่า S_f ต่าสุดนี้ เป็นค่าที่ไม่ทาให้ชิ้นงานเกิดการแตกหัก หรือเป็นค่าที่ทาให้ชิ้นงานมีอายุการใช้งานมากกว่า 10^6 รอบขึ้นไป ค่านี้

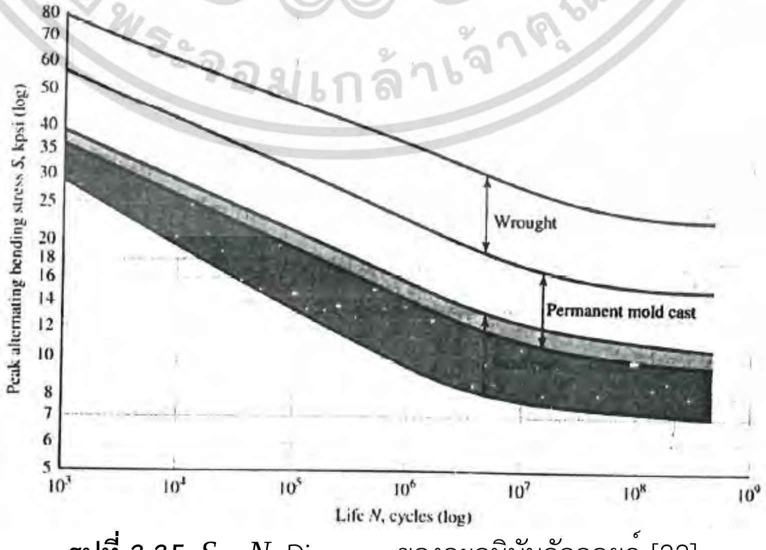
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า “พิกัดการล้า (Fatigue limit) หรือพิกัดความทนทาน (Endurance limit)” สาหรับชิ้นงานทั่ว ๆ ไปใช้สัญลักษณ์ S_e



รูปที่ 3.34 $S-N$ Diagram ของเหล็กกล้า UNS G41300 โดย S_{ut} = 116 ksi [22]

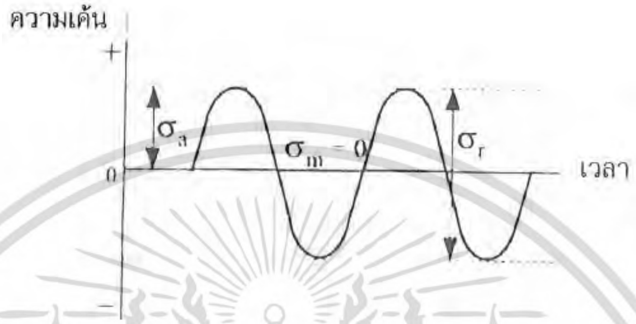
(ข) โลหะที่ไม่ใช่เหล็ก กราฟ $S-N$ จะเป็นเส้นตรงเส้นเดียวและมีส่วนโค้งที่ไม่เป็นมุมเล็กน้อย ดังรูปที่ 3.35 ซึ่งกราฟ $S-N$ ของอะลูมินัมอัลลอยด์ จะเห็นได้ว่าสาหรับโลหะที่ไม่ใช่เหล็กจะมีเพียงค่าความต้านทานการล้า S_f เท่านั้น ไม่มีค่าพิกัดการล้า S_e และเนื่องจากโลหะที่ไม่ใช้เหล็ก ไม่มีค่าพิกัดการล้าโดยทั่วไปจึงแสดงค่าความต้านทานการล้าที่อายุการใช้งานที่แน่นอนค่าหนึ่ง คือ $N = 5\times10^8$ รอบ



รูปที่ 3.35 $S-N$ Diagram ของอะลูมินัมอัลลอยด์ [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้สังเกตว่าการรับโหลดแบบวัฏจักร 1 วงรอบ ($N = 1$) จะประกอบด้วยการใส่โหลดซึ่งเป็นความเค้นเข้าไป 1 ครั้งจากนั้นก็นาโหลดออก แล้วใส่โหลดเข้าไปในทิศทางตรงกันข้ามอีก 1 ครั้งแล้วนาโหลดออกดังแสดงตามรูปรูปที่ 3.36 ดังนั้น ในกรณีที่ $N = \frac{1}{2}$ จะหมายถึงการใส่โหลดซึ่งเป็นความเค้นเข้าไป 1 ครั้ง จากนั้นก็นาโหลดออก ซึ่งเป็นกรณีเดียวกับการทดลองดึงชิ้นงานทดสอบอย่างง่าย



รูปที่ 3.36 ความเค้นสลับตรงกัน กระท ซ้ สองทิศทาง ($R = -1$) [22]

นอกจากนั้นรูปที่ 3.34 ยังแสดงให้เห็นว่ามีการจาแนกการล้าออกเป็นวงรอบการใช้งานต่า (Low – cycle fatigue) จะหมายถึงชิ้นงานที่มีอายุการใช้งานตั้งแต่ 1 – 1000 รอบ และวงรอบการใช้งานสูง (High – cycle fatigue) จะหมายถึงชิ้นงานที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 10^3 รอบ และแบ่งอายุที่ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลสาหรับความล้าตามช่วงอายุการใช้งาน คือ ชิ้นงานที่มีอายุจากัด (Finite life) และชิ้นงานที่มีอายุไม่จากัด (Infinite life) บริเวณระหว่างช่วงทั้งสองนี้จะไม่สามารถระบุได้ชัดเจน โดยจะขึ้นอยู่กับวัสดุแต่ละชนิดโดยเฉพาะ ซึ่งสาหรับเหล็กจะมีค่าอยู่ระหว่าง 10^6 – 10^7 รอบ

3.5.1.2 วิธีการหาอายุการล้าจากความเครียด

วิธีการหาอายุการล้าจากความเครียด (Strain life method) จะวิเคราะห์เจาะลึกไปที่รายละเอียดในย่านที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร และคานวณอายุการล้าบนพื้นฐานของความเค้นและความเครียดที่เกี่ยวข้อง วิธีการนี้จะเหมาะสมสาหรับคานวณอายุการล้าสาหรับชิ้นงานที่มีวงรอบการท งานต่ าการน วิธีการนี้มาประยุกต์ใช้จะต้องนาแนวความคิดต่าง ๆ ในการออกแบบมาประกอบกัน รวมทั้งเรื่องของความไม่แน่นอนที่จะส่งผลกระทบต่อการใช้งาน

ส่วนใหญ่แล้วการล้ามักจะเริ่มต้นเกิดขึ้นจากบริเวณที่เนื้อวัสดุที่ใช้ทาชิ้นงานมีความไม่ต่อเนื่อง เช่น มีรอยบาก หรือรอยร้าว หรือเกิดความเค้นหนาแน่นขึ้นที่จุดใดจุดหนึ่ง เมื่อความเค้นบริเวณดังกล่าวมีค่าสูงเกินขีดจ ากัดของความยืดหยุ่น ก็จะเกิดความเครียดขึ้นในชิ้นงาน และการล้าจะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดมีค่ามากเกินกว่าวัฏจักรความเครียดในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ดังนั้น เราจึงต้องศึกษาพฤติกรรมของวัสดุเมื่อถูกน ไปใช้รับโหลดแบบวัฏจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1.3 วิธีการหาอายุการล้าจากความยืดหยุ่นเชิงเส้นตามหลักกลศาสตร์การแตกร้าว

วิธีหาอายุการล้าจากความยืดหยุ่นเชิงเส้นตามหลักกลศาสตร์การแตกร้าว (Linear – elastic fracture mechanics) จะสมมติว่ามีรอยร้าวเกิดขึ้นในชิ้นงาน และทานายอัตราการขยายตัวของรอยร้าวที่เกิดจากความเค้นเข้มข้น วิธีการนี้จะมีประโยชน์สาหรับวิเคราะห์โครงสร้างขนาดใหญ่ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการค านวณ

ขั้นตอนแรกของการล้า (Stage I fatigue) จะเริ่มจากการแตกร้าว โดยโครงสร้างผลึกจะเกิดการเลื่อนตัวผ่านเกรนในเนื้อโลหะที่ต่อเนื่องกันเป็นจานวนมาก และหมายความรวมถึงรอยตาหนิที่พื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งอาจจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ ในขั้นตอนแรกจึงกล่าวรวมในรูปแบบของผลึกโครงสร้าง ขั้นตอนที่สองของการล้า (Stage II fatigue) จะเกิดการขยายตัวของรอยร้าว นั่นคือ พื้นที่การร้าวจะเพิ่มขึ้น ในขั้นตอนนี้รอยร้าวเริ่มจะมีความชัดเจนขึ้น โดยสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยกล้องจุลทัศน์อิเล็กตรอน และขั้นตอนสุดท้ายของความเสียหายเนื่องจากการล้า จะเกิดขึ้นในขั้นตอนที่สามของการล้า (Stage III fatigue) ในขั้นตอนนี้ชิ้นงานจะเกิดการแตกหักอย่างทันทีทันใด ถึงแม้ว่าจะไม่มีความล้าเข้ามาเกี่ยวข้องก็ตาม นั่นคือ จะเกิดขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นเกินกว่าค่าความเข้มข้นวิกฤติ

3.5.2 เกณฑ์การล้าของ Dang Van

เกณฑ์การล้าของ Dang Van ได้มีการน าเสนอในปี1993 เพื่อใช้ในการท านายการเริ่มต้นเกิดการล้าในเนื้อวัสดุเนื่องจากสภาวะความเค้นที่มีหลายแกน โดยเกณฑ์ดังกล่าวจะอยู่บนสมมติฐานที่ระดับ Mesoscopic scale ซึ่งพิจารณาการล้าและความเสียหายที่มีความรุนแรงที่เกิดขึ้นบริเวณขอบหรือภายในเกรน โดยการคราก (Yield) จะเกิดขึ้นในตาแหน่งวิกฤตที่มีการลื่นของระนาบที่ระดับดังกล่าว ถึงแม้ว่าขนาดของความเค้นที่ระดับ Macroscopic scale ซึ่งเป็นระดับที่พิจารณาโครงสร้างที่มีภาระกระทา จะอยู่ต่ากว่าจุดคราก (Yield limit) ก็ตาม โดยเกณฑ์ดังกล่าวจะพิจารณาการล้าที่มีวงรอบการใช้งานสูง (High cycle fatigue) ซึ่งจะนาไปสู่ความล้มเหลวหลังจากเกินจานวนวงรอบที่จากัด ความเค้นจะมีความเข้มข้นเนื่องจากความล้มเหลวของ Mesoscopic จะเป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกร้าว Macroscopic ซึ่งเชื่อมโยงกับความล้มเหลวในระดับ Macroscopic scale ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ดังนี้

$$\max_{t}\left(\tau(t)+a\sigma^{H}(t)\right)<b \qquad (3.39)$$

โดย

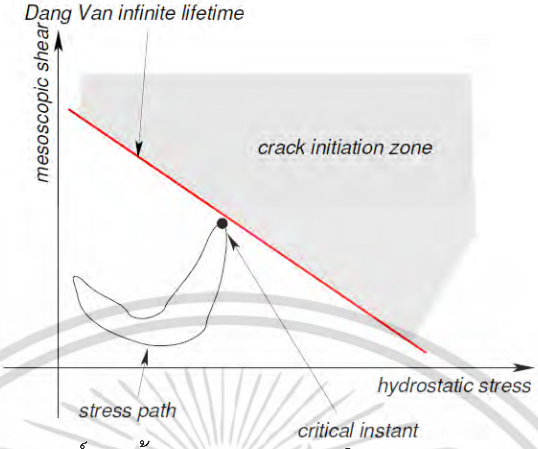
$$\sigma_{DV}(t)=\tau(t)+a\sigma^{H}(t) \qquad (3.40)$$

ซึ่งสมการที่ (3.39) เป็นสูตรดั้งเดิมของเกณฑ์การล้าของ Dang Van โดย τ คือ ค่าเฉลี่ย Tresca ของความเค้นเฉือนในระดับ Mesoscopic และ $\sigma^{H}(t)$ คือ ความเค้น Hydrostatic สามารถคานวณได้จาก

$$\sigma^{H}(t)=\frac{\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z}{3} \qquad (3.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปจะแสดงเส้นทางของความเค้นในกราฟระหว่าง Mesoscopic shear กับ Mesoscopic hydrostatic ดังแสดงในรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.37 เกณฑ์การล้าของ Dang Van ในระนาบ τ และ P [16]

ซึ่งเส้นดังกล่าวจะถูกนิยามว่าเป็นเกณฑ์ของขอบเขตระหว่างอายุการใช้งานที่ไม่จำกัดกับการล้า ซึ่งถ้าจุดใด ๆ ของเส้นทางของภาระที่กระทำอยู่เหนือตำแหน่งของเส้นเกณฑ์การล้าของ Dang Van แสดงว่าการล้าจะเกิดขึ้นที่จุดนั้น

ตัวแปร a และ b สามารถคำนวณจากขีดจำกัดการล้าจากการบิด t_∞ และขีดจำกัดการล้าจากการดัด f_∞ ซึ่งได้จากการทดสอบการล้าของวัสดุด้วยการบิดและการดัด ตามลำดับ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$a = \frac{t_\infty - \frac{1}{2} f_\infty}{\frac{1}{3} f_\infty} \tag{3.42}$$

และ

$$b = t_\infty \tag{3.43}$$

ดังนั้น ในการพิจารณาตำแหน่งที่เกิดการล้าสามารถดำเนินการได้โดยการเปรียบเทียบความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van กับ ขีดจำกัดการล้าจากการบิด t_∞ ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนความเค้น Dang Van (Dang Van stress ratio) ดังแสดงในสมการที่ (3.44)

$$\text{Dang Van stress ratio} = \frac{\sigma_{DV}}{t_\infty} \tag{3.44}$$

หาก อัตราส่วนความเค้น Dang Van ที่ตำแหน่งใด ๆ มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่า ที่ตำแหน่งดังกล่าวจะมีการล้าเกิดขึ้น

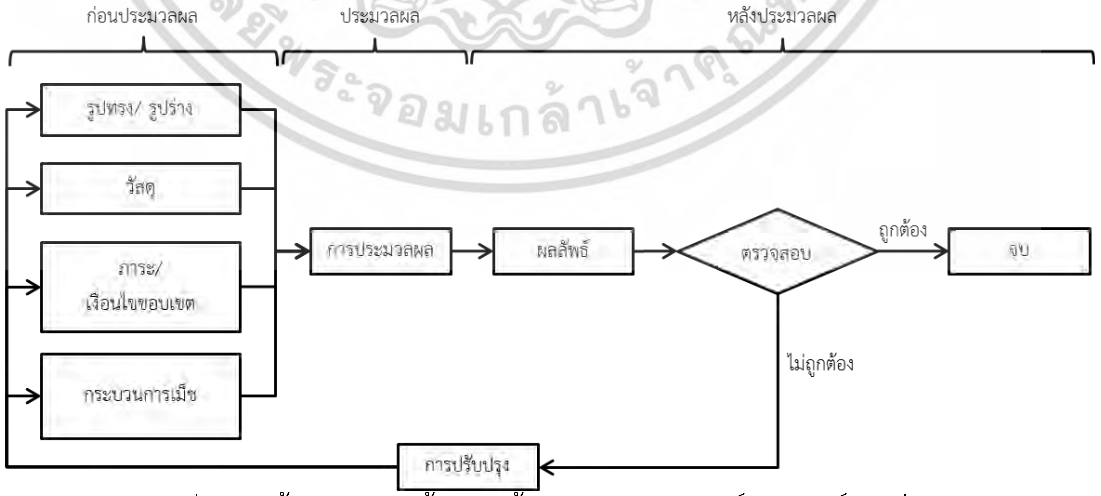
จากการพิจารณาทฤษฎีการล้าที่ผ่านมาสามารถประยุกต์ใช้ได้เฉพาะสถานการณ์ที่มีเค้นแบบหนึ่งแกน (Uniaxial) เท่านั้น และการออกแบบโครงสร้างต่าง ๆ ที่ต้องมีการต้านทานการล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเฉพาะอย่างยิ่งการล้าที่มีวงรอบการใช้งานสูง จึงจาเป็นต้องมีการทดลองในแบบจาลองที่มีขนาดเท่าของจริง เพื่อหาขีดจากัดของการล้าของส่วนประกอบต่าง ๆ จึงส่งผลให้เกิดความยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลา ดังนั้นการเลือกใช้เกณฑ์การล้าของ Dang Van ซึ่งอยู่บนพื้นฐานการพิจารณาการล้าแบบหลายแกน (Multiaxial) ในการวิเคราะห์การล้าที่เกิดจากการกลิ้งสัมผัส จึงเป็นแนวทางที่มีความเหมาะสม

3.6 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการนาเอาโดเมนของปัญหาที่สนใจมาแบ่งเป็นโดเมนย่อยหรือเอลิเมนต์ (Element) จากนั้น พิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยทาการสร้างสมการสาหรับแต่ละเอลิเมนต์ซึ่งมีความสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่กาลังศึกษาอยู่ จากนั้นจึงนาสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาประกอบกันเป็นระบบสมการชุดใหญ่ ในลักษณะเดียวกับการนาทุกเอลิเมนต์มาประกอบกันเข้าด้วยกันก่อให้เกิดรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทาการก าหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับระบบสมการชุดใหญ่ แล้วจึงทาการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตาแหน่งต่าง ๆ ของปัญหานั้น จากคาอธิบายจะเห็นได้ว่า ความแม่นยาของค่าผลเฉลี่ยโดยประมาณที่คานวณออกมาได้นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและจานวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น และรูปแบบของฟังก์ชั่นในการประมาณค่า (Interpolation functions) ที่ใช้กับแต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งในการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะนิยมใช้โปรแกรมสาเร็จรูปโดยอาศัยหลักการตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นเพื่อลดระยะเวลาในการคานวณ โดยสามารถแบ่งขั้นตอนในการแก้ปัญหาออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ กระบวนการก่อนประมวลผล กระบวนการประมวลผล และกระบวนการหลังประมวลผล ดังแสดงในรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

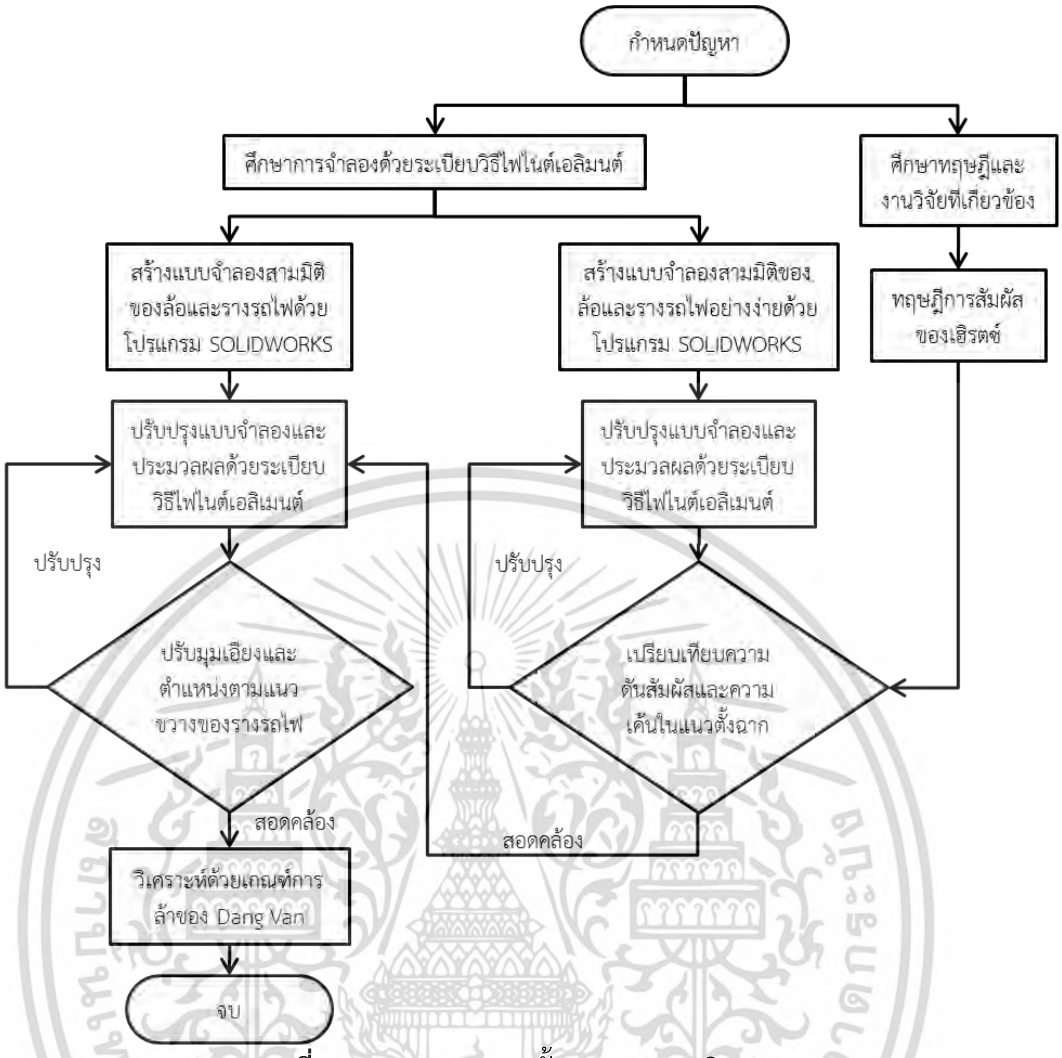
บทที่ 4
วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 บทนำ

งานวิจัยนี้จะศึกษาแนวโน้มของต ำแหน่งการเกิดการล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งใช้รูปร่างของล้อและรางรถไฟที่มีการใช้งานในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง ช่วงบางใหญ่ – บางซื่อ ในการสร้างแบบจำลองสามมิติ พร้อมทั้งกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์ เช่น คุณสมบัติทางวัสดุ น้ ำหนักกดพลา มุมเอียงราง ให้มีลักษณะสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด โดยจะพิจารณาและเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อล้อมีการเปลี่ยนแปลงต ำแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟ

สำหรับขั้นตอนและรายละเอียดในการด ำเนินการวิจัยจะเริ่มจากการสร้างแบบจำลองสามมิติของล้อและรางรถไฟอย่างง่ายด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยทำการเปรียบเทียบค่าความดันสัมผัสและความเค้นในแนวตั้งฉากที่ได้จากแบบจำลองกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ จากนั้นจึงทำการปรับปรุงรูปร่างของล้อและรางรถไฟให้สอดคล้องกับรูปร่างของล้อและรางรถไฟที่ใช้ในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง ช่วงบางใหญ่ – บางซื่อ พร้อมทั้งกำหนดให้ล้อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความเค้นต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสกลิ้งในแต่ละต ำแหน่ง จากนั้นจึงน ำค่าความเค้นที่ได้ไปวิเคราะห์แนวโน้มการเกิดการล้าด้วยเกณฑ์การล้าของ Dang Van โดยขั้นตอนทั้งหมดของงานวิจัยนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

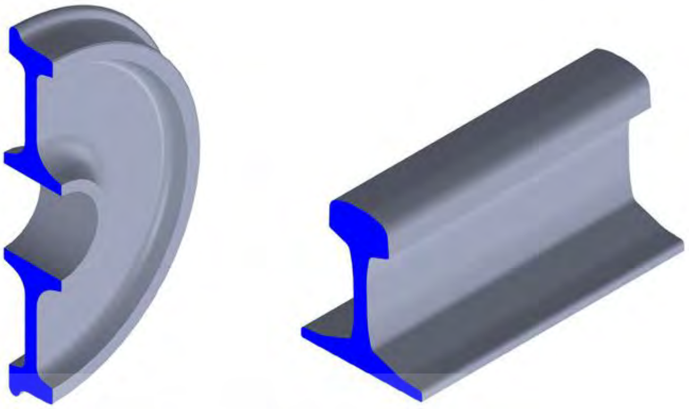


รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

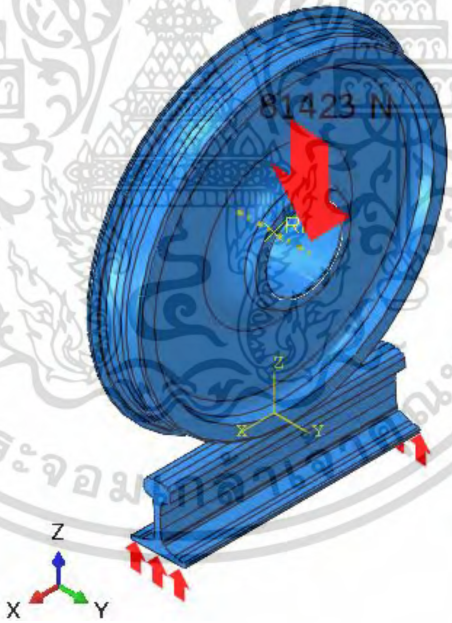
ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟในงานวิจัยนี้จะเริ่มจากการสร้างแบบจำลองสามมิติของล้อและรางรถไฟอย่างง่าย กล่าวคือ รูปร่างของล้อจะมีการเปลี่ยนแปลงรัศมีความในบริเวณพื้นล้อที่มีการสัมผัสกับรางรถไฟไม่มากนัก โดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS ดังแสดงในรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แบบจ าลองสามมิติของล้อและรางรถไฟอย่างง่าย

จากนั้นทาการวิเคราะห์แบบจาลองสามมิติดังกล่าวด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พร้อมทั้งกาหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจาลองให้ใกล้เคียงกับแบบจ าลองที่ใช้ในการต าแหน่งที่มีแนวโน้มเกิดการล้า เช่น น้าหนักกดเพลาที่กระทากับล้อ และตาแหน่งในการยึดรางรถไฟ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เงื่อนไขขอบเขตในการตรวจสอบแบบจ าลอง

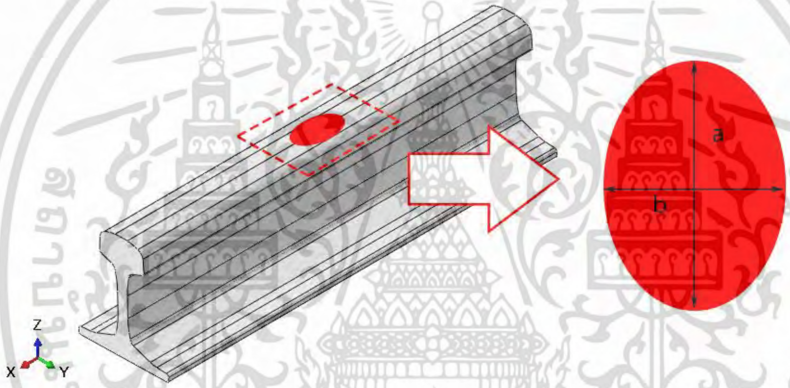
ทาการเปรียบเทียบระยะของพื้นที่สัมผัสตามแนวแกน x ระยะของพื้นที่สัมผัสตามแนวแกน y และค่าความดันสัมผัสสูงสุด ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลลัพธ์ที่ได้จากการคานวณด้วยทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ ตามสมการที่ (3.1) สมการที่ (3.2) และสมการที่ (3.9) ตามล าดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ระยะของพื้นที่สัมผัสและความดันสัมผัสสูงสุดตามทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์

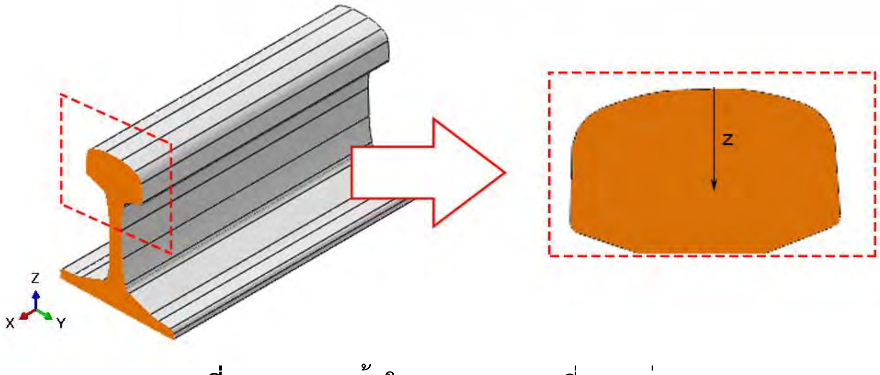
รายการคำนวณ	ผลลัพธ์ตามทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์
ระยะของพื้นที่สัมผัสตามแนวแกน x (a)	6.53 mm
ระยะของพื้นที่สัมผัสตามแนวแกน y (b)	5.13 mm
ความดันสัมผัสสูงสุด (p_0)	1152.53 MPa

ทาการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความดันสัมผัสที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของรางรถไฟที่ตาแหน่งต่าง ๆ ตามระยะของพื้นที่สัมผัสตามแนวแกน x และแนวแกน y ดังแสดงในรูปที่ 4.4 กับผลลัพธ์ที่ได้จากการค านวณด้วยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ตามสมการที่ (3.8) ดังแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.4 ความดันสัมผัสที่ใช้ในการตรวจสอบแบบจ าลอง

นอกจากนี้ทาการเปรียบเทียบความเค้นในแนวแกน z ของรางรถไฟที่ระยะต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 กับผลลัพธ์ที่ได้จากการค านวณด้วยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ตามสมการที่ (3.10) ดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.5 ความเค้นในแนวแกน z ที่ระยะต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ความดันสัมผัสจากการค านวณตามทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์

ระยะตามแนวแกน x (mm)	**ความดันสัมผัสตามแนวแกน x (MPa)**	**ระยะตามแนวแกน y (mm)**	**ความดันสัมผัสตามแนวแกน y (MPa)**
5	741.31	5	254.20
4	910.99	4	720.80
3	1023.70	3	934.55
2	1097.14	2	1061.19
1	1138.93	1	1130.39
0	1152.53	0	1152.53
-1	1138.93	-1	1130.39
-2	1097.14	-2	1061.19
-3	1023.70	-3	934.55
-4	910.99	-4	720.80
-5	741.31	-5	254.20

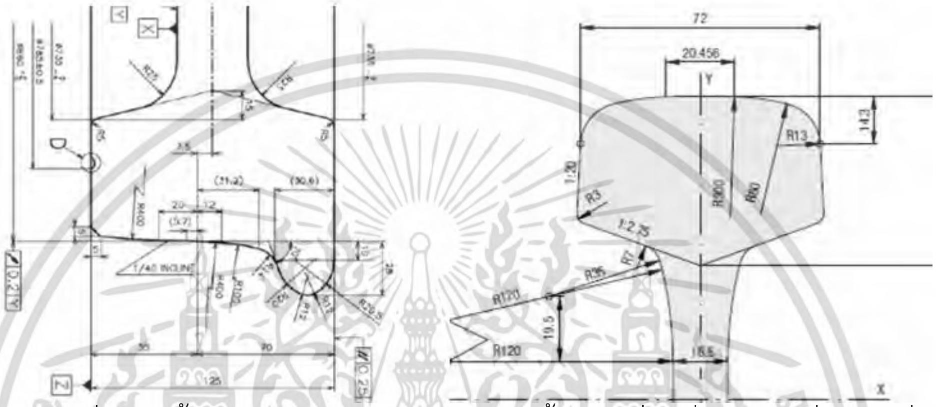
ตารางที่ 4.3 ความเค้นในแนวแกน z ที่ระยะต่าง ๆ

ระยะตามแนวแกน z (mm)	**ความเค้นในแนวแกน z (MPa)**
0	-1152.53
-1	-1118.17
-2	-1026.63
-3	-903.89
-4	-774.83
-5	-655.08
-6	-551.28
-7	-464.50
-8	-393.20
-9	-334.99
-10	-287.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การสร้างแบบจำลองสามมิติของล้อและรางรถไฟ

การสร้างแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟในงานวิจัยนี้จะอาศัยข้อมูลรูปร่างของล้อและรางรถไฟที่มีการใช้งานในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง ช่วงบางใหญ่ – บางซื่อ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS โดยก าหนดให้แกน x เป็นแนวที่รถไฟมีการเคลื่อนที่ แกน y เป็นแนวด้านข้างของรถไฟ และแกน z เป็นแนวตามความสูงของรถไฟ ซึ่งในการสร้างแบบจาลองสามมิติจะแบ่งเป็นขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 4.6 รูปร่างของล้อและรางรถไฟในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง ช่วงบางใหญ่ – บางซื่อ [26]

4.3.1 การสร้างแบบจำลองสามมิติของล้อ

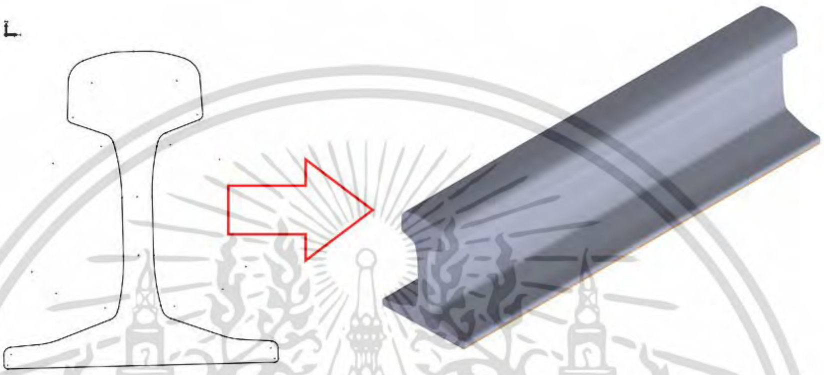
ในการสร้างแบบจาลองสามมิติของล้อจะเริ่มจากการสร้างรูปร่างสองมิติในระนาบ $y-z$ โดยก าหนดให้ล้อมีรัศมีวัดจากจุดกึ่งกลางของเพลาจนถึงพื้นล้อเท่ากับ 430 mm และเนื่องจากรูปร่างของล้อมีความสมมาตร จึงสามารถใช้ค าสั่งRevolve หน้าตัด 360° รอบแกน y เพื่อสร้างแบบจ าลองสามมิติของล้อ ดังแสดงในรูปที่ 4.7

รูปที่ 4.7 การสร้างแบบจ าลองสามมิติของล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การสร้างแบบจำลองสามมิติของรางรถไฟ

ในการสร้างแบบจาลองสามมิติของรางรถไฟจะเริ่มจากการสร้างรูปร่างสองมิติในระนาบ $y-z$ เช่นเดียวกับการสร้างแบบจาลองสามมิติของล้อ โดยกาหนดให้รางรถไฟมีความยาว 650 mm ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างหมอนรองรางรถไฟ และเนื่องจากรูปร่างของรางรถไฟมีความสมมาตร จึงสามารถใช้คาสั่ง Extrude หน้าตัดในแนวแกน x เพื่อสร้างแบบจาลองสามมิติของรางรถไฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การสร้างแบบจ าลองสามมิติของรางรถไฟ

4.4 การจำลองการสัมผัสกลิ้งระหว่างล้อและรางรถไฟ

งานวิจัยนี้จะจาลองการสัมผัสกลิ้งระหว่างล้อและรางรถไฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเริ่มจากการนาแบบจาลองสามมิติที่สร้างด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS ตามข้อ 4.3 ทาการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกาหนดเงื่อนไขขอบเขตต่าง ๆ ให้กับแบบจาลองการสัมผัสของล้อและรางรถไฟ เพื่อวิเคราะห์ความเค้นต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังนี้

4.4.1 การนำแบบจำลองของล้อและรางรถไฟเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

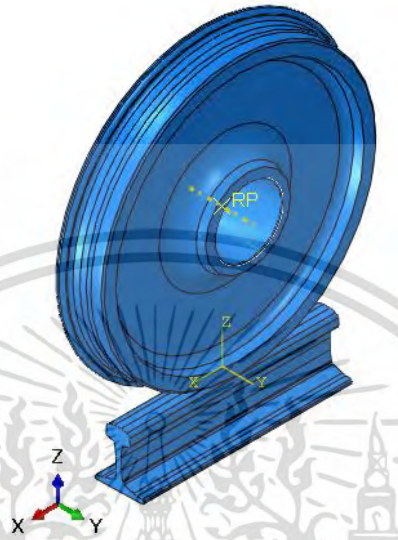
การนาแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟสามมิติที่สร้างด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS เข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถดาเนินการได้โดยใช้เครื่องมือภายในโปรแกรม ซึ่งช่วยให้มีความสะดวกในการใช้งานมากยิ่งขึ้น

4.4.2 การปรับปรุงแบบจำลองและกำหนดคุณสมบัติทางวัสดุ

เมื่อนาแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟที่ได้จากโปรแกรม SOLIDWORKS เข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงทาการสร้างแบบจาลองสามมิติของเพลาเป็นแบบ 3D Analytic rigid shell ซึ่งมีลักษณะเป็นวัตถุแข็งเกร็ง และกาหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาแหน่งของแบบจาลองต่าง ๆ ให้มีลักษณะเช่นเดียวกับสภาพความเป็นจริง กล่าวคือ กาหนดให้เพลามีการยึดติดกับดุมล้อ และพื้นล้อตั้งอยู่บนหัวราง พร้อมทั้งกาหนดให้ตาแหน่งกึ่งกลางของเพลาเป็นต าแหน่งอ้างอิง (RP) ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ต าแหน่งของแบบจ าลองสามมิติของล้อและรางรถไฟ

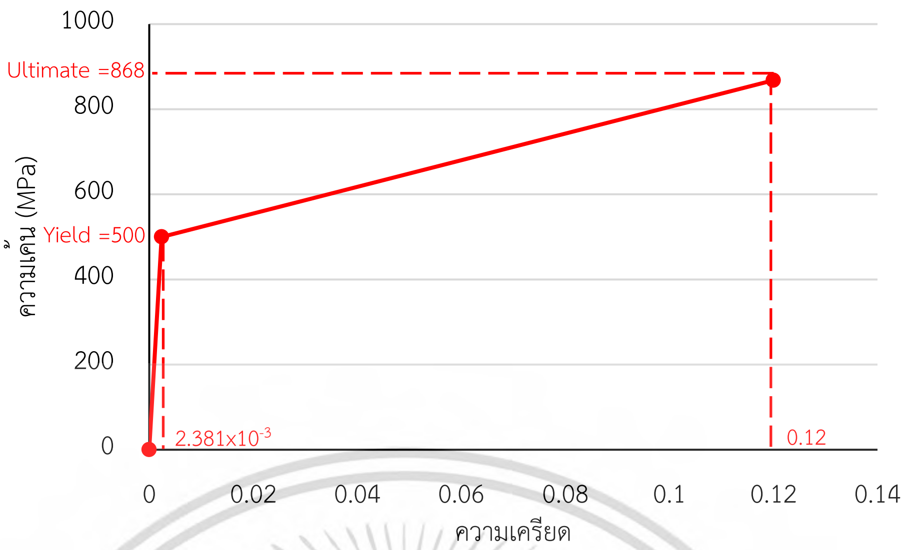
จากนั้นทาการกาหนดคุณสมบัติทางวัสดุของแบบจาลอง โดยกาหนดให้ล้อเป็นโลหะชนิด SSW-Q3S ตามมาตรฐาน JIS E 5402 และรางรถไฟเป็นโลหะชนิด R260 ตามมาตรฐาน EN 13674 ซึ่งมีการใช้งานในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง ช่วงบางใหญ่ – บางซื่อ ประกอบกับข้อมูลเพิ่มเติมจากงานวิจัยที่มีการศึกษาเกี่ยวข้องกับวัสดุดังกล่าว [5] โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงคุณสมบัติทางวัสดุของล้อและรางรถไฟ

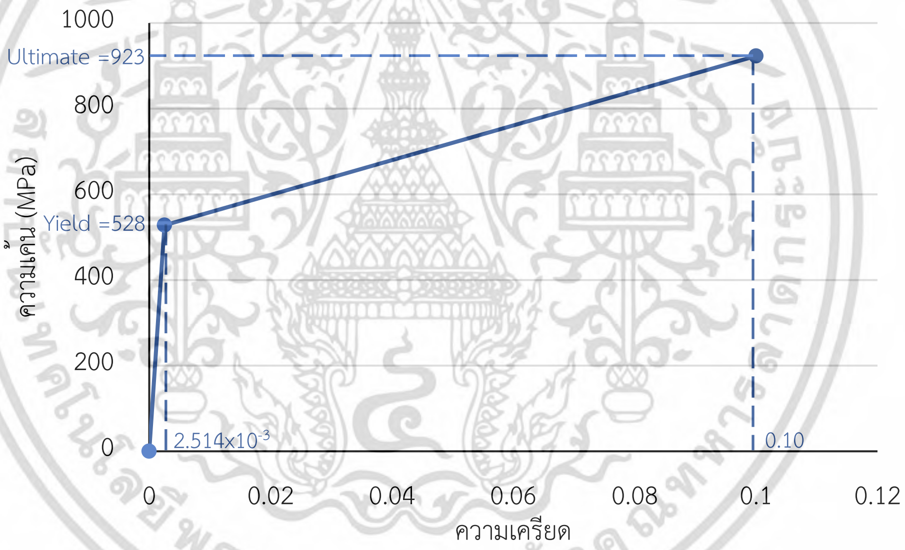
คุณสมบัติทางวัสดุ	**ล้อ**	**รางรถไฟ**
ชนิดโลหะ	SSW-Q3S	R260
มาตรฐาน	JIS E 5402	EN 13674
Young's modulus; E	210 x 10^3 MPa	210 x 10^3 MPa
Yield stress; σ_y	500 MPa	528 MPa
Poisson's ratio; ν	0.25	0.25

นอกจากนี้ กาหนดให้วัสดุของแบบจาลองมีคุณสมบัติการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 คุณสมบัติทางวัสดุของล้อ



รูปที่ 4.11 คุณสมบัติทางวัสดุของรางรถไฟ

โดย

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{elastic} + \varepsilon_{plastic} \tag{4.1}$$

$$\varepsilon_{total} = \left(\frac{\sigma}{E}\right)_{elastic} + \varepsilon_{plastic} \tag{4.2}$$

ดังนั้น

$$\varepsilon_{plastic} = \varepsilon_{total} - \left(\frac{\sigma}{E}\right)_{elastic} \tag{4.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพิจารณาสมการที่ (4.3) ทาให้สามารถคานวณความเครียดพลาสติกได้ ดังนั้น จึงก าหนดให้คุณสมบัติการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของแบบจ าลองเป็นแบบ Hardening ชนิด Isotropic โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงคุณสมบัติการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของล้อและรางรถไฟ

ล้อ		**รางรถไฟ**	
Stress	Plastic stain	Stress	Plastic stain
500 MPa	0	528 MPa	0
868 MPa	0.1176	923 MPa	0.0974

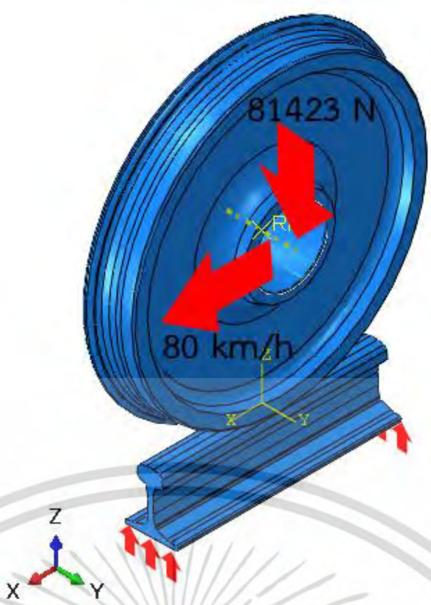
4.4.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

การกาหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจาลองการสัมผัสกลิ้งระหว่างล้อและรางรถไฟในงานวิจัยนี้จะกาหนดให้แบบจาลองสามมิติของล้อถูกกระทาด้วยน้าหนักกดเพลาขนาด 81,423 นิวตัน ในทิศทางตามแนวแกน z โดยอ้างอิงจากข้อกาหนดในการออกแบบขบวนรถไฟฟ้าในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง ช่วงบางใหญ่ – บางซื่อ ในขณะที่ผู้โดยสารมีความหนาแน่น 8 คน/m^2 (W4) พร้อมทั้งก าหนดให้มีการกลิ้งไปบนรางรถไฟตามแนวแกน x ด้วยอัตราเร็วคงที่ 80 km/h โดยล้อมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 860 mm ดังนั้นจึงสามารถค านวณความเร็วเชิงมุมได้เท่ากับ 51.68 rad/s ซึ่งเป็นความเร็วสูงสุดตามข้อกาหนดการออกแบบ ทั้งนี้ในการกลิ้งของล้อจะปราศจากแรงขับเคลื่อน และมีความเร่งเป็นศูนย์

กาหนดให้แบบจาลองสามมิติของรางรถไฟซึ่งมีความยาว 650 mm ถูกยึดติดบริเวณหัวและท้ายไม่ให้มีการเคลื่อนที่ทั้งในแนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z ในลักษณะเดียวกับการติดตั้งด้วยเครื่องยึดเหนี่ยวบนหมอนรองรางรถไฟ

นอกจากนี้ กาหนดปฏิสัมพันธ์ระหว่างแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟเป็นแบบ Surface to surface contact โดยล้อเป็น Slave surface และรางรถไฟเป็น Master surface พร้อมทั้งกาหนดคุณสมบัติในการสัมผัสเป็นแบบ Friction formulation ชนิด Penalty โดยมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.3 ซึ่งมีการอ้างอิงจากงานวิจัยที่มีการศึกษาการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ [8] ทั้งนี้เงื่อนไขขอบเขตต่าง ๆ ที่กาหนดให้กับแบบจาลองการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟจะแสดงในรูปที่ 4.12

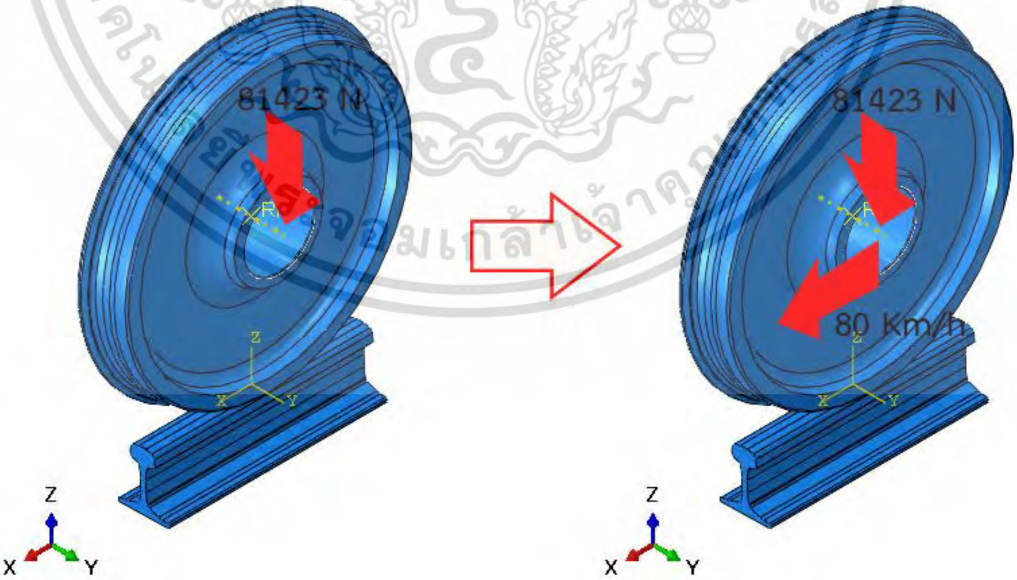
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจ าลองล้อและรางรถไฟ

4.4.4 การกำหนดขั้นตอนการสัมผัสกลิ้งของแบบจำลอง

ในการกาหนดขั้นตอนการสัมผัสระหว่างแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟ จะเริ่มจากแบบจาลองสามมิติของล้อมีการเคลื่อนที่ในแนวแกน z ในทิศทาง $-z$ ด้วยน้ำหนักกดเพลาขนาด 81,423 นิวตัน จนสัมผัสกับแบบจาลองสามมิติของรางรถไฟ จากนั้นจึงมีการกลิ้งไปตามแนวแกน x ในทิศทาง $+x$ ด้วยความเร็วคงที่ 80 km/h (ความเร็วเชิงมุม 51.68 rad/s) ดังแสดงในรูปที่ 4.13

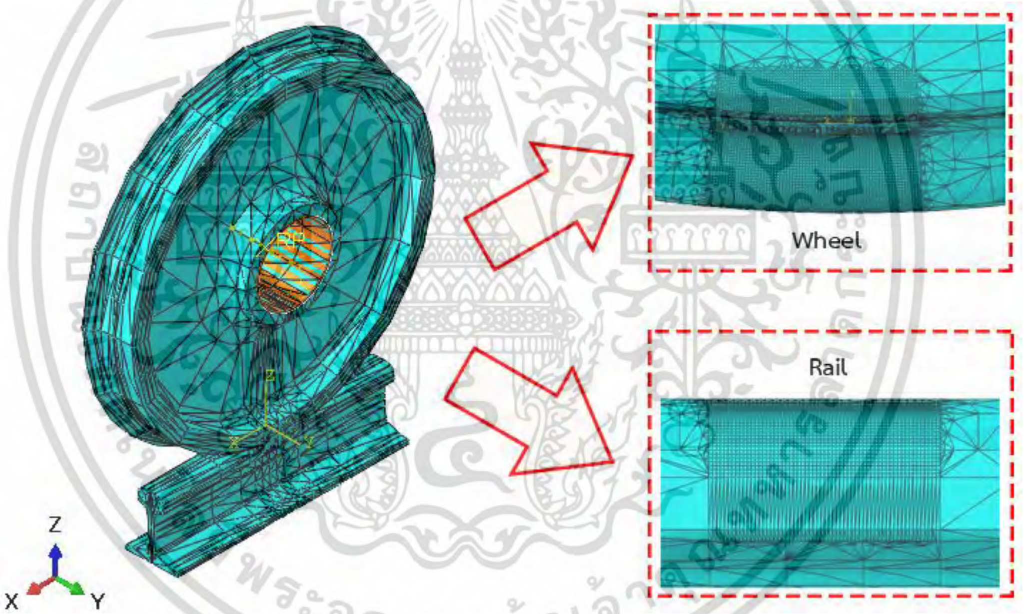


รูปที่ 4.13 ขั้นตอนการสัมผัสของแบบจ าลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 การกำหนดเอลิเมนต์ให้แบบจำลอง

การกาหนดเอลิเมนต์ให้กับแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟจะเริ่มจากการแบ่งแบบจาลองออกเป็นส่วน ๆ ในลักษณะที่มีความสมมาตรกันเพื่อให้สามารถกาหนดเอลิเมนต์ให้กับส่วนต่าง ๆ ของแบบจาลองได้อย่างเหมาะสม กล่าวคือ ในบริเวณที่ต้องการพิจารณาความเค้นที่เกิดจากการสัมผัสกลิ้งระหว่างล้อและรางรถไฟจะกาหนดเอลิเมนต์ให้มีความละเอียดกว่าบริเวณอื่น เพื่อความแม่นย าของผลลัพธ์ รวมถึงลดระยะเวลาในการการคานวณ โดยจะก าหนดให้เอลิเมนต์ในบริเวณที่มีการสัมผัสกลิ้งเป็นแบบทรงหกหน้า (Hexahedron) ขนาด 1 mm ซึ่งเอลิเมนต์ชนิดดังกล่าวให้ผลลัพธ์จากการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟสอดคล้องกับทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ และในบริเวณอื่นที่ห่างจากบริเวณที่มีการสัมผัสกลิ้งซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ต้องการพิจารณาจะกาหนดให้เอลิเมนต์เป็นแบบทรงสี่หน้า (Tetrahedron) ขนาด 150 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.14 เอลิเมนต์ของแบบจ าลอง

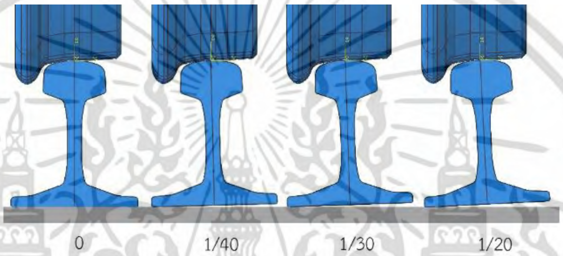
ตารางที่ 4.6 จ านวนเอลิเมนต์ในแต่ละแบบจ าลอง

แบบจำลอง	จำนวนจุดต่อ	จำนวนเอลิเมนต์
ล้อ	174,947	129,042
รางรถไฟ	108,473	81,499
รวมทั้งหมด	**283,420**	**210,541**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

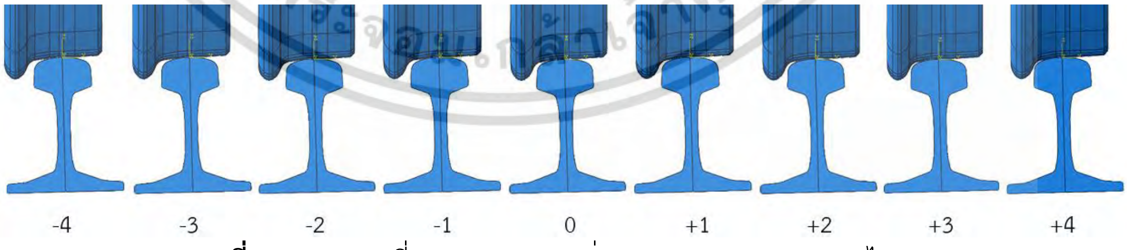
4.4.6 การกำหนดมุมเอียงและตำแหน่งของล้อตามแนวขวางของรางรถไฟ

การกาหนดมุมเอียง (Rail inclination) และตาแหน่งของล้อตามแนวขวางของรางรถไฟ (Lateral displacement) ในแบบจ าลองสามมิติของล้อและรางรถไฟ เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากมุมเอียงและการเปลี่ยนแปลงต าแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟต่อความเค้นที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสกลิ้ง จะดาเนินการโดยการสร้างแบบจาลองของรางรถไฟที่มีมุมเอียงต่างกันจานวน 4 แบบจาลอง ประกอบด้วยมุมเอียง 0, 1/40, 1/30 และ 1/20 ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งมุมเอียงเหล่านี้มีการใช้งานแตกต่างกันในแต่ละประเทศ แต่สาหรับในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง ช่วงบางใหญ่ – บางซื่อ ใช้รางรถไฟที่มีมุมเอียง 1/40 ดังนั้น การเปรียบเทียบผลกระทบจากมุมเอียง จึงอาจใช้เป็นแนวทางในออกแบบรางรถไฟในโครงการระบบขนส่งทางรางอื่น ๆ ต่อไป



รูปที่ 4.15 แบบจ าลองที่มีมุมเอียงของรางรถไฟต่าง ๆ

จากนั้นก หนดให้แบบจ าลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงต าแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟโดยเริ่มจากกรณีที่ตาแหน่งกึ่งกลางของแบบจาลองสามมิติของล้อตรงกับตาแหน่งกึ่งกลางของรางรถไฟ จากนั้นจึงกาหนดให้แบบจาลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟ หรือตามแนวแกน y ไปยังตาแหน่งต่าง ๆ รวมทั้งสิ้น 9 ต าแหน่ง ได้แก่ -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3 และ +4 ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงต าแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟ

4.4.7 การพิจารณาผลลัพธ์จากแบบจำลอง

การพิจารณาผลลัพธ์จากแบบจาลองจะดาเนินการโดยการเปรียบเทียบความดันสัมผัส พื้นที่สัมผัส ความเค้น Tresca และความเค้น von - Mises ของแบบจาลองในแต่ละกรณี เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสัมผัสกลิ้งระหว่างแบบจ าลองสามมิติของล้อและรางรถไฟในแต่ละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต าแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟ จากนั้นจะพิจารณาความเค้น Tresca และความเค้นในแนวแกน x, y และ z ที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดต่อของแบบจาลอง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ต าแหน่งที่มีแนวโน้มเกิดการล้าด้วยเกณฑ์การล้าของ Dang Van ต่อไป

4.5 การวิเคราะห์ตำแหน่งที่มีแนวโน้มเกิดการล้าด้วยเกณฑ์การล้าของ Dang Van

การวิเคราะห์ต าแหน่งที่มีแนวโน้มเกิดการล้าด้วยเกณฑ์การล้าของ Dang Van จะดาเนินการโดยพิจารณาอัตราส่วนความเค้น Dang Van ตามสมการที่ (3.44) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van ซึ่งคานวณจากสมการที่ (3.40) กับขีดจากัดการล้าจากการบิด t_{∞} หากอัตราส่วนความเค้น Dang Van ที่ตาแหน่งใด ๆ มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่า ที่ตาแหน่งดังกล่าวจะมีการล้าเกิดขึ้น

ในงานวิจัยนี้จะคานวณค่าความเค้นไฮโดรสแตติก (σ^{H}) ของแต่ละจุดต่อในแบบจาลองตามสมการที่ (3.41) จากความเค้นในแนวแกน x, y และ z รวมถึงพิจารณาความเค้น Tresca ของแต่ละจุดต่อในแบบจาลองจากค่าความเค้น Tresca นอกจากนี้จะคานวณค่าตัวแปร a ตามสมการที่ (3.42) โดยกาหนดให้ขีดจากัดการล้าจากการบิด (The fatigue limit in alternating torsion) มีค่าเท่ากับ 270 MPa และขีดจากัดการล้าจากการดัด (The fatigue limit in alternating bending) มีค่าเท่ากับ 460 MPa โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

ในการศึกษาวิเคราะห์การล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแบ่งผลลัพธ์ที่ได้ออกเป็นส่วนหลัก ๆ คือ ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจาลองการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ ความเค้นที่เกิดขึ้นกับล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงต าแหน่งการสัมผัสตามแนวขวางของรางรถไฟ ความเค้นที่เกิดขึ้นกับล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงราง และผลวิเคราะห์ต าแหน่งที่มีแนวโน้มเกิดการล้าตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van ซึ่งจะมีการแสดงรายละเอียดในบทนี้

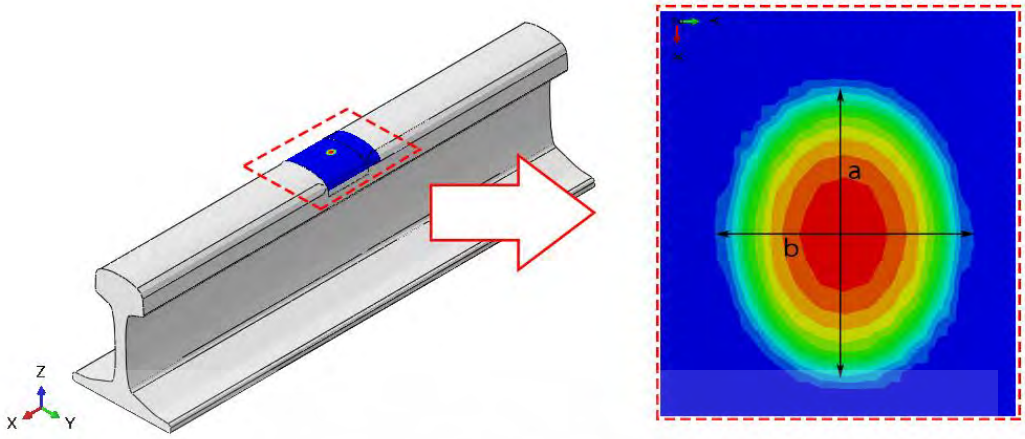
5.1 การศึกษาผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจาลองการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ ด้วยค่าความดันสัมผัสสูงสุด ระยะของพื้นที่สัมผัส รูปแบบการกระจายตัวของความดันสัมผัส รวมถึงความเค้นในแนวแกน z ที่ระยะต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการค านวณตามทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ถือเป็นข้อมูลที่มีความสาคัญ จึงต้องมีการปรับแก้ไขทั้งการสร้างแบบจาลองสามมิติ วิธีการคานวณ และการกาหนดคุณสมบัติทางวัสดุของแบบจาลองเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความสอดคล้องตามทฤษฎี ก่อนนาไปประยุกต์ใช้กับแบบจาลองที่มีความซับซ้อน โดยผลลัพธ์จากแบบจาลองดังกล่าวเมื่อนาไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการค านวณตามทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์จะสามารถแสดงได้ดังนี้

5.1.1 ระยะของพื้นที่สัมผัสและความดันสัมผัสสูงสุด

จากการพิจารณาระยะของพื้นที่สัมผัสตามแนวแกน x ระยะของพื้นที่สัมผัสตามแนวแกน y และความดันสัมผัสสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 เปรียบเทียบผลลัพธ์ดังกล่าวกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคานวณตามทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1 จะพบว่า ระยะของพื้นที่สัมผัสตามแนวแกน x มีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 6.8 ระยะของพื้นที่สัมผัสตามแนวแกน y มีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.3 และความดันสัมผัสสูงสุดมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.1 ดังแสดงในตารางที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 ความดันสัมผัสที่ได้จากแบบจ ลองที่ใช้ตรวจสอบ

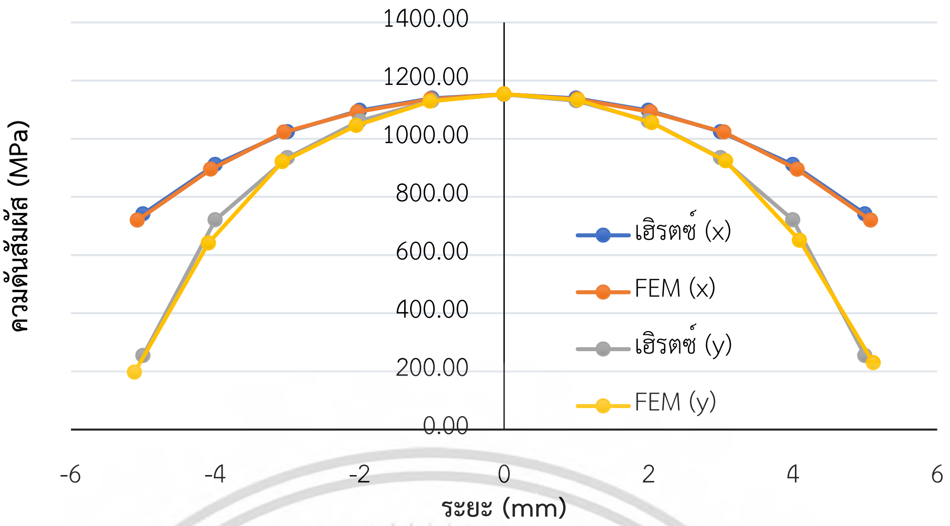
ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบระยะของพื้นที่สัมผัสและความดันสัมผัสสูงสุด

รายการคำนวณ	ทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
ระยะของพื้นที่สัมผัสตามแนวแกน x (a)	6.53 mm	6.09 mm	6.81
ระยะของพื้นที่สัมผัสตามแนวแกน y (b)	5.13 mm	5.11 mm	0.30
ความดันสัมผัสสูงสุด (p_0)	1152.53 MPa	1153.55 MPa	0.09

5.1.2 การกระจายตัวของความดันสัมผัสและความเค้นในแนวแกน z

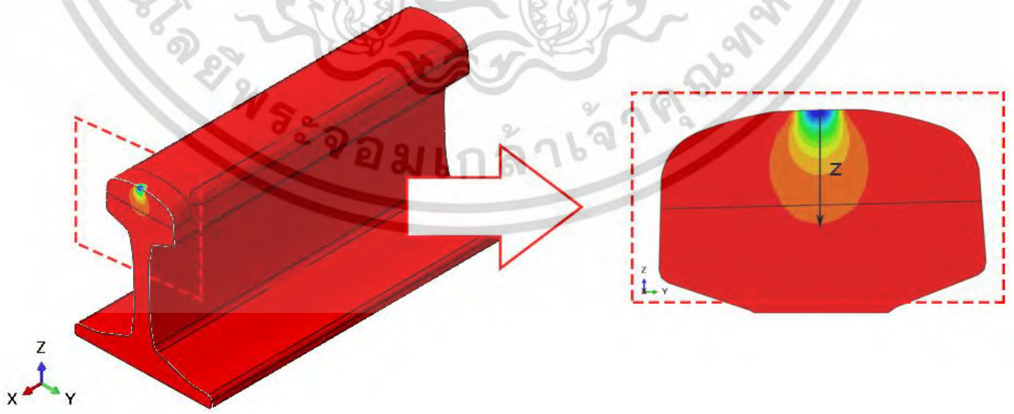
จากการพิจารณาการกระจายตัวของความดันสัมผัสภายในบริเวณที่แบบจาลองสามมิติของล้อสัมผัสกับรางรถไฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า ความดันสัมผัสจะมีค่าสูงสุดในบริเวณกึ่งกลางของพื้นที่สัมผัสซึ่งมีค่าเท่ากับ 1153.55 MPa และจะมีค่าลดลงตามระยะของพื้นที่สัมผัสทั้งในแนวแกน x และแนวแกน y ที่เพิ่มขึ้น หากเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลลัพธ์ที่ได้จากการคานวณตามทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ในตารางที่ 4.2 จะพบว่า การกระจายตัวของความดันสัมผัสมีรูปแบบที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



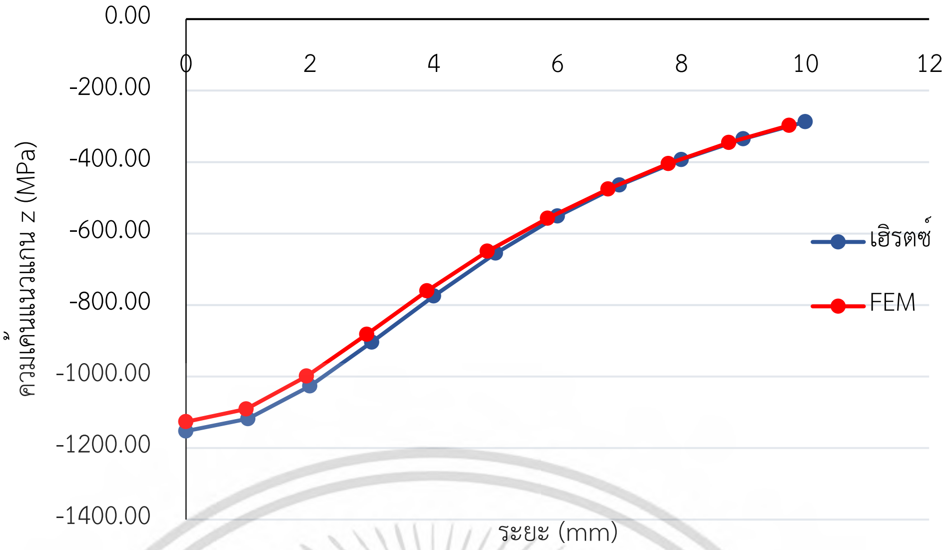
รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบการกระจายตัวของความดันสัมผัส

นอกจากนี้หากพิจารณาการกระจายตัวของความเค้นในแนวแกน z ที่เกิดขึ้นในแบบจาลองสามมิติของรางรถไฟใต้บริเวณพื้นที่สัมผัส ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า ความเค้นในแนวแกน z จะมีค่าลดลงเมื่อระยะความลึกในแนวแกน z เพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1126.49 MPa ที่ผิวแบบจาลองสามมิติของรางรถไฟ (z = 0) ดังแสดงในรูปที่ 5.3 และเมื่อนาผลลัพธ์ดังกล่าวเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคานวณตามทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า การกระจายตัวของความเค้นในแนวแกน z มีรูปแบบที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.4



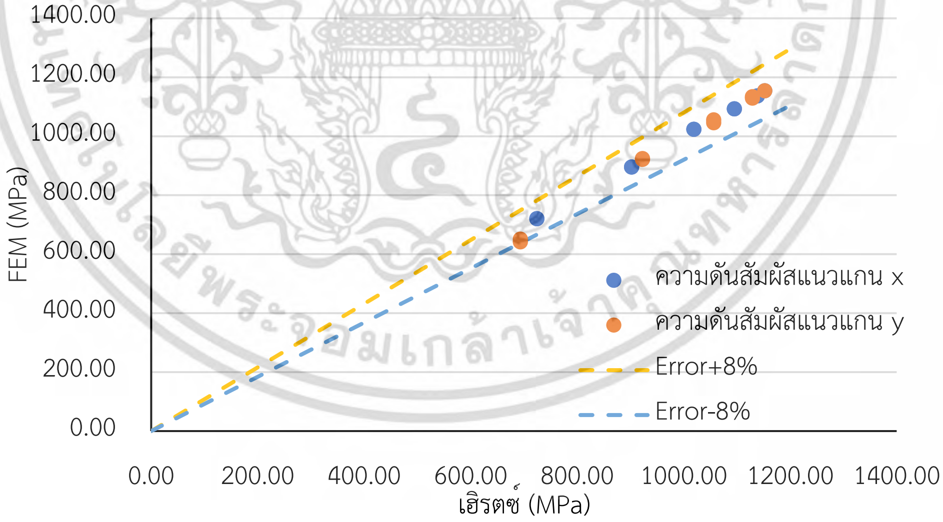
รูปที่ 5.3 ความเค้นในแนวแกน z ได้จากแบบจ าลองที่ใช้ตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นในแนวแกน z

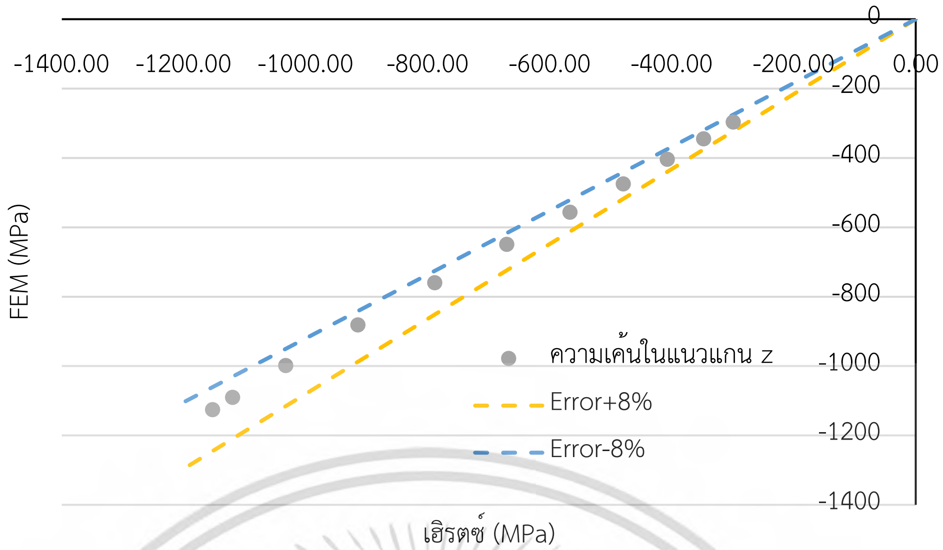
หากพิจารณาความคลาดเคลื่อนของความดันสัมผัสในแนวแกน x และ y ที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์กับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าผลลัพธ์มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 8 ดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนความดันสัมผัสจากทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์กับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นอกจากนี้ หากพิจารณาความคลาดเคลื่อนของความเค้นในแนวแกน z ที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์กับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าผลลัพธ์มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 8 ดังแสดงในรูปที่ 5.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนความเค้นในแนวแกน z จากทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์กับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการพิจารณาผลการเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลลัพธ์ที่ได้จากการคานวณตามทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ทั้งระยะของพื้นที่สัมผัสและความดันสัมผัสสูงสุด รวมถึงการกระจายตัวของความดันสัมผัสและความเค้นในแนวแกน z พบว่า ผลลัพธ์ของทั้งสองวิธีมีค่าและรูปแบบการกระจายตัวที่สอดคล้องกัน ดังนั้นหลักการในการจาลองการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟในหัวข้อนี้จึงสามารถใช้เป็นแนวทางในการสร้างแบบจ าลองสามมิติสาหรับวิเคราะห์การล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้งด้วยระเรียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้

5.2 การศึกษาความเค้นจากการสัมผัสกลิ้งของแบบจำลอง

การศึกษาความเค้นจากการสัมผัสกลิ้งระหว่างแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะพิจารณาความดันสัมผัส ขนาดพื้นที่สัมผัส ความเค้น von Mises และความเค้น Tresca เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อแบบจาลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟที่มีมุมเอียง 1/40 จากนั้นจึงเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อแบบจาลองสามมิติของรางรถไฟมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง โดยมีรายละเอียดดังนี้

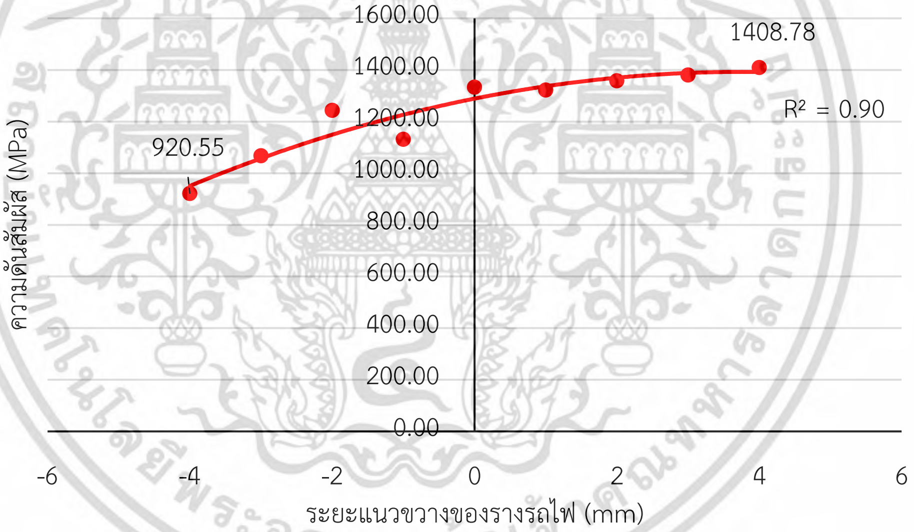
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 กรณีเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟที่มีมุมเอียง 1/40

5.2.1.1 ความดันสัมผัส

จากการพิจารณาความดันสัมผัสบริเวณผิวของแบบจำลองสามมิติของล้อและรางรถไฟที่มีมุมเอียง 1/40 พบว่า ความดันสัมผัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแบบจาลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งจากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side กล่าวคือ ความดันสัมผัสจะมีค่าต่าสุดเท่ากับ 920.55 MPa เมื่อล้ออยู่ที่ตาแหน่ง -4 mm และจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1408.78 MPa เมื่อล้ออยู่ที่ต าแหน่ง+4 mm ดังแสดงในรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8

รูปที่ 5.7 ความดันสัมผัสที่ตาแหน่งต่าง ๆ ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40

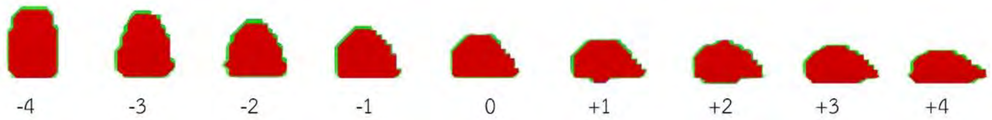


รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบความดันสัมผัสสูงสุด ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40

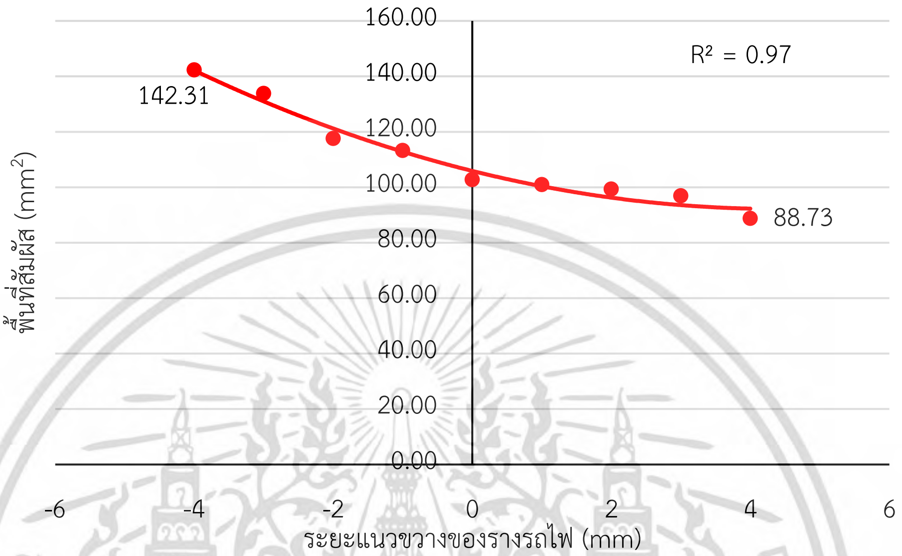
5.2.1.2 พื้นที่สัมผัส

จากการพิจารณาพื้นที่สัมผัสของแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟที่มีมุมเอียง 1/40 พบว่า ขนาดของพื้นที่สัมผัสจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อแบบจาลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงต าแหน่งจากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side กล่าวคือ พื้นที่สัมผัสจะมีขนาดใหญ่ที่สุดเท่ากับ 142.31 mm^2 เมื่อล้ออยู่ที่ต าแหน่ง -4 mm และจะมีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 88.73 mm^2 เมื่อล้ออยู่ที่ต าแหน่ง+4 mm ดังแสดงในรูปที่ 5.9และรูปที่ 5.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 พื้นที่สัมผัสที่ต ฉแหน่งต่าง ๆ ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40

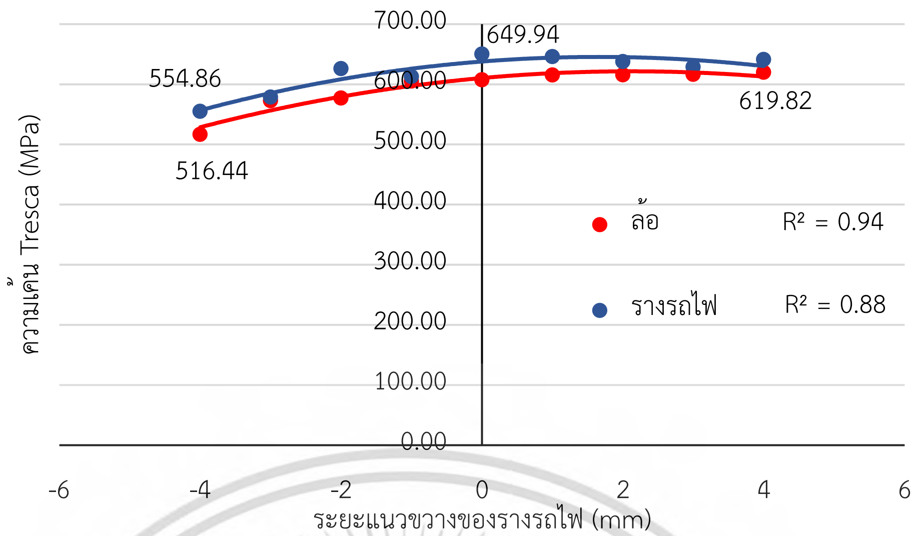


รูปที่ 5.10 กราฟเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัส ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40

5.2.1.3 ความเค้น Tresca

จากการพิจารณาความเค้น Tresca สูงสุดของแบบจ ลองสามมิติของล้อและรางรถไฟที่มีมุมเอียงของรางรถไฟ 1/40 พบว่า ความเค้น Tresca สูงสุดที่ล้อและรางรถไฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อแบบจาลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงต ฉแหน่งจากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side กล่าวคือ ความเค้น Tresca สูงสุดของล้อจะมีค่าต่าสุดเท่ากับ 516.44 MPa เมื่อล้ออยู่ที่ตาแหน่ง -4 mm และจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 619.82 MPa เมื่อล้ออยู่ที่ตาแหน่ง +4 mm และความเค้น Tresca สูงสุดของรางรถไฟจะมีค่าต่าสุดเท่ากับ 544.86 MPa เมื่อล้ออยู่ที่ตาแหน่ง -4 mm และจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 649.94 MPa เมื่อล้ออยู่ที่ต ฉแหน่ง 0 mm ดังแสดงในรูปที่ 5.11

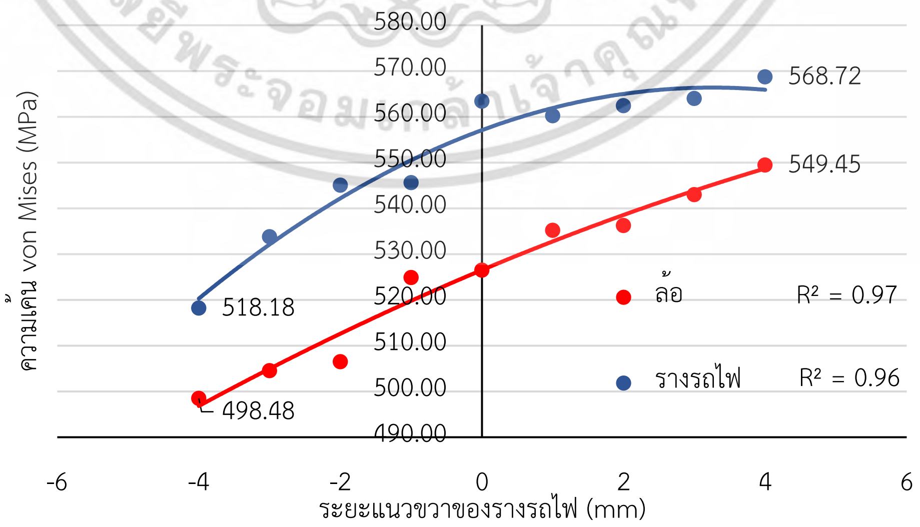
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบความเค้น Tresca ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40

5.2.1.4 ความเค้น von Mises

จากการพิจารณาความเค้น von Mises สูงสุดของแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟที่มีมุมเอียง 1/40 พบว่า ความเค้น von Mises สูงสุดที่ล้อและรางรถไฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อแบบจาลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งจากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side กล่าวคือ ความเค้น von Mises สูงสุดของล้อจะมีค่าต่าสุดเท่ากับ 498.48 MPa เมื่อล้ออยู่ที่ต แหน่ง -4 mm และจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 549.45 MPa เมื่อล้ออยู่ที่ตาแหน่ง +4 mm และความเค้น von Mises สูงสุดของรางรถไฟจะมีค่าต่าสุดเท่ากับ 518.18 MPa เมื่อล้ออยู่ที่ตาแหน่ง -4 mm และจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 568.72 MPa เมื่อล้ออยู่ที่ต าแหน่ง+4 mm ดังแสดงในรูปที่ 5.12



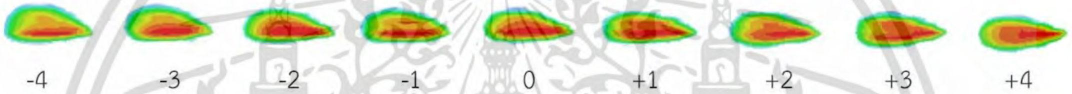
รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบความเค้น von Mises ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

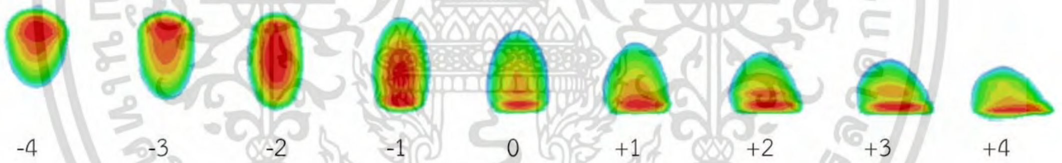
5.2.2 กรณีเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของรางรถไฟ

5.2.2.1 ความดันสัมผัส

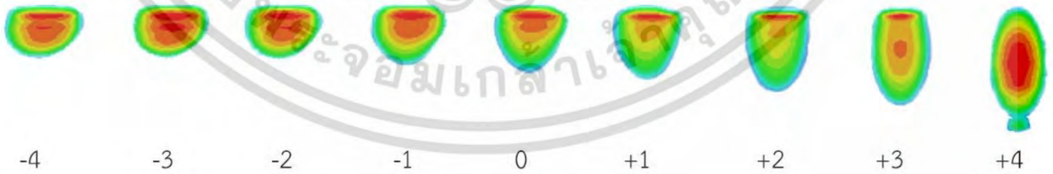
จากการพิจารณาความดันสัมผัสบริเวณผิวของแบบจ าลองสามมิติของล้อและรางรถไฟ พบว่าความดันสัมผัสจะมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในกรณีที่รางรถไฟไม่มีมุมเอียง โดยมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เมื่อแบบจาลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งจากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side ดังแสดงในรูปที่ 5.13 และความดันสัมผัสจะมีค่าเฉลี่ยต่าสุดในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/30 โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแบบจ าลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งจากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side ดังแสดงในรูปที่ 5.14 เช่นเดียวกับกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40 ซึ่งแตกต่างจากกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/20 ที่ความดันสัมผัสมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5.15 ทั้งนี้สามารถเปรียบเทียบความดันสัมผัสในแต่ละมุมเอียงได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.13 ความดันสัมผัสที่ต าแหน่งต่าง ๆ ในกรณีที่รางรถไฟไม่มีมุมเอียง

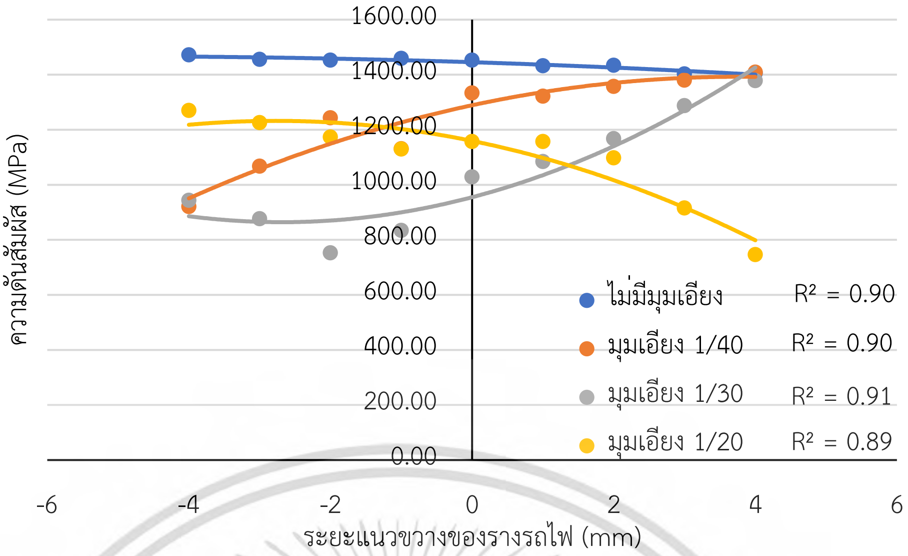


รูปที่ 5.14 ความดันสัมผัสที่ต าแหน่งต่าง ๆ ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/30



รูปที่ 5.15 ความดันสัมผัสที่ต าแหน่งต่าง ๆ ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/20

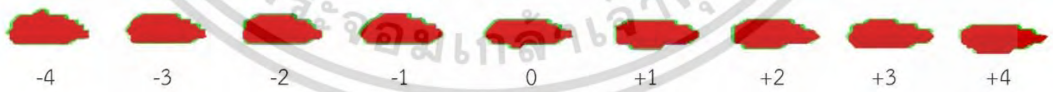
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 กราฟเปรียบเทียบความดันสัมผัส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง

5.2.2.2 พื้นที่สัมผัส

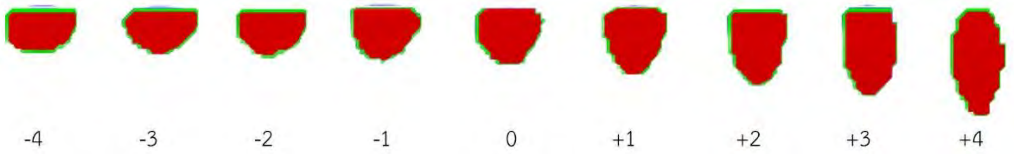
จากการพิจารณาพื้นที่สัมผัสของแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟ พบว่า ขนาดของพื้นที่สัมผัสจะมีค่าเฉลี่ยต่ าสุดในกรณีที่รางรถไฟไม่มีมุมเอียง โดยมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เมื่อแบบจาลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งจากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side ดังแสดงในรูปที่ 5.17 และขนาดของพื้นที่สัมผัสจะมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/30 โดยมีแนวโน้มลดลง เมื่อแบบจาลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งจากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side ดังแสดงในรูปที่ 5.18 เช่นเดียวกับในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40 ซึ่งแตกต่างจากกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/20 ที่ขนาดของพื้นที่สัมผัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.19 ทั้งนี้สามารถเปรียบเทียบขนาดของพื้นที่สัมผัสในแต่ละมุมเอียงได้ดังแสดงในรูปที่ 5.20



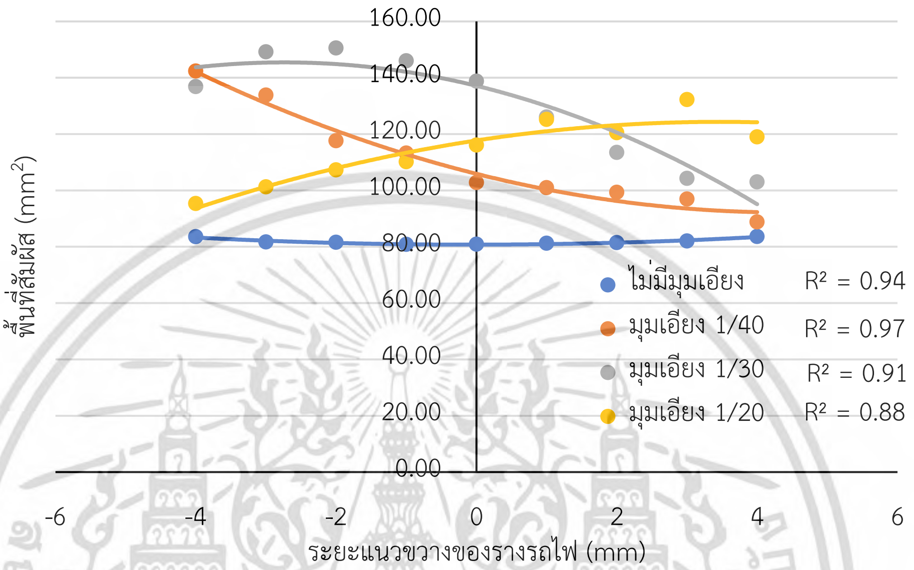
รูปที่ 5.17 พื้นที่สัมผัสที่ต าแหน่งต่าง ๆ ในกรณีที่รางรถไฟไม่มีมุมเอียง

รูปที่ 5.18 พื้นที่สัมผัสที่ต าแหน่งต่าง ๆ ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 ความดันสัมผัสที่ต าแหน่งต่าง ๆ ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/20

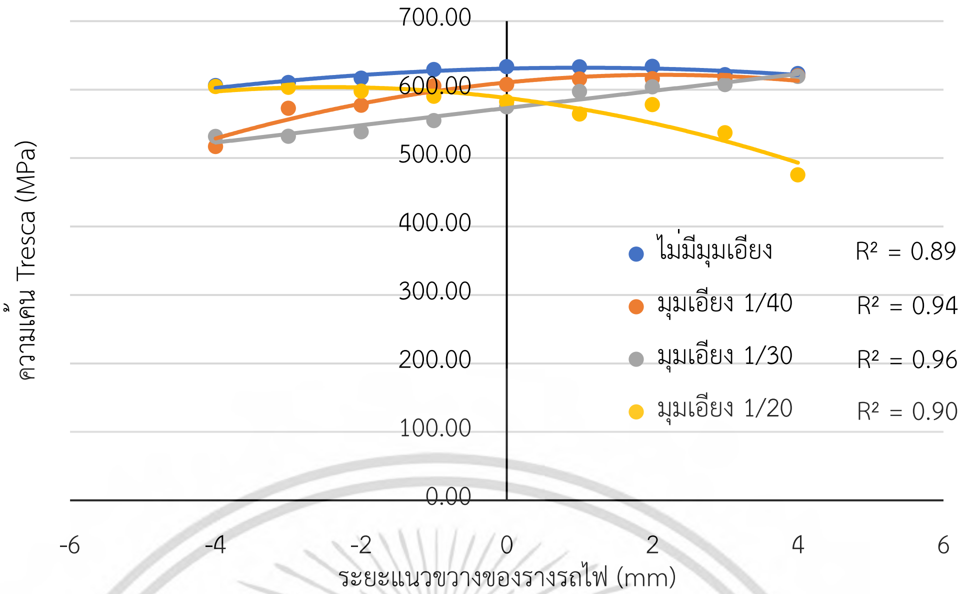


รูปที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบพื้นที่สัมผัส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง

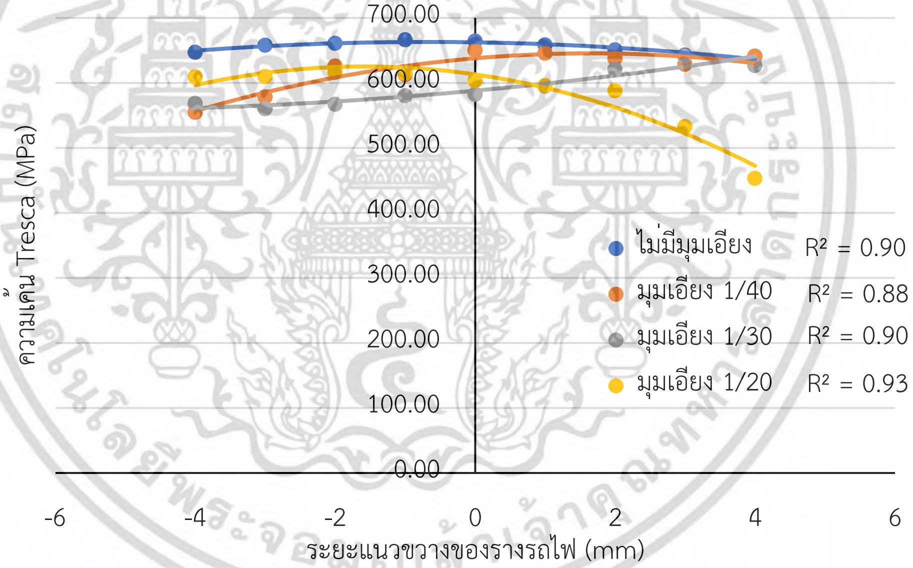
5.2.2.3 ความเค้น Tresca

จากการพิจารณาความเค้น Tresca ของแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟ พบว่าความเค้น Tresca ของล้อและรางรถไฟจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ ความเค้น Tresca จะมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในกรณีที่รางรถไฟไม่มีมุมเอียง โดยมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เมื่อแบบจาลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งจากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side และความเค้น Tresca จะมีค่าเฉลี่ยต่าสุดในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/30 โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแบบจ าลสสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งจากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side เช่นเดียวกับกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40 ซึ่งแตกต่างจากกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/20 ที่ความเค้น Tresca มีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5.21 และรูปที่ 5.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 กราฟเปรียบเทียบความเค้น Tresca ที่ล้อ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง



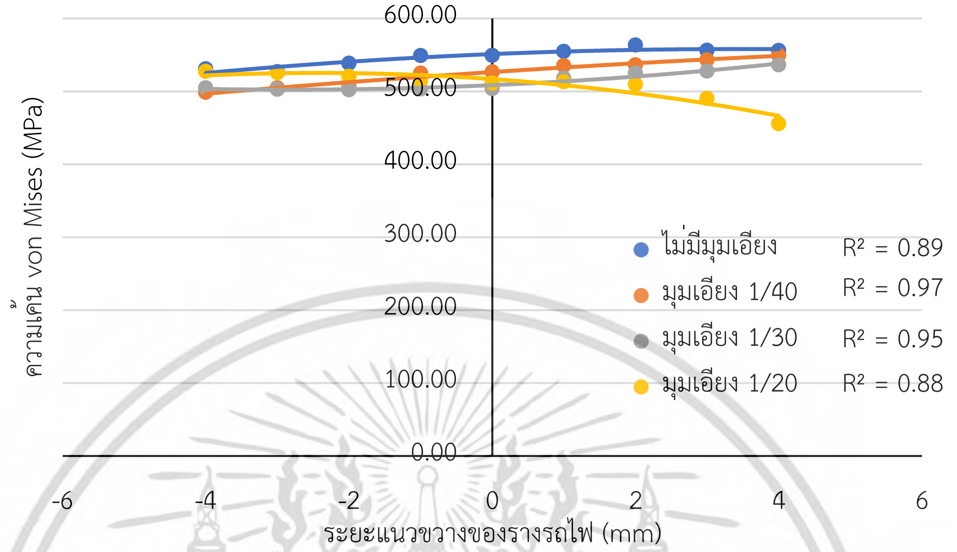
รูปที่ 5.22 กราฟเปรียบเทียบความเค้น Tresca ที่รางรถไฟ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง

5.2.2.4 ความเค้น von Mises

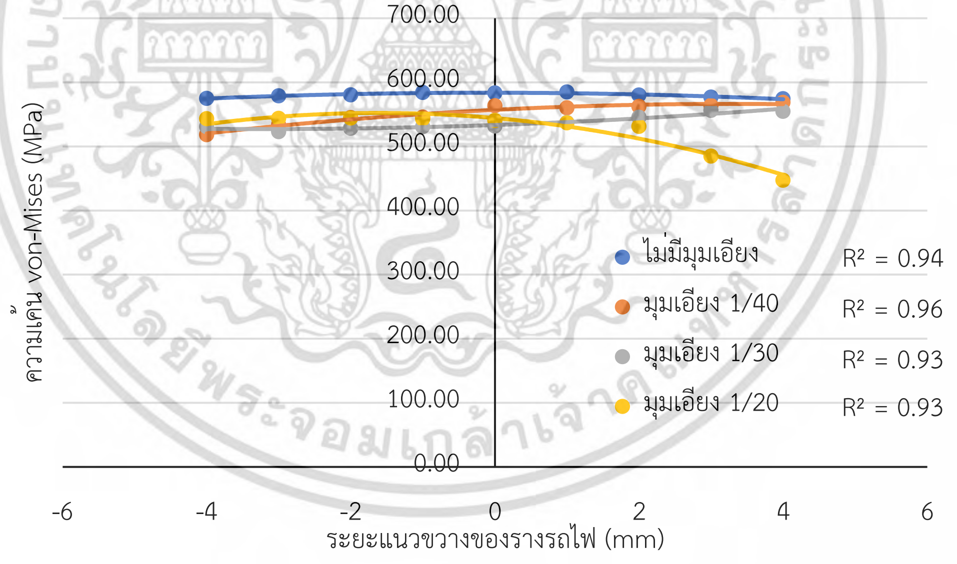
จากการพิจารณาความเค้น von Mises ของแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟ พบว่า ความเค้น von Mises ของล้อและรางรถไฟจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ ความเค้น von Mises จะมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในกรณีที่รางรถไฟไม่มีมุมเอียง โดยมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เมื่อแบบจาลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งจากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side และความเค้น von Mises จะมีค่าเฉลี่ยต่ำสุดในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/30 โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแบบจ าลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งจากด้าน Gauge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

side ไปยังด้าน Field side เช่นเดียวกับกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40 ซึ่งแตกต่างจากกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/20 ที่ความเค้น von Mises มีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5.23 และรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.23 กราฟเปรียบเทียบความเค้น von Mises ที่ล้อ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง



รูปที่ 5.24 กราฟเปรียบเทียบความเค้น von Mises ที่รางรถไฟ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง

5.3 การวิเคราะห์การล้าจากการสัมผัสกลิ้งของแบบจำลอง

การวิเคราะห์การล้าจากการสัมผัสกลิ้งระหว่างแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟด้วยเกณฑ์การล้าของ Dang Van เพื่อเปรียบเทียบต าแหน่งที่มีแนวโน้มเกิดการล้า เมื่อแบบจ าลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟที่มีมุมเอียง 1/40 จากนั้นจึงเปรียบเทียบตาแหน่งที่เกิดความเสียหายจากการล้าเมื่อแบบจาลองสามมิติของรางรถไฟมีการ

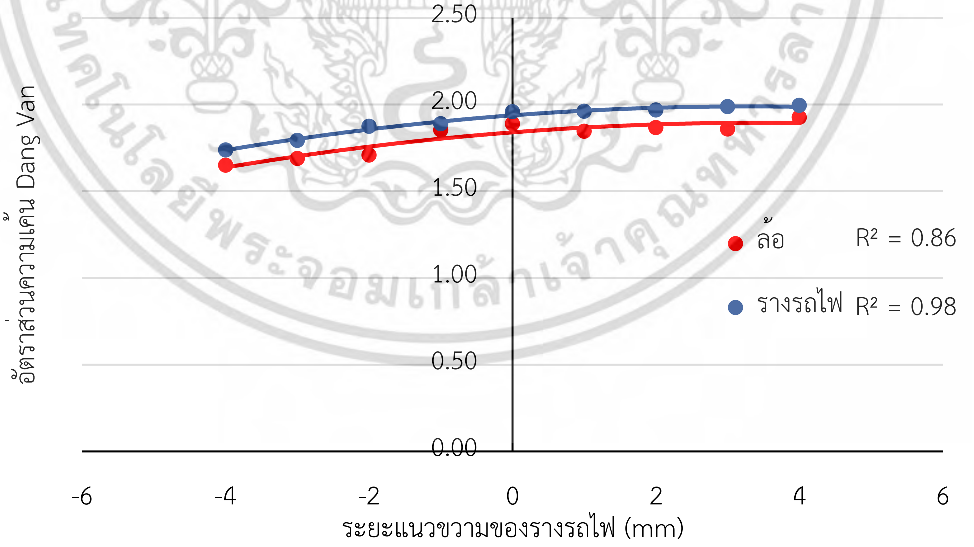
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงมุมเอียง โดยจะพิจารณาจากความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van ซึ่งคานวณจากความเค้น Tresca และความเค้น Hydrostatic ในแต่ละจุดต่อของแบบจาลองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยความเค้น Hydrostatic จะคานวณจากความเค้นในแนวแกน x , y และแกน z แล้วจึงน าความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van ไปเปรียบเทียบกับขีดจ ากัดของการล้า โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.3.1 กรณีเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟที่มีมุมเอียง 1/40

5.3.1.1 ความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van

จากการพิจารณาความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van จากการสัมผัสกลิ้งระหว่างแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟที่มีมุมเอียง 1/40 พบว่า ความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อแบบจาลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟจากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side กล่าวคือ ความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van ที่เกิดขึ้นกับล้อจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 519.88 MPa เมื่อล้ออยู่ที่ต าแหน่ง+4 mm และความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van ที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 538.37 MPa เมื่อล้ออยู่ที่ตาแหน่ง +4 มิลลิเมตร หากพิจารณาอัตราส่วนความเค้นของ Dang Van ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van กับขีดจากัดการล้าจากการบิด ตามสมการที่ (3.44) จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.25

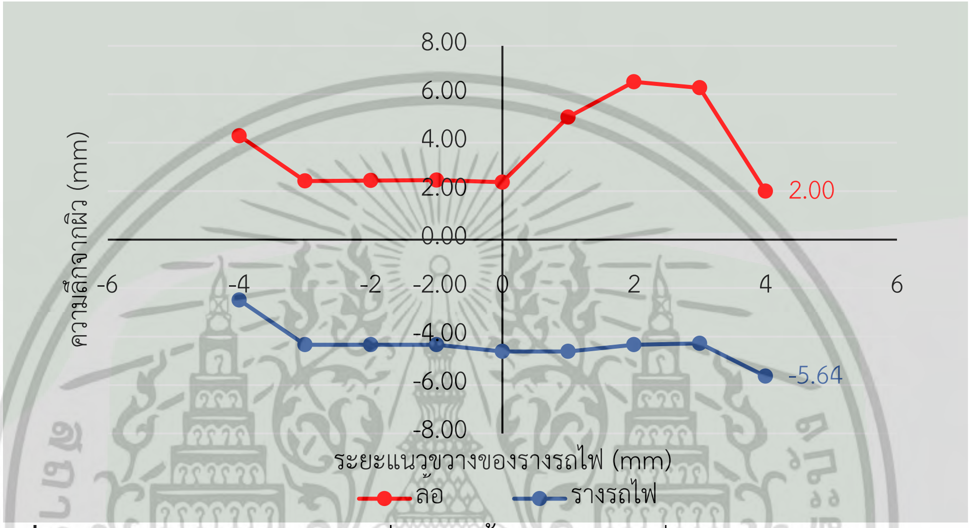


รูปที่ 5.25 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนความเค้น Dang Van ที่มีมุมเอียงของรางรถไฟ 1/40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.1.2 ตำแหน่งที่มีความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van สูงสุด

จากการพิจารณาตำแหน่งที่มีความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van สูงสุด จากการสัมผัสกลิ้งของแบบจำลองสามมิติของล้อและรางรถไฟที่มีมุมเอียง 1/40 พบว่า ตำแหน่งที่มีความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van สูงสุด จะเกิดขึ้นใต้ผิวของล้อและรางรถไฟ โดยความลึกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อแบบจำลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟจากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side ดังแสดงในรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.26 กราฟเปรียบเทียบตำแหน่งความเค้น Dang Van ที่มีมุมเอียงของรางรถไฟ 1/40

ดังนั้น หากพิจารณาอัตราส่วนความเค้น Dang Van จากการสัมผัสกลิ้งระหว่างแบบจำลองสามมิติของล้อและรางรถไฟที่มีมุมเอียง 1/40 ในแต่ละตำแหน่งที่ล้อมีการเปลี่ยนแปลงตามแนวขวางของรางรถไฟ จึงอาจสรุปได้ว่า ความเสียหายสูงสุดจากการล้าของล้อและรางรถไฟจะเกิดขึ้นเมื่อล้ออยู่ในตำแหน่ง +4 mm ตามแนวขวางของรางรถไฟ โดยตำแหน่งที่ล้อเกิดความเสียหายสูงสุดจากการล้าจะมีความลึกจากผิวของล้อ 2 mm และตำแหน่งที่รางรถไฟเกิดความเสียหายสูงสุดจากการล้าจะมีความลึกจากผิวของรางรถไฟ 5.64 mm ทั้งนี้ ความเสียหายจากการล้าที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟจะมีความรุนแรงมากกว่าล้อ

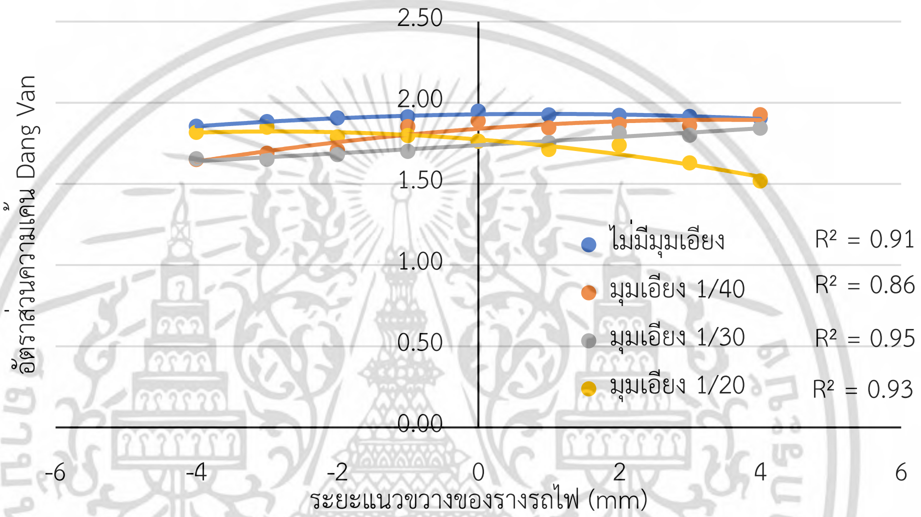
5.3.2 กรณีเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของรางรถไฟ

5.3.2.1 ความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van

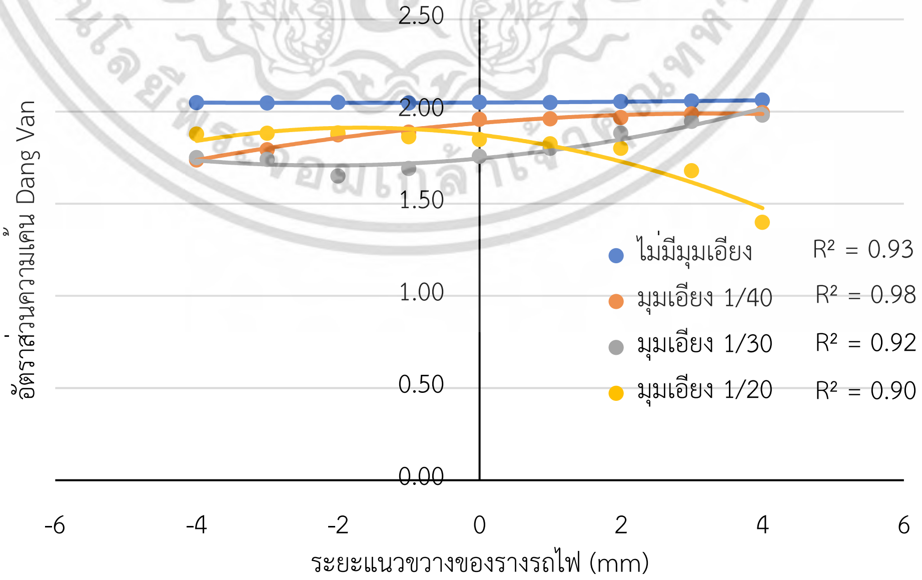
จากการพิจารณาความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van ของแบบจำลองสามมิติของล้อและรางรถไฟ พบว่า ความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van ที่เกิดขึ้นกับล้อและรางรถไฟจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ ความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van จะมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในกรณีที่รางรถไฟไม่มีมุมเอียง โดยมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจาลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งจากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side และความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van จะมีค่าเฉลี่ยต่ สุดในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/30 โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแบบจาลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งจากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side เช่นเดียวกับกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40 ซึ่งแตกต่างจากกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/20 ที่ความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van มีแนวโน้มลดลง หากพิจารณาอัตราส่วนความเค้นของ Dang Van ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van กับขีดจ ากัดการล้าจากการบิด ตามสมการที่ (3.44) จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.27 และรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.27 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนความเค้น Dang Van ที่ล้อ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง

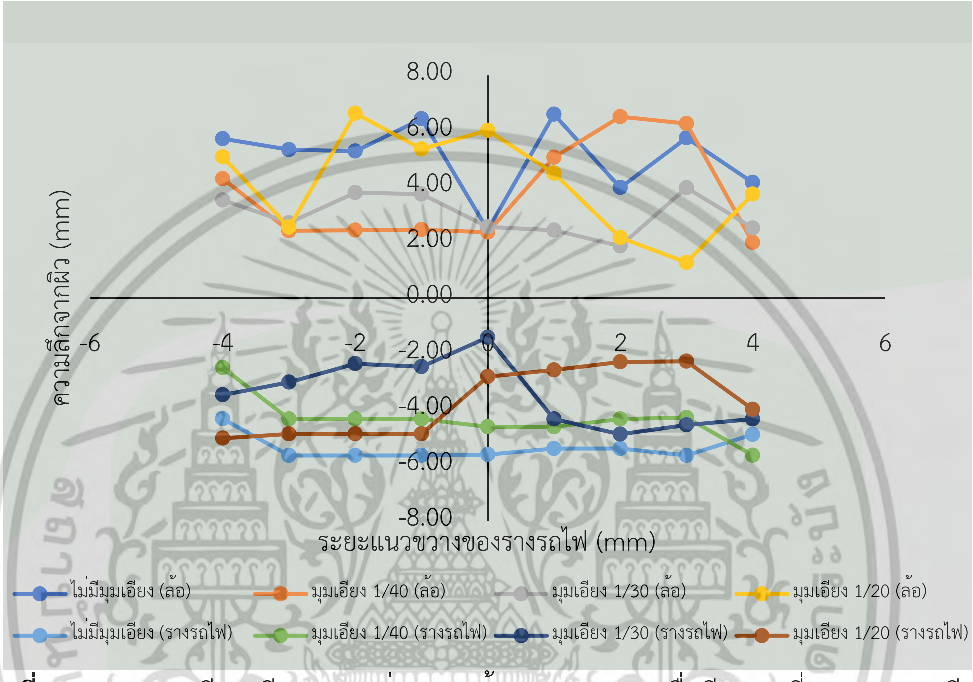


รูปที่ 5.28 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนความเค้น Dang Van ที่รางรถไฟ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2.2 ตำแหน่งที่มีความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van สูงสุด

จากการพิจารณาต าแหน่งที่มีความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van สูงสุดจากการสัมผัสกลิ้ง พบว่า ตาแหน่งที่มีความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van สูงสุด จะอยู่ใต้ผิวของทั้งแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟ โดยจะมีความลึกเฉลี่ยสูงสุดในกรณีที่รางรถไฟไม่มีมุมเอียง และมีความลึกเฉลี่ยต่ าสุดในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/30 ดังแสดงในรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.29 กราฟเปรียบเทียบต าแหน่งความเค้น Dang Van เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง

ดังนั้น หากพิจารณาอัตราส่วนความเค้น Dang Van จากการสัมผัสกลิ้งระหว่างแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟที่มีมุมเอียงต่าง ๆ จึงอาจสรุปได้ว่า ความเสียหายสูงสุดจากการล้าของล้อและรางรถไฟจะเกิดขึ้นในกรณีที่รางรถไฟไม่มีมุมเอียง โดยตาแหน่งที่ล้อเกิดความเสียหายสูงสุดจากการล้าจะมีความลึกจากผิวของล้อ 2.45 mm และต าแหน่งที่รางรถไฟเกิดความเสียหายสูงสุดจากการล้าจะมีความลึกจากผิวของรางรถไฟ 5.65 mm ทั้งนี้ ความเสียหายจากการล้าที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟจะมีความรุนแรงมากกว่าล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษาแบบจ าลองสามมิติของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะพิจารณาเปรียบเทียบการกระจายตัวของความดันสัมผัส พื้นที่สัมผัส ความเค้น Tresca และความเค้น von Mises ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในกรณีที่แบบจาลองสามมิติของล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งตามแนวขวางของรางรถไฟที่มีมุมเอียง 1/40 จากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side รวมถึงในกรณีที่แบบจาลองสามมิติของรางรถไฟมีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง แล้วจึงคานวณความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van โดยอาศัยจากความเค้น Tresca และความเค้น Hydrostatic ในแต่ละจุดต่อของแบบจาลอง เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ต าแหน่งที่มีแนวโน้มจะเกิดความเสียหายจากการล้าขึ้น สามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.1 บทสรุป

1. สามารถจาลองการสัมผัสกลิ้งระหว่างล้อและรางรถไฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการสร้างแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟโดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS จากนั้นจึงใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์การสัมผัสกลิ้ง โดยก าหนดเงื่อนไขขอบเขตให้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุดเพื่อความแม่นย าของผลลัพธ์

2. จากผลการศึกษา พบว่า ความดันสัมผัส ความเค้น von Mises และความเค้น Tresca จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งจากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side เนื่องจากขนาดของพื้นที่สัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ค่าเฉลี่ยของความดันสัมผัส ความเค้น von Mises และความเค้น Tresca จะมีแนวโน้มลดลง เมื่อรางรถไฟมีมุมเอียงเพิ่มขึ้นจนถึง 1/30 เนื่องจากขนาดของพื้นที่สัมผัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

3. จากการศึกษา พบว่า การหาต าแหน่งการเกิดการล้าของล้อและรางรถไฟตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van สามารถด าเนินการได้การพิจารณาค่าความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van ซึ่งคานวณจากค่าความเค้นไฮโดรสแตติก ประกอบกับความเค้นในแนวแกนต่างๆ รวมถึงความเค้น Tresca ของแต่ละจุดต่อในแบบจ าลอง เปรียบเทียบกับขีดจากัดการล้าจากการบิด หากความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van ในบริเวณใดมีค่ามากกว่าขีดจากัดการล้าจากการบิด แสดงว่า บริเวณนั้นมีแนวโน้มการเกิดการล้าขึ้น

4. จากผลการศึกษา พบว่า ความเสียหายจากการล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้งในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40 จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อล้อมีการเปลี่ยนแปลงตาแหน่งจากด้าน Gauge side ไปยังด้าน Field side เนื่องจากความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยความเสียหายจากการล้าจะเกิดขึ้นในบริเวณใต้ผิวของล้อและรางรถไฟ ทั้งนี้ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟจะมีความรุนแรงมากกว่าล้อ

5. จากผลการศึกษา พบว่า ความเค้นตามเกณฑ์การล้าของ Dang Van จะมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

1) ในกรณีที่รางรถไฟไม่มีมุมเอียง ล้อจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 514.05 MPa รางรถไฟจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 548.97 MPa โดยความเสียหายสูงสุดจากการล้าของล้อจะเกิดขึ้น เมื่อตาแหน่งของล้ออยู่บริเวณกลางรางรถไฟ และความเสียหายสูงสุดจากการล้าของรางรถไฟจะเกิดขึ้นเมื่อตาแหน่งของล้ออยู่บริเวณด้าน Gauge side

2) ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/40 ล้อจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 488.38 MPa รางรถไฟจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 514.70 MPa โดยความเสียหายสูงสุดจากการล้าของล้อและรางรถไฟจะเกิดขึ้นเมื่อต าแหน่งของล้ออยู่บริเวณด้าน Field side

3) ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/30 ล้อจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 463.78 MPa รางรถไฟจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 481.46 MPa โดยความเสียหายสูงสุดจากการล้าของล้อและรางรถไฟจะเกิดขึ้นเมื่อต าแหน่งของล้ออยู่บริเวณด้าน Field side

4) ในกรณีที่รางรถไฟมีมุมเอียง 1/20 ล้อมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 468.33 MPa รางรถไฟจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 481.69 MPa โดยความเสียหายสูงสุดจากการล้าของล้อและรางรถไฟจะเกิดขึ้นเมื่อต าแหน่งของล้ออยู่บริเวณด้าน Gauge side

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาแนวโน้มของต าแหน่งการเกิดการล้าของล้อและรางรถไฟภายใต้การสัมผัสกลิ้งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ จะต้องอาศัยความเข้าใจในหลักการพื้นฐานรวมถึงเทคนิคต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยในหัวข้อนี้จะนาเสนอปัญหาที่พบในการทาวิจัยรวมถึงข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยต่อไป โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ในการกาหนดคุณสมบัติของวัสดุของแบบจาลองที่ใช้ในการศึกษาแนวโน้มการเกิดการล้าเป็นการอ้างอิงจากบทความหรืองานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกันซึ่งอาจส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงควรทาการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุเพื่อนาใช้ในการสร้างแบบจาลอง เพื่อท าให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นย าและถูกต้องมากขึ้น

2. จากการพิจารณาต าแหน่งการเกิดความเสียหายจากการล้า พบว่า ความเสียหายจะเกิดขึ้นในบริเวณใต้ผิวของแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟซึ่งมีความลึกแตกต่างกันไปในแต่ละต าแหน่งดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความลึกดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นเพียงการศึกษาแนวโน้มของตาแหน่งการเกิดการล้า จึงไม่มีการพิจารณาอายุของการล้า ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการพยากรณ์อายุของการล้าเพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนการซ่อมบ ารุงอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

4. เนื่องจากการแสดงแนวโน้มของผลลัพธ์ในบางตาแหน่งมีความไม่สอดคล้องกับค่า R^2 ดังนั้นจึงควรมีการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมอื่นเพื่อเปรียบเทียบต่อไป

5. เนื่องจากแบบจาลองที่นามาวิเคราะห์มีขนาดใหญ่ และเงื่อนไขขอบเขตมีความซับซ้อน จึงต้องการเอลิเมนต์ที่มีความละเอียดสูงในบริเวณที่มีการสัมผัสระหว่างแบบจาลองสามมิติของล้อและรางรถไฟ ดังนั้นจึงควรใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยความจ าสูงเพื่อลดระยะเวลาในการค านวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Vijay K. Garg and Rao V. Dukkipati. **Dynamics of railway vehicle systems**. Canada : Academic Press. 1984.

[2] K.L.Johnson. **Contact mechanics**. Cambridge : Cambridge University Press. 1985.

[3] W. Yan, F.D. Fischer. "Applicability of the Hertz contact theory to rail-wheel contact problems" **Archive of Applied Mechanics 70.** 2000. pp.255 – 268.

[4] K. Dang Van and M.H. Maitournam. "On some recent trends in modelling of contact fatigue and wear in rail", **Wear**, Vol. 253, 2002. pp.219 – 227.

[5] A. Kapoor, F.J. Franklin, S.K. Wong and M. Ishida. "Surface roughness and plastic flow in rail wheel contact" **Wear**, Vol. 253, 2002. pp.257 – 264.

[6] Aleksander Sladkowski and Marek Sitarz. "Analysis of wheel–rail interaction using FE software" **Wear**, Vol. 258, 2005. pp.1217 – 1223.

[7] I.Y. Shevtsov, V.L. Markine and C. Esveld. "Optimal design of wheel profile for railway vehicles" **Wear**, Vol. 258, 2005. pp.1022 – 1030.

[8] P Hosseini Tehrani and M Saket. "Fatigue crack initiation life prediction of railroad" **7th International Conference on Modern Practice in Stress and Vibration Analysis**, Journal of Physics, Conference Series 181, IOP Publishing, 2009.

[9] J. Sandstorm. "Evaluation of Dang Van stress in Hertzian rolling contact" **Fatigue & Fracture of Engineering Material & Structures**, Vol. 35, Wiley Publishing Ltd., 2012. pp.1088 – 1094.

[10] J. Herian , K. Aniołek. "Modelling of structure and properties of pearlitic steel and abrasive wear of the turnout frog in the cyclic loading conditions" **JAMME**, Vol. 49, 2011. pp.71 – 81.

[11] Roya Sadat Ashofteh. "Calculating the Contact Stress Resulting from Lateral Movement of the Wheel on Rail by Applying Hertz Theory" **IJR International Journal of Railway**, Vol.6, No.4, 2013. pp.148 – 154.

[12] Jay Prakash Srivastava, P.K. Sarkar, Vinayak Ranjan. "An Approximate Analysis for Hertzian Elliptical Wheel-Rail Contact Problem" **1st International and 16th National Conference on Machines and Mechanisms (iNaCoMM2013),** 2013. pp.249 – 253.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[13] Yuewei Ma, Valeri Markinea, Abdul Ahad Mashala and Mingfa Ren. “Modelling verification and influence of operational patterns on tribological behaviour of wheel-rail interaction” **Tribology International**, Vol.114, 2017. pp.264 – 281.

[14] Zwierczyk, Péter Tamás, Váradi, Károly. **“Thermal and stress analysis of a railway wheel-rail rolling-sliding contact”** Ph.D. dissertation, Department of Machine and Product Design, Faculty of Mechanical Engineering, Budapest University of Technology and Economics. 2015.

[15] Saurabh Kumar. **Technical Report, Study of Rail Breaks : Associated Risks and Maintenance Strategies.** Division of Operation and Maintenance Engineering, Luleå Railway Research Center (JVCT), Luleå University of Technology, Luleå, Sweden. 2006.

[16] Felix Hofmann, Gratiela Bertolino, Andrei Constantinescu and Mahamed Ferjani. “Numerical exploration of the Dang Van high cycle fatigue criterion : Application to gradient effects” **Journal of mechanics of materials and structures**, Vol.4, 2009. pp.293 – 308.

[17] Daryl L. Logan. **Finite Element Method.** Reading : Thomson Publishing Company, Inc. 2002.

[18] **BS EN 13674-1:2003 Railway applications. Track. Rail. Vignole railway rails 46 kg/m and above**, British Standards Institution.

[19] **JIS E 5402-1 Rolling Stock - Solid Wheel - Part 1: Quality Requirements**, Japanese Standards Association.

[20] นคร จันทศร. **ช่างรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ โครงการพัฒนาระบบขนส่งทางรางและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวเนื่องของประเทศไทย**. กรุงเทพฯ : ส านักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2554.

[21] วริทธิ์ อึ๊งภากรณ์, ชาญถนัดงาน. **การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1.** กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ บริษัท เอช. เอ็น. กรุ๊ป จ ากัด 2548.

[22] Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke, Richard G. Budynas. **การออกแบบเครื่องจักรกล.** แปลโดย น.อ.ภาณุฤทธิ์ ยุกตะทัต. กรุงเทพฯ : บริษัท ส านักพิมพ์ท้อป จ ากัด 2552.

[23] R. C. Hibbeler. **Machanics of Material 2.** แปลโดย บุรฉัตร ฉัตรวีระ, วทัชภพ เดชพันธ์

[24] ดร.เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. **กลศาสตร์ของวัสดุ (MECHANICS OF MATERIALS)** : มิตรนราการพิมพ์. 1997.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[25] สุรทัศน์ กองสุข. **“การจำลองการตกรางเนื่องจากล้อปีนรางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2555.

[26] **โครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง ช่วงบางใหญ่ – บางซื่อ**. การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของมุมเอียงรางต่อความเค้นสัมผัสกลิ้งระหว่างล้อและราง
Effect of Rail Inclination Angle on Wheel/Rail Rolling Contact Stress

สุเทพ แร่อ่อน* และ มนต์ศักดิ์ พิมสาร

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
*ติดต่อ: route-beer@hotmail.com, 089-665-6690

บทคัดย่อ

ระบบขนส่งทางรางเป็นระบบที่ถูกนำมาใช้ในการขนส่งสินค้าและผู้โดยสารอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นทางเลือกในการขนส่งที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และมีความปลอดภัยสูง การบำรุงรักษาและป้องกันความเสียหายกับล้อและรางเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความปลอดภัยของระบบ จากการศึกษาข้อมูลทางสถิติ พบว่า ความความเสียหายที่เกิดขึ้นกับล้อและรางส่วนใหญ่ คือ การแตกร้าว ซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นสัมผัส (Contact Stress) ระหว่างล้อและราง ซึ่งความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายประการ เช่น รูปทรงเรขาคณิตของล้อและราง น้ำหนักกดเพลา ความกว้างของราง ระยะการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของราง และมุมเอียงราง เป็นต้น บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์การกระจายความเค้นบริเวณที่มีการสัมผัสกลิ้งระหว่างล้อและรางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) โดยใช้ข้อมูลทรงเรขาคณิตของล้อที่ใช้ในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง และรางมาตรฐาน UIC60 เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติสำหรับวิเคราะห์การกระจายความเค้น ขณะล้อเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และรางมีมุมเอียงราง 1/20 1/30 และ 1/40 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ แสดงให้เห็นว่า เมื่อรางมีมุมเอียง 1/20 ความเค้นสูงสุดของรางเกิดขึ้นที่ความลึกใต้ผิวประมาณ 2 มิลลิเมตร และรางเมื่อมีมุมเอียง 1/30 ความเค้นสูงสุดของล้อจะเกิดขึ้นที่ความลึกใต้ผิวประมาณ 3 มิลลิเมตร ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่มีแนวโน้มเกิดการแตกร้าวของล้อและรางได้มากกว่าบริเวณอื่น ผลการศึกษาแสดงถึงแนวทางเบื้องต้นในการวิเคราะห์อายุการใช้งานและวางแผนการซ่อมบำรุงรักษาต่อไป

คำหลัก: มุมเอียงราง ; ความเค้นสัมผัส ; การแตกร้าว ; ไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

Rail transit system is being used for freight and passengers trip throughout as one of the captive transportation modes which is the economic worthiness and high safety mode. Wheels and rails maintenance and damage prevention are important factors affecting the safety of the system. The previous data show that cracking is the most wheel and the rail damage which is a result of contact stress between wheel and rail. The contact stress caused by several factors such as the geometry of the wheels and rails, axle load, lateral displacement and rail inclination. This manuscripts compiles the analysis of the stress distribution of the rolling contact between wheel and rail by Finite Element Method (FEM) using the data of MRT Purple Line wheel profile with rails UIC60 standard creating a three-dimensional model for stress distribution analysis while moving at 80 kilometers per hour and rail inclination at 1/20, 1/30 and 1/40 respectively. The result shows that when the oblique angle is 1/20, the maximum stress of rail has occurred at a depth of about 2 millimeters beneath and when the rail inclination is 1/30, the maximum stress of rail has occurred at a depth of about 3 millimeters beneath. The specified position is more likely to split up than other areas. The model and result from this study can be primary guideline for lifetime analysis and maintenance planning for other wheel and rail standards.

Keywords: Rail inclination; Contact stress; Crack; FEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ล้อและรางรถไฟเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญมากในระบบการขนส่งทางราง ทั้งในด้านความปลอดภัยและด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากเป็นส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของรถไฟ และค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่ในการซ่อมบำรุงของอุตสาหกรรมการขนส่งทางรางถูกใช้จ่ายไปกับการบำรุงรักษาล้อและรางรถไฟ ซึ่งในอนาคตมีแนวโน้มว่ารถไฟจะมีน้ำหนักกดเพลารวมถึงความเร็วในการเคลื่อนที่มากขึ้น จึงเป็นผลให้ความเค้นสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยความเค้นดังกล่าวเมื่อเกิดซ้ำไปมา (repeated cyclic stress) จะส่งผลให้เกิดการล้าซึ่งเป็นความเสียหายชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นกับล้อและรางรถไฟ ความเสียหายดังกล่าวอาจเริ่มเกิดขึ้นที่ผิวหรือใต้ผิวของล้อและรางรถไฟที่สัมผัสกัน

ทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ [1] ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในการคำนวณความเค้นสัมผัสของล้อและราง [2] โดยเงื่อนไขต่างๆ ในการสัมผัสต้องเป็นไปตามสมมติฐานของทฤษฎี ซึ่งเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ เช่น สมมติฐานกำหนดให้พื้นที่สัมผัสต้องมีขนาดเล็กมาก เมื่อเทียบกับขนาดและความโค้งของวัตถุ แต่ในการสัมผัสกันของล้อและรางในบริเวณใกล้กับบังใบล้อ ความโค้งของพื้นผิวจะมีขนาดใกล้เคียงกับพื้นที่สัมผัส จึงอาจทำให้ผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์เกิดความคลาดเคลื่อน ดังนั้นในการแก้ปัญหาข้อจำกัดดังกล่าวจึงได้มีการนำเอาวิธีการประมาณเชิงตัวเลข เช่น ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) มาใช้ในการวิเคราะห์แทน

ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เช่น Yan และ Fischer [3] ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ปัญหาการสัมผัสของวัสดุต่างๆ ซึ่งรวมถึงล้อและราง โดยทำการตรวจสอบแบบจำลองเปรียบเทียบกับทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ พบว่า ถ้าบริเวณที่มีการสัมผัสไม่มีการเปลี่ยนแปลงรัศมีความโค้งและไม่เกิดสภาวะพลาสติกจะส่งผลให้การกระจายตัวของความดันสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆ ของรางในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ Srivastava และคณะ [5] ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ความเค้นและรูปร่างของพื้นที่สัมผัสของล้อและรางเปรียบเทียบกับการคำนวณตามทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ พบว่า รัศมีความโค้งของรูปร่างล้อ มุมเอียงของพื้นล้อเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเค้นและรูปร่างของพื้นที่สัมผัสที่เกิดขึ้น

2. ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ (Hertz contact theory)

ทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ได้ถูกเผยแพร่ในปี ค.ศ. 1882 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ชื่อ Heinrich Hertz ได้ทำการศึกษาการสัมผัสของของแข็งยืดหยุ่น ซึ่งได้อธิบายคุณสมบัติการสัมผัสกันของเลนส์ โดยความเค้นสัมผัสของเฮิรตซ์ (Hertzian stress contact) คือความเค้นที่เกิดจากการสัมผัสกันระหว่างพื้นผิวโค้งของเลนส์ภายใต้แรงกระทำตั้งฉาก ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาการสัมผัสของล้อและราง กล่าวคือ เมื่อล้อกดลงบนรางจะส่งผลให้พื้นที่สัมผัสระหว่างล้อและรางมีลักษณะเป็นรูปวงรี โดยมีที่ระยะครึ่งของวงรีสัมผัสตามแนวแกนหลัก (Major semi-axes of contact ellipse) คือ และระยะครึ่งของวงรีสัมผัสตามแนวแกนรอง (Minor semi-axes of contact ellipse) คือ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$a = m\left[\frac{3\pi P\left(K_1 + K_2\right)}{4K_4}\right]^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$b = n\left[\frac{3\pi P\left(K_1 + K_2\right)}{4K_4}\right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

โดย P คือ แรงกระทำในแนวตั้งฉากทั้งหมด และ

$$K_1 = \frac{1-\nu_W^2}{\pi E_W} \quad (3)$$

$$K_2 = \frac{1-\nu_R^2}{\pi E_R} \quad (4)$$

$$K_3 = \frac{1}{2}\left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R'_2}\right] \quad (5)$$

โดย R_1 คือ รัศมีการกลิ้งหลักของล้อ; R'_1 คือ รัศมีความโค้งของล้อที่จุดสัมผัสตามแนวขวาง; R_2 คือ รัศมีการกลิ้งหลักของรางที่จุดสัมผัส ($R_2 = \infty$); R'_2 คือ รัศมีความโค้งของรางที่จุดสัมผัสตามแนวขวาง; ν_W , ν_R คือ อัตราส่วนปัวซองของวัสดุของล้อและรางตามลำดับ; E_W , E_R คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุของล้อและรางตามลำดับ
รัศมีความโค้งของวัตถุจะมีค่าเป็นบวกถ้าจุดศูนย์กลางของรัศมีความโค้งอยู่ภายในวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ... ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการ (1) และ (2) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วน $\dfrac{K_4}{K_3}$ โดย K_4 สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$K_4 = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R'_1}\right)^2+\left(\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R'_2}\right)^2+2\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R'_1}\right)\left(\frac{1}{R_2}-\frac{1}{R'_2}\right)\cos 2\psi\right] \quad (6)$$

โดยที่ ψ คือมุมระหว่างระนาบหลักซึ่งประกอบด้วยรัศมีความโค้ง $\dfrac{1}{R_1}$ และ $\dfrac{1}{R_2}$; m และ n คือ สัมประสิทธิ์ของเฮิรตซ์ และ θ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{K_4}{K_3}\right) \quad (7)$$

ความดันสัมผัสในแนวตั้งฉากที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในพื้นที่สัมผัสระหว่างล้อและราง สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$p(x,y) = p_0\left\{1-\left(\frac{x}{a}\right)^2-\left(\frac{y}{b}\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$p_0 = \frac{3P}{2\pi ab} \quad (9)$$

โดย $p(x,y)$ คือ ความดันสัมผัสในแนวตั้งฉากที่ตำแหน่งต่างๆ; p_0 คือ ความดันสัมผัสในแนวตั้งฉากสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของพื้นที่สัมผัสระหว่างล้อและราง

ความเค้น (Stress) ในแนวตั้งฉากที่ความลึกต่างๆ ใต้ผิวสัมผัสที่จุดกึ่งกลางของพื้นที่สัมผัสระหว่างล้อและราง คำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{\sigma_z}{p_0} = -\frac{b}{e^2 a}\left(\frac{1-T^2}{T}\right) \quad (10)$$

$$T = \left(\frac{b^2+z^2}{a^2+z^2}\right)^2 \quad (11)$$

$$e = \left(1-\frac{b^2}{a^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

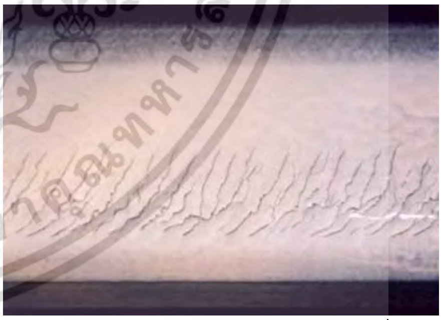
โดย e คือ ค่าความเยื้องศูนย์ของรูปวงรี

2.2. การเสียหายจากการล้าของล้อและราง

รูปแบบการเสียหายจากการล้าของล้อและราง ที่มักพบเห็นสามารถ จัดจำแนกได้เป็นดังนี้

1. การเสียหายจากการล้าที่ผิว (Surface-induced failures) การเสียหายที่เกิดจากการเสียรูปแบบถาวร (plastic deformation) ใต้ผิวประมาณในระดับไม่กี่มิลลิเมตร ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าว จากนั้นเมื่อมีภาระมากระทำแบบซ้ำๆ จะทำให้รอยแตกร้าวโตขึ้นและขยายตัวไปที่ผิวของชิ้นงาน และอาจทำให้เกิดการหลุดล่อนของผิวชิ้นงานได้ รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างการเสียหายจากการล้าที่ผิว ซึ่งเกิดรอยแตกร้าวชัดเจน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะให้ความสนใจในการทำนายตำแหน่งของจุดกำเนิดของรอยแตกร้าวชนิดนี้

2. การเสียหายจากการล้าใต้ผิว (Subsurface failures) โดยปกติการเสียหายอาจจะเกิดจากกรณีที่มีเศษวัสดุเจือปนในชิ้นงานหรือมีรอยแตกร้าวหรือรูพรุนใต้ผิวชิ้นงานที่ระดับความลึกมาก เช่น 20-30 มิลลิเมตร เป็นต้น เกิดขึ้นอยู่แล้วก็ได้ ดังนั้นรอยแตกร้าวจะมีการขยายตัวออกเป็นสาขา รอยแตกร้าวบางส่วนจะมีการขยายตัวไปยังผิวชิ้นงาน สุดท้ายทำให้เกิดการหลุดล่อนของชิ้นงาน ขนาดใหญ่เกิดขึ้น ทำให้ผิวชิ้นงานมีการเสียหายมาก ตัวอย่างถ้าเป็นล้อหรือราง ก็ทำให้มีความเสี่ยงที่จะทำให้ตกรางได้



รูปที่ 2-1 แสดงการเสียหายจากการล้าที่ผิว ทำให้เกิดรอยแตกที่ผิวของรางรถไฟ

2.3. ทฤษฎีของการวิบัติ

โครงสร้างต่างๆจะเกิดการวิบัติขึ้นได้เมื่อมีความเค้นมากเกินไปที่วัสดุนั้นจะรับได้ ซึ่งทฤษฎีของการวิบัติที่นิยมกล่าวถึงคือ ทฤษฎีของ H. Tresca (ค.ศ.1864) ซึ่งเป็นทฤษฎีของค่าความเค้นเฉือนมากที่สุด (Maximum Shear Stress Theory) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_{yield}}{2} \quad (13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทฤษฎีของ R. Von Mises (ค.ศ.1913) ซึ่งเป็นทฤษฎีของพลังงานมากที่สุด (Maximum Distortion Energy Theory) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

$$\sigma_{yield}^{2} = \frac{\left[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2\right]}{2} \tag{14}$$

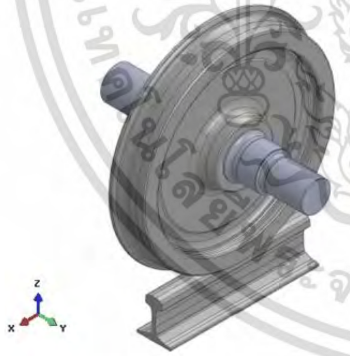
โดยทฤษฎีทั้งสองสามารถใช้กับวัสดุแบบเหนียว (Ductile Materials) เท่านั้น

3. การจำลองการกลิ้งของล้อบนรางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 การสร้างแบบจำลอง

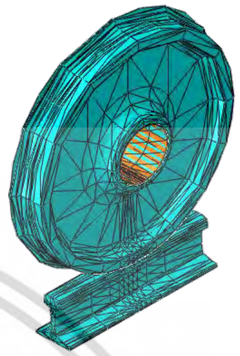
ในบทความนี้สร้างแบบจำลองของล้อตามที่มีการใช้งานจริงในโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง ซึ่งถูกออกแบบบนพื้นฐานของล้อแบบ EPS ตามมาตรฐาน EN 13715 และรางตามแบบ UIC 60E1 และ BS100lb

จากนั้นวิเคราะห์การกลิ้งของล้อบนรางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้แบบจำลองของล้อ 1 ล้อและรางที่มีความยาว 0.65 เมตร ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างหมอนรองราง (Sleeper) ดังแสดงในรูปที่ 2



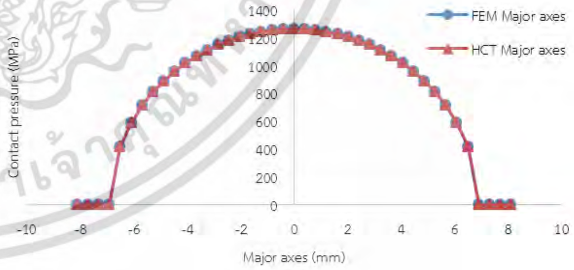
รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองของล้อและราง

กำหนดคุณสมบัติทางกลของวัสดุของล้อและรางให้มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Young's Modulus) เท่ากับ 210 GPa อัตราส่วนบัวซอง (Poisson's Ratio) เท่ากับ 0.3 และเพลามีคุณสมบัติเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body) โดยผิวเพลาและดุมล้อมีการสัมผัสกันแบบถาวร (Perfect bonding) มีแรงขนาด 81,423 นิวตัน กระทำที่เพลาในแนวดิ่ง ผิวล้อและผิวรางมีการสัมผัสกันแบบมีความเสียดทานที่มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.3 ใช้อัลกอริทึมในการวิเคราะห์การสัมผัสแบบอ็อกเมนเท็ดลากรานจ์ (Augmented lagrange) โดยแบบจำลองในการวิเคราะห์การกลิ้งของล้อบนรางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วยเอลิเมนต์แบบสามมิติจำนวน 126,089 เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 3

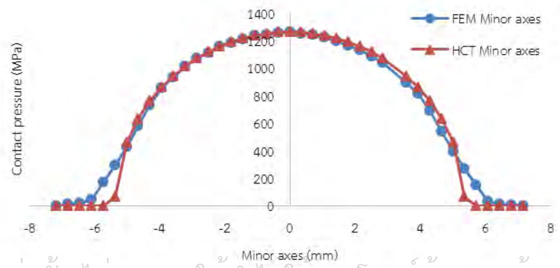

รูปที่ 3 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของล้อและราง

3.2 การตรวจสอบแบบจำลอง

ทำการเปรียบเทียบความดันสัมผัส (Contact pressure) ในแนวตั้งฉากที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในพื้นที่วงรีตามแนวแกนหลักและแนวแกนรอง รวมถึงความเค้น (Stress) ในแนวตั้งฉากที่ความลึกต่างๆ ที่จุดกึ่งกลางของพื้นที่สัมผัสที่เกิดจากการสัมผัสระหว่างล้อและรางที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับการคำนวณตามทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ ตามสมการ (8) (9) (10) (11) และ (12) ดังแสดงในกราฟที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

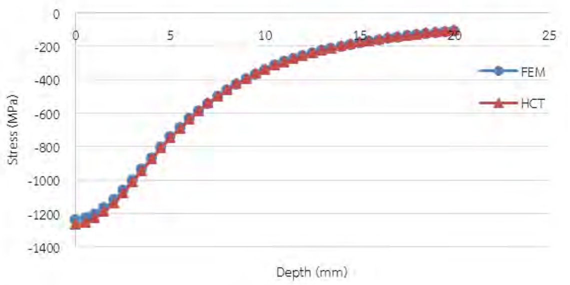


กราฟที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบความดันสัมผัสตามแนวแกนหลัก



กราฟที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นในแนวตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นในแนวตั้งฉากที่ความลึกต่างๆ

พบว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลลัพธ์ที่มีความสอดคล้องตามทฤษฎีการสัมผัสของเฮิรตซ์ ดังนั้นจึงสามารถนำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์การกลิ้งของล้อบนรางต่อไปได้

3.3 การวิเคราะห์การกลิ้งของล้อบนราง

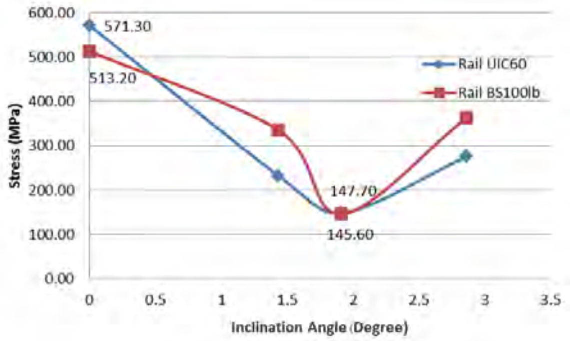
ในบทความนี้กำหนดให้ล้อมีการเคลื่อนที่ไปตามรางที่ตำแหน่งกึ่งกลางของพื้นล้อตรงกับตำแหน่งกึ่งกลางของหัวราง ด้วยความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (อัตราเร็วเชิงมุม 52.29 เรเดียนต่อวินาที) และยังคงมีแรงขนาด 81,423 นิวตัน กดที่เพลาในแนวดิ่ง โดยกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์ให้รางมีมุมเอียงราง (Rail Inclination) เท่ากับ 0 1/40 1/30 และ1/20 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4

รูปที่ 4 แสดงมุมเอียงราง (Rail Inclination)

4. ผลลัพธ์และการอภิปราย

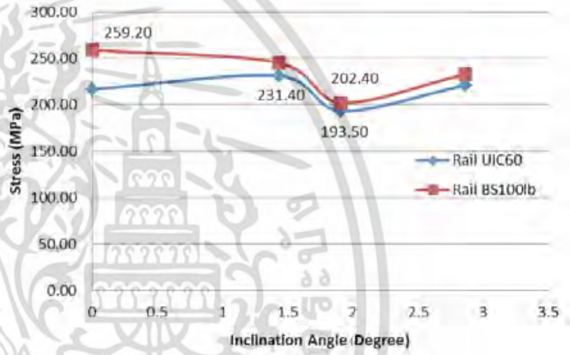
เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองการกลิ้งของล้อบนรางที่มีมุมเอียงต่างๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า ในกรณีที่รางไม่มีมุมเอียงรางจะส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือนในระนาบ $Y-Z$ และในระนาบ $X-Z$ มีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรางที่มีมุมเอียงอื่นๆ มีค่าต่ำสุดเมื่อรางมีมุมเอียงรางเท่ากับ 1/30 ทั้งในรางแบบ UIC60 และ BS100lb ดังแสดงในรูป

τ_{Y-Z}



กราฟที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนที่รางในระนาบ $Y-Z$ กับมุมเอียงราง

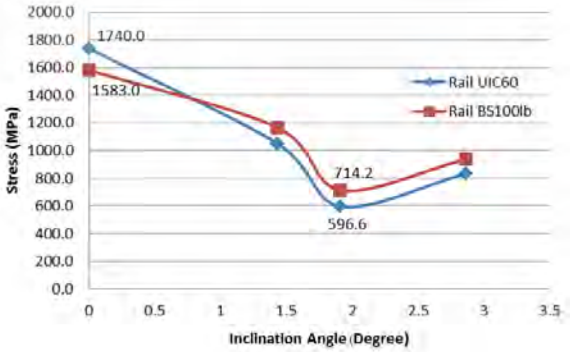
τ_{X-Z}



กราฟที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนที่รางในระนาบ $X-Z$ กับมุมเอียงราง

หากพิจารณาความเค้น Von–mises ที่เกิดขึ้นในรางพบว่า ความเค้น Von-mises จะมีค่าสูงสุดเมื่อล้อกลิ้งบนรางที่ไม่มีมุมเอียงราง และจะมีค่าต่ำสุดเมื่อล้อกลิ้งบนรางที่มีมุมอียงรางเท่ากับ 1/30 ทั้งในรางแบบ UIC60 และ BS100lb ดังแสดงในกราฟที่ 6

$\sigma_{Von-mises}$

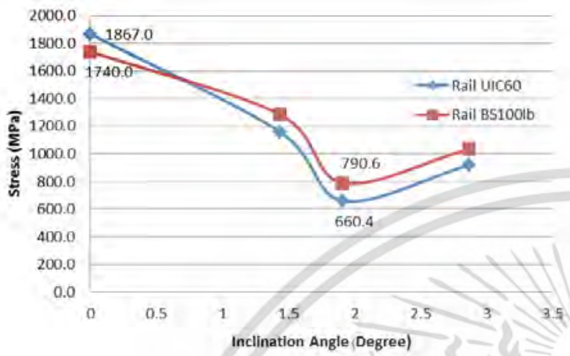


กราฟที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น Von-mises กับมุมเอียงราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากพิจารณาความเค้นเฉือน Tresca ที่เกิดขึ้นในราง พบว่า ความเค้นเฉือน Tresca จะมีค่าสูงสุดเมื่อล้อกลิ้งบนรางที่ไม่มีมุมเอียงราง และจะมีค่าต่ำสุดเมื่อล้อกลิ้งบนรางที่มีมุมอียงรางเท่ากับ 1/30 ทั้งในรางแบบ UIC60 และ BS100lb ดังแสดงในกราฟที่ 7

τ_{Tresca}



กราฟที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน Tresca กับมุมเอียงราง

5. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาแบบจำลองการกลิ้งระหว่างล้อและรางด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า ในกรณีที่รางไม่มีมุมเอียงราง จะส่งผลให้เกิดความเค้น Von-mises และความเค้นเฉือน Tresca ที่เกิดขึ้นในรางมีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่รางมีมุมเอียงรางอื่นๆ ดังนั้นจึงอาจสรุปในเบื้องต้นได้ว่า มุมเอียงรางเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความเค้นและความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในราง ทั้งนี้ความเค้น Von-mises และความเค้นเฉือน Tresca ดังกล่าวจะเกิดขึ้นในบริเวณหัวราง (Rail Head) ที่ระยะความลึกจากผิวราง 1-2 มิลลิเมตร ซึ่งในบริเวณดังกล่าวจะเป็นจุดเริ่มต้นของความล้าของวัสดุทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับรางและจะนำไปสู่การแตกร้าวและจะมีการขยายตัวมาถึงผิวของราง จนทำให้เราสามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความรู้และคำแนะนำในการศึกษา ขอขอบคุณการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทยสำหรับข้อมูลของโครงการรถไฟฟ้าสายสีม่วง

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Johnson, K. L, (1985), “Contact mechanics”, Cambridge University Press

[2] Vijay K. Garg, Rao V. Dukkipati, (1984), “Dynamics of railway vehicle systems”, Academic Press

[3] W. Yan, F.D. Fischer, (2000), “Applicability of the Hertz contact theory to rail-wheel contact problems”, Archive of Applied Mechanics 70, Page 255-268

[4] Jay Prakash Srivastava, P.K. Sarkar, (2013), Vinayak Ranjan, “An Approximate Analysis for Hertzian Elliptical Wheel-Rail Contact Problem”, 1st International and 16th National Conference on Machines and Mechanisms (iNaCoMM2013) India, Page 249-253

[5] BS EN 13715:2006+A1:2010 Railway applications. Wheelsets and bogies. Wheels. Tread profile

[6] BS EN 13674-1:2003 Railway applications. Track. Rail. Vignole railway rails 46 kg/m and above

[7] ดร.เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, (1997), “กลศาสตร์ของวัสดุ (MECHANICS OF MATERIALS)”, มิตรนราการพิมพ์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสุเทพ แร่อ่อน
วัน เดือน ปีเกิด	1 มิถุนายน 2528
ที่อยู่	73 หมู่ 6 ต าบลโพหัก อ าเภอบางแพ จังหวัดราชบุรี 70160
ประวัติการศึกษา	2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์ท างาน	
พ.ศ.2551-2553	วิศวกรซ่อมบ ารุงบริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จ ากัด
พ.ศ.2553-ปัจจุบัน	วิศวกร ระดับ 7 และรักษาการหัวหน้าแผนกก ากับงานระบบรถไฟฟ้า กองก ากับงานระบบรถไฟฟ้า ฝ่ายระบบรถไฟฟ้า การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้