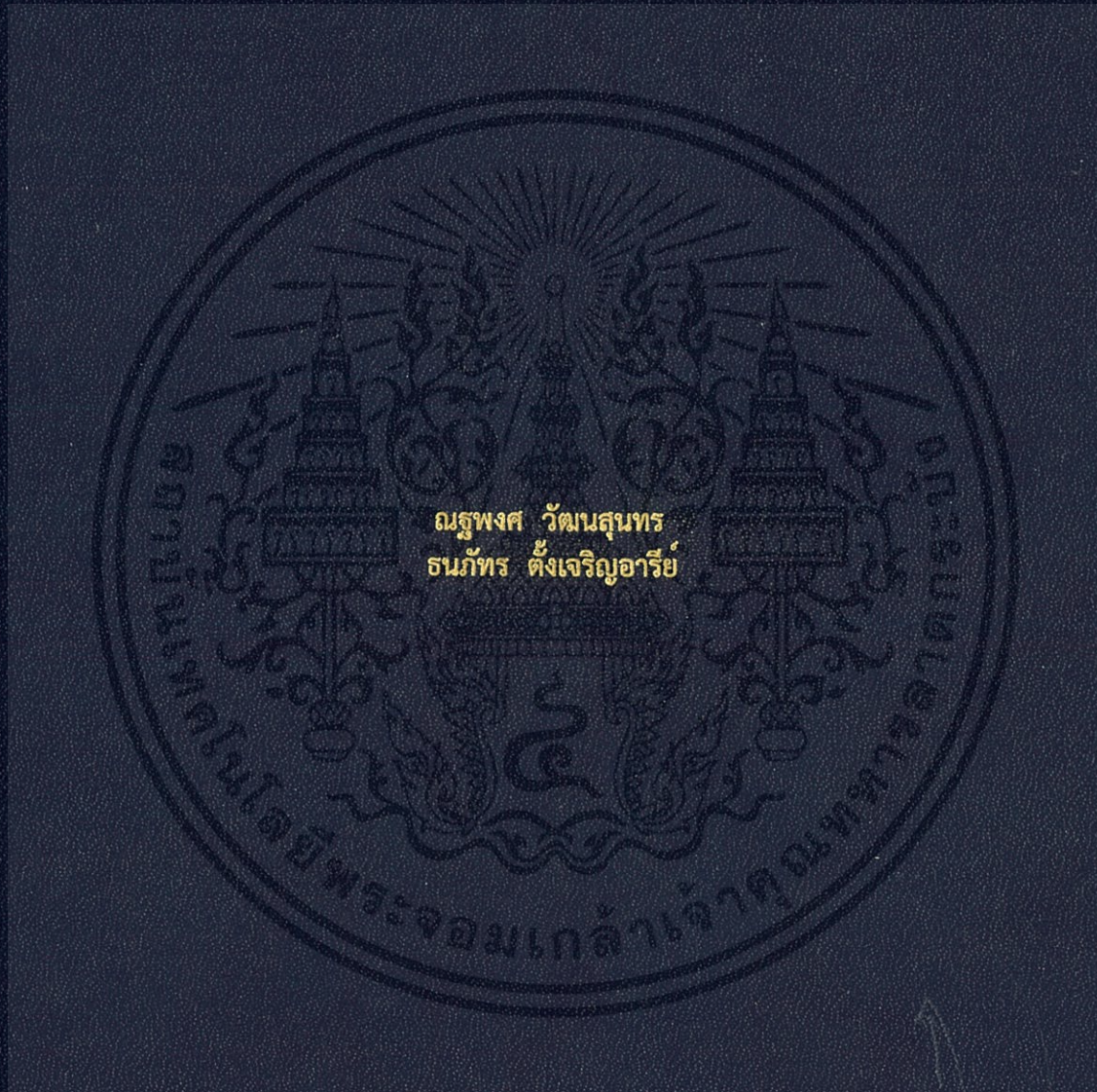


การวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางหลังการเจียรรางในรูปแบบสามมิติ
โดยใช้ระเบียบทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ANALYSIS OF THE 3D RAIL-WHEEL CONTACT AFTER STEP GRINDING
USING FEA



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางหลังการเจียรรางในรูปแบบสามมิติ

โดยใช้ระเบียบทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ANALYSIS OF THE 3D RAIL-WHEEL CONTACT AFTER STEP GRINDING
USING FEA



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANALYSIS OF THE 3D RAIL-WHEEL CONTACT AFTER STEP GRINDING
USING FEA



NATAPONG WATTANASUNTHORN

TANAPAT TUNGJAREUNAREE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2559

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางหลังการเจียรรางในรูปแบบสามมิติโดยใช้ระเบียบ
ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

Analysis of the 3D Rail-Wheel Contact After Step Grinding Using FEA

ผู้จัดทำ

1. นาย ณัฐพงศ์ วัฒนสุนทร รหัสประจำตัว 56010348

2. นาย ธนภัทร ตั้งเจริญอารีย์ รหัสประจำตัว 56010538



ปัญญา ชันสุวรรณ
(ผศ.ดร.ปัญญา ชันสุวรรณ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์การสัมผัส ระหว่างล้อและรางหลังการเจียรรางในรูปแบบสามมิติโดยใช้ระเบียนทางไฟไนต์เอลิเมนต์

นายณัฐพงศ์ วัฒนสุนทร 56010348
 นายธนภัทร ตั้งเจริญอารีย์ 56010538
 ผศ.ดร.ปัญญา ชันสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษา
 ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

การสัมผัสกันระหว่างล้อและรางรถไฟทำให้เกิดความเค้น ความเค้นนั้นเป็นส่วนหนึ่งของการทำให้เกิดความเสียหาย ซึ่งความเสียหายนี้ก่อให้เกิดอุบัติเหตุการตกรางที่เป็นอันตรายเป็นอย่างมาก เพื่อลดผลกระทบดังกล่าวจึงได้รับการซ่อมบำรุงโดยการเจียรรางอย่างสม่ำเสมอ เพื่อกำจัดผิวหน้าสัมผัสที่เสียหายออก วัตถุประสงค์ของโครงการนี้คือการวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อและรางรถไฟก่อนและหลังจากการเจียรราง เพื่อศึกษาการกระจายตัวของความเค้น โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองของล้อและรางที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นแบบ 3 มิติ โดยกำหนดบริเวณที่เราตรวจสอบความเค้นที่กระจายอยู่ภายในหน้าสัมผัสของรางโดยแบ่งออกเป็น 3 ระดับจากผิวสัมผัสลงไปภายในรางและหาความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของความเค้นในการเจียรรางแต่ละระดับ

การศึกษาพบว่าสภาวะก่อนการเจียรรางมีค่าพลังงานในการเสียรูป = 4.975 และสภาวะหลังการเจียรราง 6 มิลลิเมตร มีค่าพลังงานในการเสียรูป = 5.072 และสภาวะหลังการเจียรราง 12 มิลลิเมตร มีค่าพลังงานในการเสียรูป = 5.218 และสภาวะหลังการเจียรราง 18 มิลลิเมตร มีค่าพลังงานในการเสียรูป = 5.296 จะเห็นได้ว่าเมื่อรางได้ผ่านการเจียรที่มากขึ้นจะมีผลทำให้เกิดการเสียรูปได้ง่ายขึ้น

คำสำคัญ : หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์, ความเค้น, การสัมผัสกันระหว่างล้อและราง

ANALYSIS OF THE 3D RAIL-WHEEL CONTACT AFTER STEP GRINDING USING FEA

Natapong Wattasunthorn 56010348

Tanapat Tungjareunaree 56010538

Assoc.Prof.Dr.panya kanswan Advisor

Year 2016

ABSTRACT

The contact between wheel and rail causes stress. Stress that part of the damage which is causing the accident derailment is extremely dangerous. To reduce such impact, thus receiving maintenance by grinding Rails regularly. To remove the crack surface. The objective of this project Failure Analysis of Rail-Wheel after step grinding. To study the distribution of stress by using finite element method. Models of wheels and rails used in the analysis by the finite element method is three-dimensional. The influence of area was investigated the stress distributed in subsurface rails into 3 levels from contact to subsurface rails and Finding the relationship of the distribution of stresses in the grinding each level.

The results of this study provided the condition before grinding had a deformation of energy is 4.975 and the condition after the condition of 6 mm had a deformation of energy was 5.072. In addition, the condition of the grinding condition of 12 mm and 18mm had a deformation energy are 5.218 and 5.296 respectively. It can be seen that when the rails have more grinding. This will result to deformities easier.

Keywords : *Finite Element Analysis, Stress, Wheel-rail contact*

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์และความกรุณาของบุคคลหลายท่านที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและความช่วยเหลือเกี่ยวกับการดำเนินงานต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งเป็นผู้ให้ความรู้ คำปรึกษาและคำแนะนำที่ดีมาโดยตลอด รวมถึงความกรุณาตรวจทานแก้ไขจนปริญญานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และบุคลากรทุกท่านที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่และเครื่องมืออุปกรณ์ ซึ่งทำให้การดำเนินงานวิจัยเป็นไปอย่างราบรื่น

ท้ายที่สุดนี้ หากมีสิ่งขาดตกบกพร่องประการใด คณะผู้เขียนขออภัยมา ณ โอกาสนี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ ที่สามารถนำข้อมูลต่าง ๆ ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ทั้งในเชิงวิชาการและเชิงปฏิบัติการต่อไป

นายณัฐพงศ์ วัฒนสุนทร
นายธนภัทร ตั้งเจริญอารีย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย _____	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ _____	II
กิตติกรรมประกาศ _____	III
สารบัญ _____	IV
สารบัญตาราง _____	VIII
สารบัญภาพ _____	IX
บทที่ 1 บทนำ _____	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ _____	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย _____	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย _____	2
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย _____	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ _____	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง _____	5
2.1 บทนำ _____	5
2.2 รางรถไฟ _____	5
2.2.1 มาตรฐานราง _____	7
2.2.2 ความกว้างทางรถไฟ _____	8
2.2.3 การบำรุงรักษาทางรถไฟ _____	9
2.2.4 การเจียร์ราง _____	11
2.3 ล้อรถไฟ _____	12
2.3.1 วิธีซ่อมบำรุงล้อ _____	13
2.4 การสันสะเทือนที่เป็นอันตราย _____	13
2.5 ความจำเป็นในการรักษามาตรฐานของมิติสำคัญของล้อและการบำรุงรักษาทางรถไฟ _____	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการสิ้นของล้อยลื่อนรถไฟ _____	16
2.7 การวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อยกับรางด้วยทฤษฎีของเฮิร์ต _____	16
2.8 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ _____	21
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง _____	22
2.9.1 บทนำ _____	22
2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง _____	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย _____	26
3.1 บทนำ _____	26
3.2 แบบจำลองของล้อยและราง _____	26
3.2.1 คุณสมบัติของล้อยรถไฟ รุ่น EN 13262 _____	26
3.2.2 คุณสมบัติของรางรหัส UIC 60 _____	28
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย _____	29
3.3.1 ทำการวิเคราะห์การสัมผัสกันของล้อยและรางในพิกัดสองมิติโดยใช้โปรแกรม Marc mantat _____	29
3.3.1.1 ทำการวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อยและรางในพิกัดสองมิติ โดยกำหนดกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นพิจารณาล้อยเป็นแบบ Mesh Deforming _____	30
3.3.1.2 ทำการวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อยและรางในพิกัดสองมิติ โดยกำหนดกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นพิจารณาล้อยเป็นแบบ Rigid body _____	32
3.3.2 ทำการวิเคราะห์การสัมผัสกันของล้อยและรางในพิกัดสองมิติโดยใช้ทฤษฎีการสัมผัสกันของ Hertz contact _____	33
3.3.2.1 การวิเคราะห์การสัมผัสกันโดยใช้ทฤษฎี Hertz contact ในกรณีที่ล้อยเป็นแบบ Mesh Deforming _____	34
3.3.2.2 การวิเคราะห์การสัมผัสกันโดยใช้ทฤษฎี Hertz contact ในกรณีที่ล้อยเป็นแบบ Rigid body _____	34
3.3.3 การพิสูจน์ความถูกต้อง _____	35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.4 การวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางหลังการเจียรรางในรูปแบบสองมิติ	
โดยใช้ระเบียบทางไฟไนต์เอลิเมนต์	35
3.3.4.1 การกำหนดวัสดุให้แบบจำลอง	36
3.3.4.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้แบบจำลอง โดยกำหนดบริเวณฐานรางจะไม่มี	
การเคลื่อนที่ในแนวแกน X และ Y	37
3.3.4.3 ทำการวิเคราะห์การเจียรรางทั้งหมดสามระดับคือ 6mm. 12mm. 18mm.	
โดยกำหนดขอบเขตและเงื่อนไขตามที่กล่าวมาข้างต้น	37
3.3.5 การวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางหลังเจียรรางในรูปแบบสามมิติโดยใช้	
ระเบียบทางไฟไนต์เอลิเมนต์	40
3.3.5.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองสามมิติของล้อและราง	40
3.3.5.2 สร้างเอลิเมนต์ให้แบบจำลอง	43
3.3.5.3 การกำหนดวัสดุให้แบบจำลอง	45
3.3.5.4 การกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตให้แบบจำลอง	46
3.3.5.5 ทำการวิเคราะห์การเจียรรางทั้งหมดสามระดับคือ 6mm. 12mm. 18mm.	
โดยกำหนดขอบเขตและเงื่อนไขตามที่กล่าวมาข้างต้น	46
บทที่ 4 ผลการวิจัย	48
4.1 การศึกษาผลการวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางก่อนการเจียรรางโดยระเบียบวิธีไฟ	
ไนต์เอลิเมนต์	49
4.2 การศึกษาผลการวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางหลังการเจียรราง 6 mm. โดยระเบียบ	
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	54
4.3 การศึกษาผลการวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางหลังการเจียรราง 12 mm. โดย	
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	59
4.4 การศึกษาผลการวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางหลังการเจียรราง 18 mm. โดย	
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ _____	72
5.1 สรุปผลการวิจัย _____	72
5.2 ข้อเสนอแนะ _____	72
เอกสารอ้างอิง _____	74



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าค่าวัสดุของรางชนิด A และ B	6
2.2 แสดงขนาดความกว้างของรางชนิดต่างๆ	8
2.3 แสดงค่ามาตรฐาน RI	15
2.4 อัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกระบอก 1 ต่อ ทรงกระบอก 2	17
2.5 แสดงค่า α , β และ λ	20
2.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ	23
3.1 แสดงค่าคุณสมบัติวัสดุของรางชนิดต่างๆ	29
3.2 แสดงค่าการคำนวณระหว่างการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์และการคำนวณด้วย Hertz contact	35
3.3 แสดงค่าเชิงกลของวัสดุจำลองของราง	35
3.4 แสดงค่าที่สำคัญของชุดล้อและราง	36
3.5 แสดงจำนวนเอลิเมนต์ของรางก่อนการเจียรราง	44

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย _____	3
2.1 แสดงรูปร่างลักษณะของราง _____	6
2.2 แสดงมิติสำคัญของรางรถไฟ _____	7
2.3 แสดงความกว้างของทางรถไฟ _____	8
2.4 แสดงรถตรวจทางขนาดเล็กสำหรับการนั่งตรวจทางทั่วไป _____	10
2.5 แสดงภาพรถล้างหินโรยราง _____	10
2.6 แสดงการสึกหรอของราง _____	11
2.7 แสดงรถเจียรรางรุ่นใหม่ _____	11
2.8 แสดงการเคลื่อนของชุดล้อ _____	12
2.9 แสดงแนวแรงขณะเกิดการกระแทกระหว่างบั้งใบล้อกับราง _____	13
2.10 แสดงผิวสัมผัสระหว่างบั้งใบล้อกับหัวรางแนวตัด A-A _____	14
2.11 แสดงการกระแทกต่างๆ _____	14
2.12 แสดงการสัมผัสกันระหว่างทรงกระบอกสองอัน _____	16
2.13 แสดงการสัมผัสกันของวัตถุสองชิ้นทั่วไป _____	18
2.14 แสดงรูปร่างเอลิเมนต์และเม็ชของราง _____	21
2.15 แสดงตำแหน่งของชุดล้อบริเวณกึ่งกลางราง _____	22
2.16 แสดงผลจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ _____	23
2.17 แสดงการวิเคราะห์ของราง _____	24
2.18 แสดงการวิเคราะห์ของล้อ _____	24
2.19 แสดงกราฟพลอตระหว่าง stress และ strain ของวัสดุล้อและราง _____	25
3.1 ลักษณะทางกายภาพของล้อรหัส EN13262 ER8 _____	27
3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุในการสร้างล้อรหัส EN13262 ER8 _____	27
3.3 ลักษณะทางกายภาพของรางรหัส UIC 60 _____	28
3.4 แสดงเงื่อนไขเริ่มต้นในการวิเคราะห์การสัมผัสกัน _____	30
3.5 แสดงการวิเคราะห์ที่ใช้เงื่อนไขเริ่มต้นของล้อเป็นแบบ Mesh Deforming _____	30
3.6 แสดงการ fix displacement ของการวิเคราะห์แบบ Mesh Deforming _____	31
3.7 แสดงผลลัพธ์ของการวิเคราะห์การสัมผัสกันแบบ Mesh Deforming _____	31
3.8 แสดงการวิเคราะห์ที่ใช้เงื่อนไขเริ่มต้นของล้อเป็นแบบ Rigid body _____	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.9 แสดงการfix displacement ของการวิเคราะห์ล้อยแบบ Rigid body _____	32
3.10 แสดงผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ล้อยแบบ Rigid body _____	33
3.11 แสดงการคำนวณหาค่าความเค้นสูงสุด _____	33
3.12 แสดงการกำหนดค่าวัสดุด้วยโปรแกรม Marc mentat _____	36
3.13 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตด้วยโปรแกรม Marc mentat _____	37
3.14 แสดงการวิเคราะห์การเจียรรางในสามระดับด้วยโปรแกรม Marc mentat _____	37
3.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ σ_{11} และ arc lengthในการเจียรรางสามระดับ _____	38
3.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ σ_{12} และ arc lengthในการเจียรรางสามระดับ _____	38
3.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ σ_{22} และ arc lengthในการเจียรรางสามระดับ _____	39
3.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ vonmises stress และ arc length ในการเจียรรางสามระดับ _____	39
3.19 แสดงการออกแบบล้อยด้วยโปรแกรม Solid work _____	40
3.20 แสดงการออกแบบล้อยด้วยโปรแกรม Solid work _____	41
3.21 แสดงการออกแบบล้อยด้วยโปรแกรม Marc mentat _____	41
3.22 แสดงการออกแบบรางสองมิติด้วยโปรแกรม Marc mentat _____	42
3.23 แสดงการออกแบบรางสามมิติด้วยโปรแกรม Marc mentat _____	42
3.24 แสดงการสร้างเอลิเมนต์ _____	43
3.25 แสดงการสร้างเม็ช (Meshing) ของราง _____	43
3.26 แสดงการกำหนดให้ล้อยเป็นวัตถุแข็งเกร็ง _____	44
3.27 แสดงการกำหนดให้แบบจำลอง _____	45
3.28 แสดงกราฟการเสีรูปลาวารของวัสดุรางโดยโปรแกรม Marc mentat _____	45
3.29 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้แบบจำลอง _____	46
3.30 แสดงการวิเคราะห์การเจียรราง 6 mm. _____	46
3.31 แสดงการวิเคราะห์การเจียรราง 12 mm. _____	47
3.32 แสดงการวิเคราะห์การเจียรราง 18 mm. _____	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

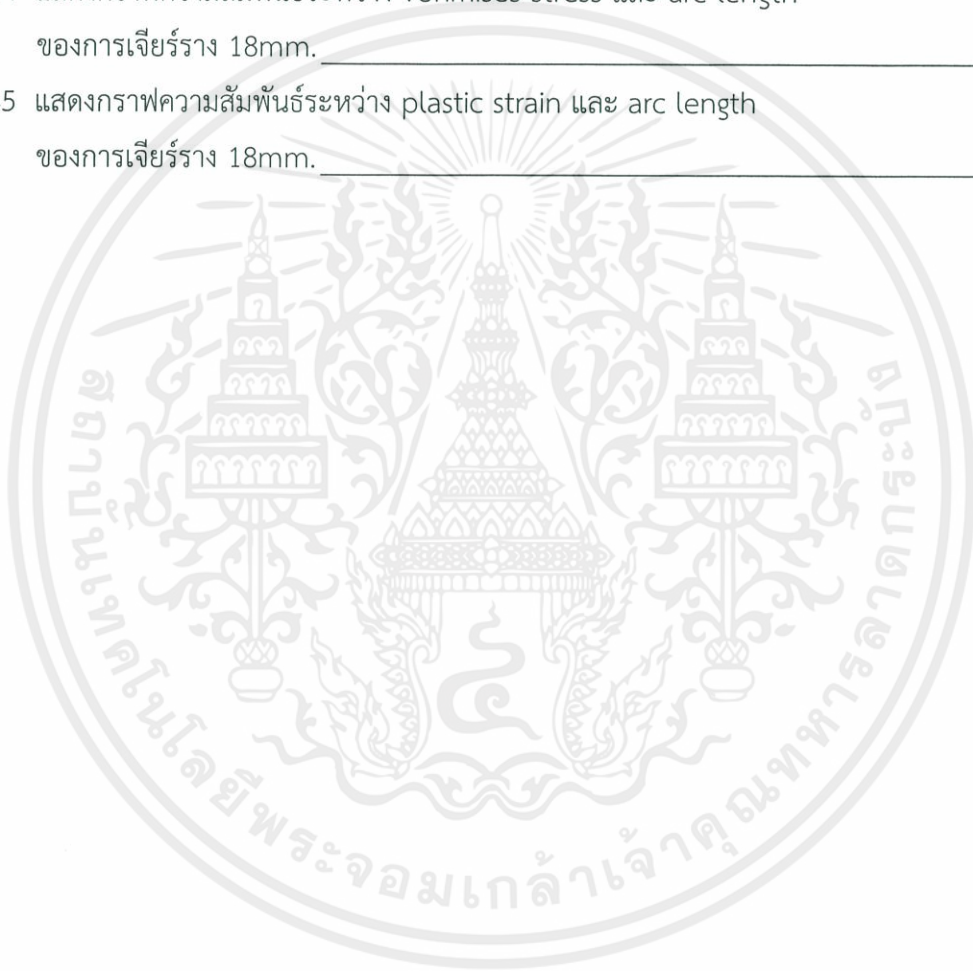
ภาพที่	หน้า
4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} และ arc length ก่อนการเจียรรูปร่าง	48
4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Total strain energy ,Plastic energy,Total elastic strain energy และ arc length ก่อนการเจียรรูปร่าง	48
4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent of plastic strain และ arc length ก่อนการเจียรรูปร่าง	49
4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{22} และ arc length ก่อนการเจียรรูปร่าง	50
4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} และ arc length ก่อนการเจียรรูปร่าง	50
4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{12} และ arc length ก่อนการเจียรรูปร่าง	51
4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง vonmises stress และ arc length ก่อนการเจียรรูปร่าง	51
4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{22} และ arc length ก่อนการเจียรรูปร่าง	52
4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} และ arc length ก่อนการเจียรรูปร่าง	52
4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{12} และ arc length ก่อนการเจียรรูปร่าง	53
4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง vonmises stress และ arc length ก่อนการเจียรรูปร่าง	53
4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} และ arc length ของการเจียรรูปร่าง 6mm.	54
4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Total strain energy ,Plastic energy,Total elastic strain energy และ arc length ของการเจียรรูปร่าง 6mm.	54
4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent of plastic strain และ arc length ของการเจียรรูปร่าง 6mm.	55
4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{22} และ arc length ของการเจียรรูปร่าง 6mm.	55
4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} และ arc length ของการเจียรรูปร่าง 6mm.	56
4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{12} และ arc length ของการเจียรรูปร่าง 6mm.	56
4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง vonmises stress และ arc length ของการเจียรรูปร่าง 6mm.	57
4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{22} และ arc length ของการเจียรรูปร่าง 6mm.	57
4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} และ arc length ของการเจียรรูปร่าง 6mm.	58
4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{12} และ arc length ของการเจียรรูปร่าง 6mm.	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง vonmises stress และ arc length ของการเจียรรูวง 6mm. _____	59
4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} และ arc length ของการเจียรรูวง 12mm. _____	59
4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Total strain energy ,Plastic energy,Total elastic strain energy และ arc length ของการเจียรรูวง 12mm. _____	60
4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent of plastic strain และ arc length ของการเจียรรูวง 12mm. _____	60
4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{22} และ arc length ของการเจียรรูวง 12mm. _____	61
4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} และ arc length ของการเจียรรูวง 12mm. _____	61
4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{12} และ arc length ของการเจียรรูวง 12mm. _____	62
4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง vonmises stress และ arc length ของการเจียรรูวง 12mm. _____	62
4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{22} และ arc length ของการเจียรรูวง 12mm. _____	63
4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} และ arc length ของการเจียรรูวง 12mm. _____	63
4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{12} และ arc length ของการเจียรรูวง 12mm. _____	64
4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง vonmises stress และ arc length ของการเจียรรูวง 12mm. _____	64
4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} และ arc length ของการเจียรรูวง 18mm. _____	65
4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Total strain energy ,Plastic energy,Total elastic strain energy และ arc length ของการเจียรรูวง 18mm. _____	66
4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent of plastic strain และ arc length ของการเจียรรูวง 18mm. _____	66
4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{22} และ arc length ของการเจียรรูวง 18mm. _____	67
4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} และ arc length ของการเจียรรูวง 18mm. _____	67
4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{12} และ arc length ของการเจียรรูวง 18mm. _____	68
4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง vonmises stress และ arc length ของการเจียรรูวง 18mm. _____	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{22} และ arc length ของการเจียรรูปร่าง 18mm. _____	69
4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} และ arc length ของการเจียรรูปร่าง 18mm. _____	69
4.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{12} และ arc length ของการเจียรรูปร่าง 18mm. _____	70
4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง vonmises stress และ arc length ของการเจียรรูปร่าง 18mm. _____	70
4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง plastic strain และ arc length ของการเจียรรูปร่าง 18mm. _____	71



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

โครงการระบบขนส่งทางรถไฟเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิและสถานีขนส่งผู้โดยสารอากาศยานในเมือง (Suvarnabhumi Airport Rail Link and City Air Terminal) มีจุดประสงค์ในการจัดสร้างเพื่อรองรับการให้บริการรับ-ส่งผู้โดยสารภายในเมืองที่จะเดินทางไปยังท่าอากาศยานได้สะดวก รวดเร็ว และคล่องตัว ระบบรถไฟฟ้านี้ให้บริการด้วยความเร็ว 160 กม./ชม. วิ่งบนทางยกระดับเลียบทางรถไฟสายตะวันออก ระยะทางประมาณ 28 กม. ผ่าน 8 สถานีและรองรับผู้โดยสารได้จำนวน 14,000 ถึง 50,000 คน : วัน : ทิศทาง

เมื่อกล่าวถึงรถไฟ คือเป็นยานพาหนะที่เคลื่อนที่ไปตามราง เพื่อการขนส่งหรือโดยสารจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง โครงสร้างของการเคลื่อนที่ของรถไฟจึงมีความสำคัญมากที่ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นสิ่งแรก โดยส่วนประกอบที่สำคัญของโครงสร้างการเคลื่อนที่ คือ ล้อและราง ซึ่งนอกจากเป็นชิ้นส่วนที่กำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ ยังมีหน้าที่ในการรองรับน้ำหนักของตัวรถ นอกจากนี้โครงสร้างของการเคลื่อนที่ ต้องรับแรงสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากบริเวณผิวรางรถไฟไม่เรียบอีกด้วย จากการศึกษาที่ศูนย์ซ่อมบำรุงคลองตัน พบปัญหาการเคลื่อนที่ของรถไฟที่สำคัญ คือ บริเวณการสัมผัสกันระหว่างล้อและรางที่ก่อให้เกิดความเสียหายบนผิวหน้าวัสดุ ทำให้การเคลื่อนที่ของรถไฟเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นไปถึงตัวรถ ส่งผลให้ผู้โดยสารเกิดความรู้สึกไม่สบายในระหว่างการโดยสาร

ปัญหาที่กล่าวมาจึงเป็นที่มาของหัวข้อโครงการวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและราง หลังการเจียรรางในรูปแบบสามมิติโดยใช้ระเบียบทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีสมมุติฐานว่า การกระจายความเค้นเป็นปัจจัยที่สำคัญของการสัมผัสระหว่างล้อและราง เช่น การสัมผัสกันของวัสดุ 2 ชนิดในการกลิ้งนั้นขึ้นอยู่กับเรขาคณิตของพื้นผิวสัมผัส ภาวะโหลดและคุณสมบัติของวัสดุในระบบ ในโครงการนี้ ใช้สมการวิเคราะห์คำนวณองค์ประกอบของการสัมผัสหรือ Hertzian Stress ซึ่งสมการนี้พิจารณาได้จากคุณสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุเพียงอย่างเดียวและโดยทั่วไปจะไม่คำนวณสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อและราง ทางคณะผู้จัดทำจึงแนวมโนทัศน์ที่จะศึกษา การกระจายตัวของความเค้นในก่อนและหลังสภาวะการเจียรราง เพื่อเป็นแหล่งอ้างอิงทางวิชาการ และเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ สามารถเข้าใจผลของการสัมผัสกันระหว่างล้อและรางได้อย่างถูกต้อง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อเป็นแหล่งข้อมูลอ้างอิงทางวิชาการ

1.2.2 เพื่อศึกษาการกระจายตัวของความเค้นในสภาวะก่อนและหลังเจียรรางโดยระเบียบทางไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2.3 เพื่อทราบความสัมพันธ์การกระจายตัวของความเค้นทั้งสภาวะก่อนและหลังเจียรราง โดยสามารถนำไปวิเคราะห์หาอายุการใช้งานได้ในอนาคต

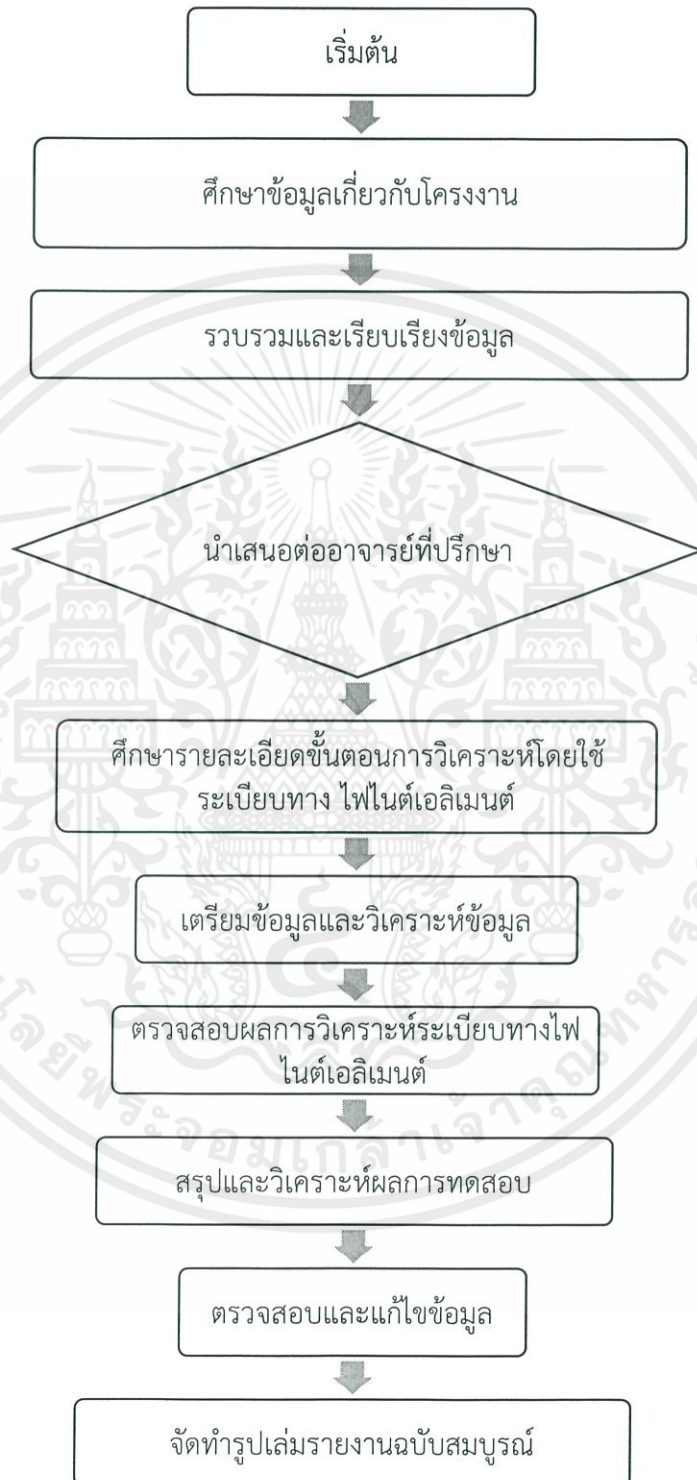
1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างล้อและรางโดยที่ไม่คิดแรงเสียดทานระหว่างล้อและรางเท่านั้น

1.3.2 ศึกษาการกระจายตัวของความเค้นระหว่างล้อและรางที่ใช้อยู่ในโครงการระบบขนส่งทางรถไฟเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิและสถานีขนส่งผู้โดยสารอากาศยานในเมือง (Suvarnabhumi Airport Rail Link and City Air Terminal)

1.3.3 ข้อมูลที่ทราบได้แก่ คุณสมบัติและคุณสมบัติของล้อและรางที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบถึงการกระจายตัวของความเค้นในสภาวะก่อนและหลังเจียรรัง
- 1.5.2 สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ของสภาวะก่อนการเจียรรังและหลังการเจียรรัง
- 1.5.3 สามารถนำผลการวิจัยไปวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของรางได้ในอนาคต
- 1.5.3 ผลวิจัยสามารถเป็นองค์ความรู้ หรือรูปแบบวิธีการวิจัยในระยะต่อไป



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสัมผัสกันระหว่างล้อและรางด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ถือเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญในการดำเนินงานวิจัย สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการสัมผัสกันของวัตถุสองชิ้น ซึ่งการสัมผัสเป็นแบบไม่สอดรับกัน (nonconformal contact) และทฤษฎีปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อและราง รวมถึงหลักการที่ประยุกต์ใช้กับโปรแกรม Marc mentat

2.2 รางรถไฟ

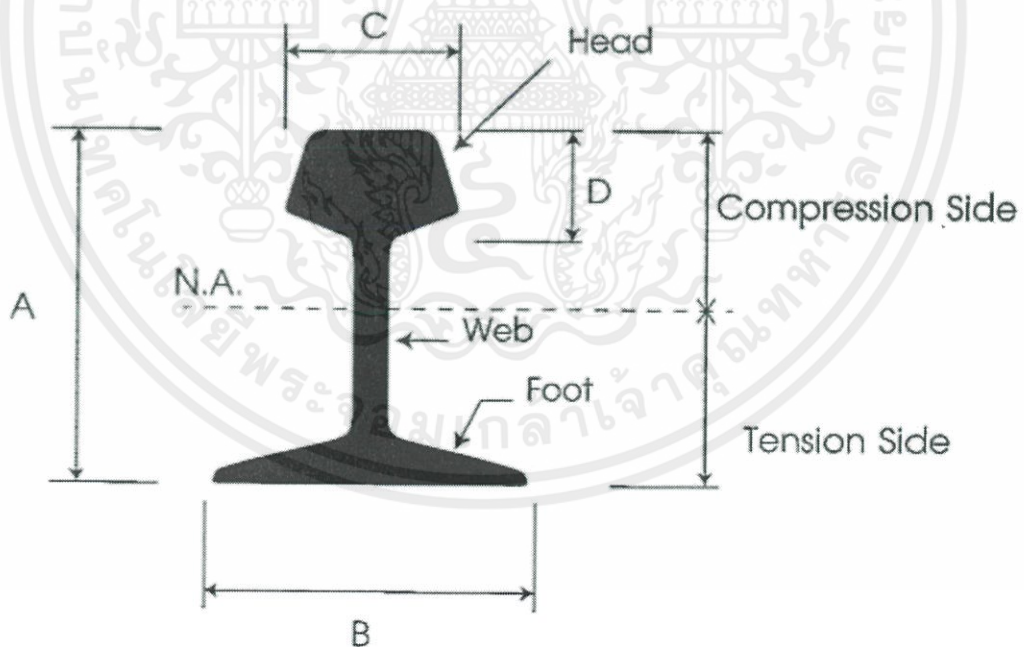
รางรถไฟผลิตจากเหล็กเหนียวรีดร้อนรูปแบบของรางรถไฟ จะมีหน้าตัดคล้ายกับเหล็กรูปพรรณตัวไอ (I) เป็นรูปแบบที่ได้รับการยอมรับการใช้งานด้านเทคนิคและเป็นหน้าตัดรางที่ประหยัด (Economic) ให้ความแกร่ง (Stiffness) และมีความคงทนต่อการใช้งาน (Duracility) รูปโปรไฟล์ (Profile) ของรางจะประกอบไปด้วยส่วนหัวของราง (Head) เหวราง (Web) และฐานราง (Foot) แสดงดังรูป 2.1 รางรถไฟทำหน้าที่ที่สำคัญอยู่สองอย่างคือ รับน้ำหนักจากตัวรถ และทำหน้าที่กำหนดทิศทางในการเคลื่อนที่ของรถไฟ ในสมัยก่อนจะนิยมวางรางลงบนหมอนแล้วใช้ตะปูราง (Dog spike) ตอกลงบนรางเพื่อยึดรางไว้ แต่ในความเป็นจริงรถไฟน้ำหนักมากและวิ่งด้วยความเร็วสูงทำให้ต้องมีการพัฒนาตัวยึดเหนี่ยวรางขึ้นมาใหม่ซึ่งในปัจจุบันจะนิยมใช้เครื่องยึดเหนี่ยวราง (Rail Fastener) แทนการใช้ตะปูราง

ขนาดของราง ขนาดของรางที่ใช้งานจะกำหนดเป็นน้ำหนักของรางต่อความยาวราง เช่น น้ำหนักรางเป็นกิโลกรัมต่อเมตรหรือน้ำหนักเป็นปอนด์ต่อหลา เช่น รางขนาด 100 A ปอนด์ คือหน้าตัดรางตามมาตรฐาน BS. มีน้ำหนัก 100 ปอนด์ ต่อหลา หรือรางขนาด 50N คือหน้าตัดรางตามมาตรฐานญี่ปุ่น (JIS) มีน้ำหนัก 50 กิโลกรัมต่อเมตร

ขนาดน้ำหนักของหน้าตัดรางที่แตกต่างกัน จะให้คุณสมบัติความแข็งแรงรับน้ำหนักได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบคำนวณขนาดของรางที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้งานให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดวัสดุรางจะกำหนด Grade เป็นชนิด A หรือ B เช่น

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าวัสดุของรางชนิด A และ B

ชนิดของราง	คุณสมบัติของราง
ราง 100 A	รางชนิดนี้มีค่า tensile Strength จะขึ้นอยู่กับค่าส่วนผสมของ Carbon (C) ในเนื้อโลหะเป็นตัวแปรหลัก รางชนิด A จะมีคุณสมบัติเชื่อมต่อกันได้ง่าย เหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นรางเชื่อมยาว
ราง 100 B	รางชนิดนี้ ค่า Tensile Strength จะขึ้นอยู่กับค่าส่วนผสมของ Manganese (Mn) ในเนื้อโลหะเป็นตัวแปรหลัก รางชนิด B จะมีคุณสมบัติเชื่อมยากไม่เหมาะนำมาใช้งานเชื่อมต่อกัน แต่ให้ความเหนียวแข็ง (Toughness) สูงกว่ารางชนิด A เหมาะสำหรับใช้เป็นรางสั้น ชนิดที่มีหัวต่อรางที่ใช้งานจะมีค่าความแข็ง (Hardness) สูงมากกว่า 250 HB ขึ้นไป



รูปที่ 2.1 แสดงรูปร่างลักษณะของราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 มาตรฐานราง

มาตรฐานขนาดราง จะมีมาตรฐานที่แตกต่างกัน ตามข้อกำหนดการใช้งานของการรถไฟในแต่ละประเทศ เช่น

UIC. มาตรฐานราง International Union of Railways

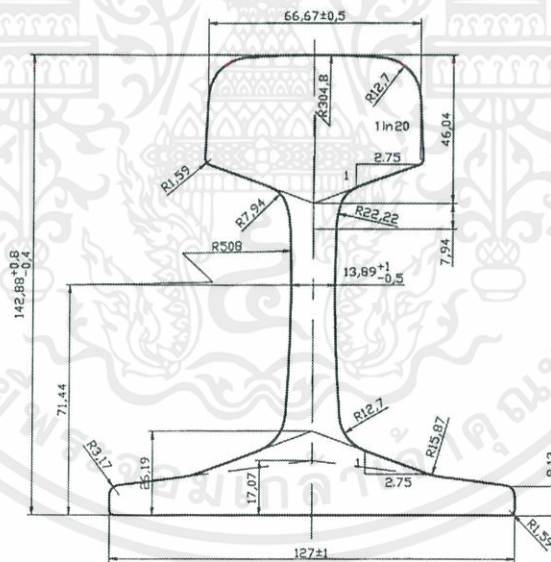
BS. มาตรฐานรางของการรถไฟอังกฤษ

SNCF. มาตรฐานรางของการรถไฟฝรั่งเศส

JNR. มาตรฐานรางของการรถไฟญี่ปุ่น

AREA. มาตรฐานรางของการรถไฟอเมริกา

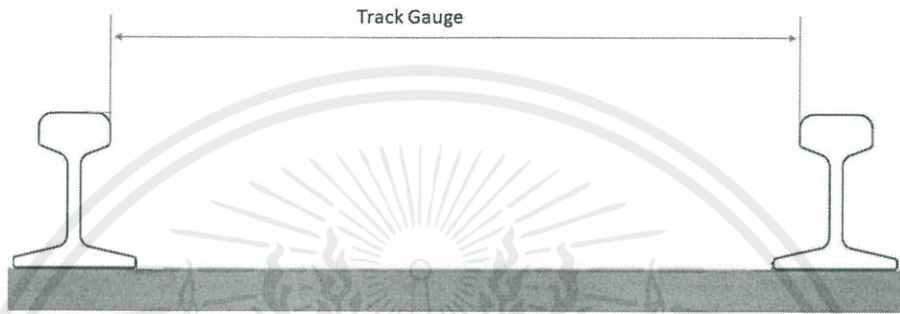
SRT. มาตรฐานรางของการรถไฟแห่งประเทศไทย



รูปที่ 2.2 แสดงมิติสำคัญของรางรถไฟมาตรฐาน UIC ที่รถไฟแอร์พอร์ตลิงค์ใช้

2.2.2 ความกว้างทางรถไฟ (Track gauge)

ระยะห่างระหว่างหัวรางฝั่งหนึ่งไปยังอีกฝั่งหนึ่งเรียกว่าความกว้างทางรถไฟ โดยความกว้างรางมีหลายขนาดด้วยเหตุผลในการสร้างที่แตกต่างกันส่วนใหญ่เป็นเรื่องการเมือง การปกครองและเศรษฐกิจ โดยในเมืองไทยรางรถไฟส่วนใหญ่มีขนาดความกว้างที่เรียกว่า มิเตอร์เกจ ที่มีขนาดความกว้าง 1,000 มม.



รูปที่ 2.3 แสดงความกว้างของทางรถไฟ

ตารางที่ 2.2 แสดงขนาดความกว้างของรางชนิดต่างๆ

ชื่อเรียกความกว้างราง	ขนาดความกว้าง
บอร์ดเกจ (Board Gauge)	ขนาดความกว้างกว่า 1,600 มิลลิเมตร
สแตนดาร์ดเกจ (Standard Gauge)	ขนาดความกว้าง 1,435 มิลลิเมตร
แค็ปเกจ (Cape Gauge)	ขนาดความกว้าง 1,067 มิลลิเมตร
มิเตอร์เกจ (Meter Gauge)	ขนาดความกว้าง 1,000 มิลลิเมตร

ขนาดความกว้าง 1.435 เมตร (4 ฟุต 8-1/2 นิ้ว) มีจำนวนประเทศที่ใช้มากที่สุด เรียกมาตรฐานรางกว้างขนาดนี้ว่า European Standard Gauge (ESG.) บางครั้งก็เรียกอย่างย่อว่า Standard Gauge เป็นรางรถไฟที่กำหนดเป็นมาตรฐานของกลุ่มในประเทศยุโรป เพื่อช่วยให้การดำเนินรถถึงกันกระทำได้โดยสะดวก

ขนาดความกว้าง 1.067 เมตร (3 ฟุต 6 นิ้ว) มีจำนวนประเทศที่ใช้มากเป็นลำดับที่สอง เรียกมาตรฐานรางกว้างขนาดนี้ว่า Caps Gauge มีใช้อยู่กระจายกระจายทั่วโลก โดยเฉพาะประเทศที่เป็นเกาะในทวีปเอเชีย (เช่น ญี่ปุ่น อินโดนีเซีย)เข้าใจว่ารางกว้างขนาดนี้ได้ชื่อมาจากการนำไปใช้ในการสร้างทางรถไฟในสหภาพแอฟริกาใต้

ขนาดความกว้าง 1.00 เมตร (3 ฟุต 3-3/8 นิ้ว) มีจำนวนประเทศที่ใช้มากเป็นลำดับที่สาม เรียกมาตรฐานรางกว้างนี้ว่า Meter Gauge ใช้อยู่ในกลุ่มประเทศเอเชียอาคเนย์ทั้งหมด บางประเทศในแอฟริกา อเมริกาใต้และทางรถไฟสายแยกในยุโรปบางประเทศ

2.2.3 การบำรุงรักษาทางรถไฟ

ทางรถไฟเมื่อผ่านการใช้งานจะถูกแรงกระแทกสะสมจากล้อเป็นเวลานาน ทำให้ทางรถไฟเกิดความเสียหาย เช่น การแตก หลวม หมอนรองรางขยับเคลื่อนตัวได้ ซึ่งภาษาช่างรถไฟเรียกส่วนของที่รถไฟที่คลาดเคลื่อนไปจากค่าปกติว่า “ค่าความคลาดเคลื่อนของทาง หรือ คคค.” (Track Irregularities) ซึ่งหากมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากปกติแล้วจะต้องปรับค่าให้อยู่ในพิสัยเช่นเดิม รางบริเวณทางโค้งจะเกิดการเสียดสีระหว่างบั้งไบล๊อตและรางทำให้หัวรางและรอยเชื่อมถูกล้อ กระแทกเกิดความเสียหาย หัวรางบั้งแบน ประแจสึกหรอ เหล่านี้เป็นภาระในการบำรุงรักษาทางรถไฟให้ได้มาตรฐานรวมถึงการคำนึงถึงความปลอดภัยและความรู้สึกระส่ำระสายของผู้โดยสาร แต่เดิมการตรวจหาความคลาดเคลื่อนของรางจะใช้วิธี แบ่งเจ้าหน้าที่บำรุงรักษาทางออกเป็นช่วงๆ โดยเดินตรวจทุกวัน เรียกว่า Walk the Track เป็นการตรวจดูความเรียบร้อยและความมั่นคงของทางรถไฟด้วยสายตา ส่วนการบำรุงรักษาทางรถไฟในระดับสูงคือ การตรวจบำรุงรักษาตามวาระ โดยการวัดหาความคลาดเคลื่อน และตรวจพิสูจน์ความกว้างของราง

การบำรุงรักษาทางรถไฟในระบบเดิมซึ่งใช้แรงงานคนจะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง ประกอบกับความจำเป็นด้านช่องว่างเวลาที่หน่วยซ่อมสามารถเข้าทำงานซึ่งมีจำกัด ตามปริมาณการเดินรถที่หนาแน่นบนทาง จึงมีการนำเครื่องมือเข้ามาใช้ในการตรวจและบำรุงรักษา การตรวจทางที่ทำได้เร็วคือใช้รถตรวจสภาพทาง (Track Inspection Car) ซึ่งสามารถอ่านค่าความคลาดเคลื่อนของทางรถไฟแล้วเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน (Control Indexes) ส่วนการแก้ไขทางที่เสียนั้นมีการนำเครื่องมือหนักในการบำรุงรักษาทางรถไฟมาช่วยซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาทางรถไฟดีขึ้น เครื่องมือหนักสามารถทำงานได้หลายอย่างและรวดเร็ว เมื่อรถบำรุงทางหนักวิ่ง ผ่านก็จะทำหน้าที่ทุกอย่าง ได้แก่ การล้างหิน จัดแนวทาง เจียรหัวรางและอัดหิน



รูปที่ 2.4 แสดงรถตรวจทางขนาดเล็กสำหรับการนั่งตรวจทางทั่วไป



รูปที่ 2.5 แสดงภาพรถล้างหินโรยทาง

การตรวจตามวาระของการรถไฟแห่งประเทศไทยจะทำการตรวจทุกๆ 6 เดือน แต่ในรถไฟความเร็วสูงจะทำการตรวจทุกวัน โดยส่วนใหญ่จะปิดให้บริการประมาณเที่ยงคืนของวันหลังจากรถขบวนสุดท้ายให้บริการ รถตรวจสภาพทางจะออกทำงาน ในประเทศญี่ปุ่นรถตรวจรางสามารถตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของที่ระยะ 10 เมตร ซึ่งจะเห็นความคลาดเคลื่อนที่จะส่งผลต่อการสันสะเทือนของโบกี้และเพลลา และสามารถตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของที่ระยะ 40 เมตรซึ่งจะเห็นความคลาดเคลื่อนที่ส่งผลถึงตัวรถทั้งคันและผู้โดยสารจะรู้สึกถึงการสั่นในส่วนนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 การเจียร์ราง

การเจียร์หัวราง เพื่อให้รางอยู่รูปทรงโปรไฟล์ที่ถูกต้องและลบรอยคลื่นจากการสึกของรางรถไฟที่เกิดจากการเสียดสีกับล้อ กรณีที่เกิดอาการล้อคั้น(ล้อหมุนฟรีอยู่กับที่) และลบรอยที่เกิดจากการเชื่อมต่อราง เพื่อยืดอายุของรางและลดการสั่นสะเทือนของขบวนรถไฟ



รูปที่ 2.6 แสดงการสึกหรอของราง

สำหรับรางรถไฟฟ้าจะมีการตรวจสอบการสึกหรอทุก 3 เดือนซึ่งเมื่อพบสิ่งผิดปกติก็จะดำเนินการแก้ไขทันที และจะเจียร์รางทุก 6 เดือน เพื่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุดต่อการเดินรถไฟฟ้า เพราะถ้าหากรางวิ้งเกิดชำรุดก็จะทำให้เกิดเสียงดังขณะที่รถไฟฟ้าวิ้งและอาจไม่ปลอดภัยได้ ซึ่งทางหน่วยงานซ่อมบำรุง (รถไฟฟ้าและระบบราง) ได้ทำการตรวจวัดอย่างสม่ำเสมอตามมาตรฐานสากล จึงจำเป็นต้องให้เจ้าหน้าที่วิศวกรที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้านเรื่องเหล็กและการเจียร์รางเป็นพิเศษไว้คอยกำกับดูแลอย่างใกล้ชิด



รูปที่ 2.7 แสดงรถเจียร์รางรุ่นใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

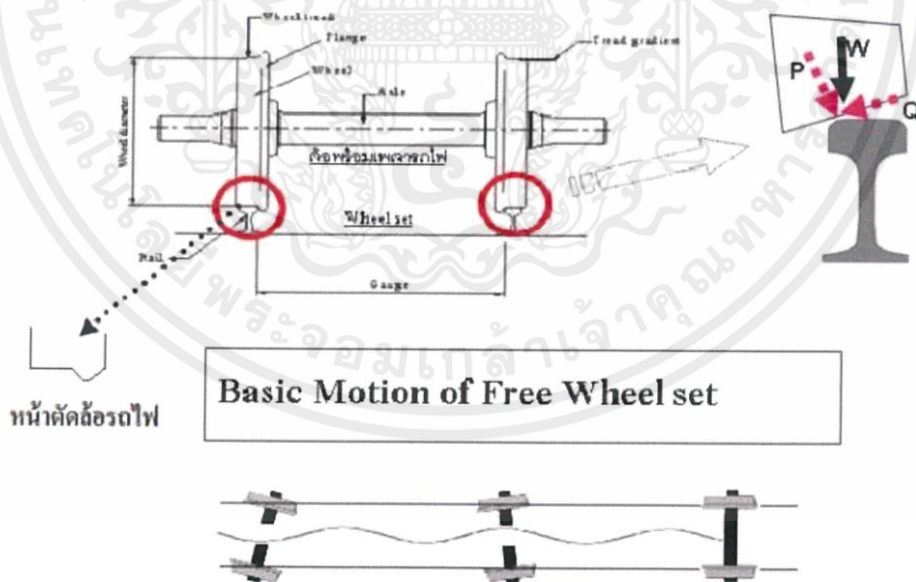
2.3 ล้อรถไฟ [1]

ล้อรถไฟที่ใช้อยู่ในประเทศไทยเป็นแบบ Wheel contour ซึ่งได้ถูกดัดแปลงมาจากประเทศอังกฤษเมื่อ ค.ศ. 2504 โดยหลวงวิฑูรวิธิกุล มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาการตกรางของรถจักรไอน้ำในสมัยนั้น และหลีกเลี่ยงการสึกหรอที่เกิดจากหัวมุมรางกัดโคนบังใบ และใช้มาตรฐานตามแบบอังกฤษคือ BS แต่ในปัจจุบันได้มีการนำล้อมาตรฐาน UIC เข้ามาใช้เนื่องจากง่ายต่อการจัดซื้อ

โครงการระบบขนส่งทางรถไฟเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิและสถานีขนส่งผู้โดยสารอากาศยานในเมือง (Suvarnabhumi Airport Rail Link and City Air Terminal) ได้เลือกใช้ล้อรถไฟตามมาตรฐาน UIC ซึ่งวิ่งด้วยความเร็ว 160 กม./ชม.

ชุดล้อทำหน้าที่ประคองตัวรถให้วิ่งไปตามราง และบังคับไม่ให้รถไฟตกราง ส่วนที่ใช้ในการบังคับไม่ให้ตกรางนั้นเรียกว่าบังใบล้อ (Flange) โดยล้อรถไฟในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นรูปทรงกรวย พื้นล้อเป็นระนาบเอียงเนื่องจากขณะที่รถไฟเข้าโค้งล้อที่วิ่งด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่าจะวิ่งนำหน้าล้อที่วิ่งด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าทำให้รถไฟเกิดการเลี้ยวโค้งได้

พื้นล้อตรงบริเวณที่สัมผัสกับรางจะถูกเรียกว่า เทรด (Thread) เส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดจากจุดสัมผัสเรียกว่าเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ จุดสัมผัส และระยะห่างจากตำแหน่งที่บังใบล้อสัมผัสกับรางด้านข้างไปถึงจุดที่พื้นล้อสัมผัสกับรางเรียกว่า ระยะสายตัว



Sine wave motion || และ Rotating motion ของ Free Wheel Set

รูปที่ 2.8 แสดงการเคลื่อนของชุดล้อ

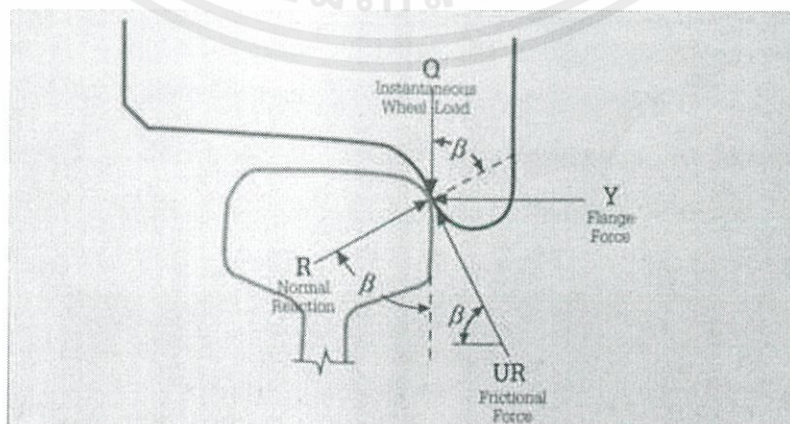
2.3.1 วิธีซ่อมบำรุงล้อ

ล้อรถไฟ เมื่อวิ่งอยู่บนรางเหล็ก ก็ย่อมสึกหรอเป็นของธรรมดา หากไม่มีการตรวจวัดแล้วอาจเกิดเหตุอันตรายรถตกรางได้

นอกจากความสึกหรอที่เกิดกับล้อแล้วยังมีความชำรุดอีกประการหนึ่งที่อาจจะเป็นอันตรายแก่ขบวนรถได้คือ ปลอดภัยหลวม ปลอดภัยแตก กรณีปลอดภัยหลวมสามารถสังเกตได้จากรอยกระจายของคราบน้ำมันหรือสนิมออกมาระหว่างล้อกับแวนล้อ หรือเมื่อสงสัยใช้ช้อนเคาะฟังเสียงความแน่นหรือความหลวมได้ โดยเคาะเปรียบเทียบกับล้อที่ใกล้เคียงหรือสังเกตสีขาที่ทาคาดปลอดภัยว่ามีรอยเลื่อนตัวหรือไม่ ส่วนกรณีปลอดภัยแตกนั้น ความชำรุดนี้จะเห็นได้ชัดสำหรับการแตกที่พื้นล้อเกิดขึ้นได้เพราะล้อได้รับน้ำหนักมากตลอดเวลาใช้งานสัมผัสต่กับรางซึ่งหน้าสัมผัสแคบเป็นสันและกดอยู่ที่จุดเดียวกันจนเกินกำลังที่ล้อจะรับได้หรือแท่งห้ามล้อจับกรอพื้นล้อตลอดเวลาจนเกิดความร้อนสูงทำให้เกิดการขยายตัวไม่สม่ำเสมอหรืออาจจะมีเหตุผสมจากกรรมวิธีทางเทคนิคขณะอบและอัดปลอดภัยด้วย ซึ่งเกิดล้อแตกขึ้นมาภายหลังใช้งานไปได้ระยะหนึ่งได้

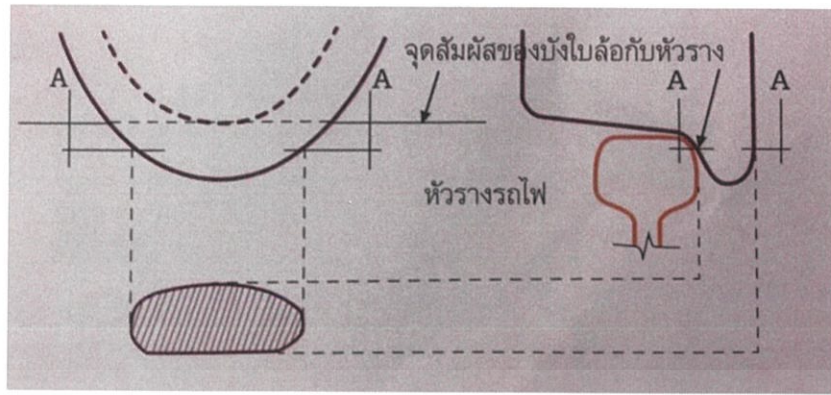
2.4 การสั่นสะเทือนที่เป็นอันตราย [1]

เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ไปด้านหน้าจะเกิดแรงกระแทกกระท่างระหว่างบังใบล้อและหัวรางไปพร้อมกัน การกระแทกจะเกิดขึ้นเนื่องจาก การกระแทกตรงๆ (Zero Angularity Impact) การกระแทกในจังหวะที่ล้อเคลื่อนเข้าปะทะกับราง (Positive Angularity Impact) และการกระแทกในจังหวะจากซึ่งล้อกำลังจะเคลื่อนกลับไปในทิศทางตรงกันข้าม (Negative Angularity Impact) การกระแทกดังกล่าวจะทำให้ล้อและรางสึกหรอไป นอกจากนี้ยังมีแรงที่เกิดจากล้อเคลื่อนที่เข้าปะทะกับรางจะเกิดแรงกระแทก แรงกระแทกดังกล่าวแตกออกเป็นสามกรณีคือ แรงแนวตั้ง แรงในแนวนอน ซึ่งทำให้เกิดผลที่ตามมาสามประการคือ



รูปที่ 2.9 แสดงแนวแรงขณะเกิดการกระแทกกระท่างระหว่างบังใบล้อกับราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

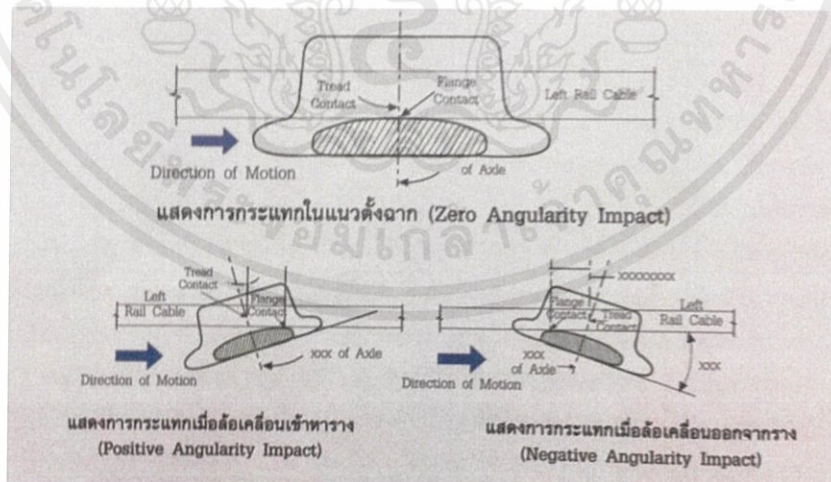


รูปที่ 2.10 แสดงผิวสัมผัสระหว่างบังใบล้อยับหัวรางแนวตัด A-A

ประการแรก แรงในแนวนอน ทำให้เกิดเหตุการณ์ ล้อรถไฟป็นรางและล้อรถไฟกระแทกกับหัวราง ทำให้ความกว้างของรางเกิดความคดเคลื่อนไป ทำให้ตัวรถอาจเกิดการพลิกคว่ำได้ ซึ่งต้องมีการบำรุงรักษา

ประการที่สอง การที่ล้อเคลื่อนเข้ากระแทกหัวรางและหมุนไปพร้อมกัน ทำให้เกิดแรงเฉือน (Creeping Force) ที่ล้อยับรางซึ่งการเกิดซ้ำๆกันจะทำให้ผิวของล้อและรางเกิดรอยร้าวเล็กๆ และอาจเกิดการลุกลามเป็นรอยใหญ่ได้ จึงต้องทำการเจียรรางทิ้งเป็นระยะ

ประการที่สาม คือการสั่นของล้อพร้อมเพลลาและการกระแทกของล้อยับราง การสั่นนี้ควรคำนึงถึงในช่วงแรกของการออกแบบเพื่อคำนึงถึงความสะดวกสบายของผู้โดยสาร ซึ่งได้กำหนดค่ามาตรฐานรองรับไว้ดังนี้



รูปที่ 2.11 แสดงการกระแทกต่างๆ

ตารางที่ 2.3 แสดงค่ามาตรฐาน RI [1]

ค่า RI	ลักษณะอาการ	ความทนทานต่อร่างกายมนุษย์
1	นุ่มนวลดีมาก	เกิน 24 ชั่วโมง
1.5	นุ่มนวลพอดีปานกลาง	เกิน 24 ชั่วโมง
2.0	นุ่มนวลดี	ไม่เกิน 24 ชั่วโมง
2.5	นุ่มนวลเกือบดี	ไม่เกิน 13 ชั่วโมง
3.0	นุ่มนวลพอใช้	ไม่เกิน 5.6 ชั่วโมง
3.5	นุ่มนวลใช้ได้	ไม่เกิน 2.8 ชั่วโมง
4.0	ปล่อยวางได้	ไม่เกิน 1.5 นาที
4.5	ไม่ควรปล่อยวาง	ไม่เกิน 45 นาที

2.5 ความจำเป็นในการรักษามาตรฐานของมิติสำคัญของล้อยและการบำรุงรักษาทางรถไฟ [1]

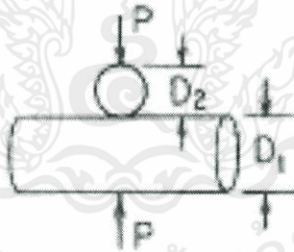
การสึกหรอของบั้งใบล้อ เมื่อประกอบเข้ากับการสึกหรอของหัวรางและการบำรุงรักษาที่ไม่ได้มาตรฐาน จะทำให้ความกว้างของรางเพิ่มมากขึ้น การกระแทกกระหว่างบั้งใบล้อกับหัวรางก็จะมากขึ้นด้วย ส่งผลให้น้ำหนักถ่ายไปอยู่ทางด้านที่ล้อกระแทกกับราง กล่าวก็คืออาจจะเกิดสภาวะล้อเริ่มป็นรางได้

2.6 ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการสั่นของล้อเลื่อนรถไฟ [1]

ปัจจุบันการออกแบบได้มีการพัฒนาและได้ใส่การออกแบบใหม่ๆเข้าไป ได้แก่ มุมเอียงที่บังใบล้อ (Flange Slope) ความลาดเอียงที่พื้นล้อ (Wheel Conicity) การบิดเบี้ยวของตัวรถ (Twist on Vehicle) ระยะว่าง (Clearance) ที่ระบบกับน้ำหนักรถไฟ ความสมบูรณ์ของระบบรับน้ำหนักและโช้คอัพ รูปร่างของหัวราง รัศมีความโค้งของทางรถไฟ ความคลาดเคลื่อนของมิติสำคัญของทางรถไฟ ฯลฯ ซึ่งในทางวิศวกรรมต้องคำนึงถึงการออกแบบในเชิงมิติของการที่อุปกรณ์ยังไม่ได้ใช้งานและการสั่นที่เกิดจากมิติที่อุปกรณ์ผ่านการใช้งานแล้วเป็นค่าสีกหรือที่ยอมเพื่อให้ ซึ่งต้องอยู่ในค่ามาตรฐานความปลอดภัย

2.7 การวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อกับรางด้วยทฤษฎีของเฮิร์ต [4]

ในปี ค.ศ. 1882 เฮิร์ตได้นำเสนอทฤษฎีการสัมผัสของวัตถุสองชิ้น ซึ่งการสัมผัสเป็นแบบไม่สอดรับกัน (non conformal contact) ทฤษฎีของเฮิร์ตเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อหาขนาดและรูปร่างของการสัมผัส สมมุติฐานของเฮิร์ตมีดังนี้ ความเครียดหรือการเสียรูปมีค่าน้อยมาก ไม่มีความเค้นในบริเวณที่ไกลมากจากพื้นที่สัมผัส ไม่มีความเสียดทานบนพื้นผิวของวัตถุทั้งสอง และวัตถุทั้งสองเป็นวัตถุยืดหยุ่นและการเสียรูปในบริเวณพื้นที่สัมผัสเป็นแบบยืดหยุ่น (elastic deformation) การคำนวณหาความเค้นและพื้นที่สัมผัสตามทฤษฎีของเฮิร์ตมีดังนี้



รูปที่ 2.12 แสดงการสัมผัสกันระหว่างทรงกระบอกสองอัน

ตารางที่ 2.4 อัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกระบอก 1 ต่อ ทรงกระบอก 2

D_1/D_2	1	1.5	2	3	4	6	10
α	0.908	1.045	1.158	1.350	1.505	1.767	2.175
β	0.908	0.799	0.732	0.651	0.602	0.544	0.481
λ	0.825	0.818	0.804	0.774	0.747	0.702	0.641

จากรูป 2.12 ทำการคำนวณหาความเค้นที่กระจายบนผิวสัมผัสระหว่างวัตถุที่มีพื้นผิวโค้งโดยใช้ใช้ทฤษฎี Hertz Contact โดยคำนวณแบบ Cylinder on a cylinder: axes at right angles และตาราง 2.2 แสดงอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานทั้ง 2 ที่สัมผัสกัน ทำการคำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างหน้าสัมผัสตามดังนี้

$$C_E = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (2.1)$$

ทำการหาค่า C_E จาก (2.1) โดยค่า ν_1 คือ Poisson's Ratio ของราง, ν_2 คือ Poisson's Ratio ของล้อ, E_1 คือค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นของราง, E_2 คือค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นของล้อ

ทำการคำนวณหาขนาดพื้นที่หน้าสัมผัสโค้งแกนหลักครึ่งแกน (C) ตามสมการ (2.2)

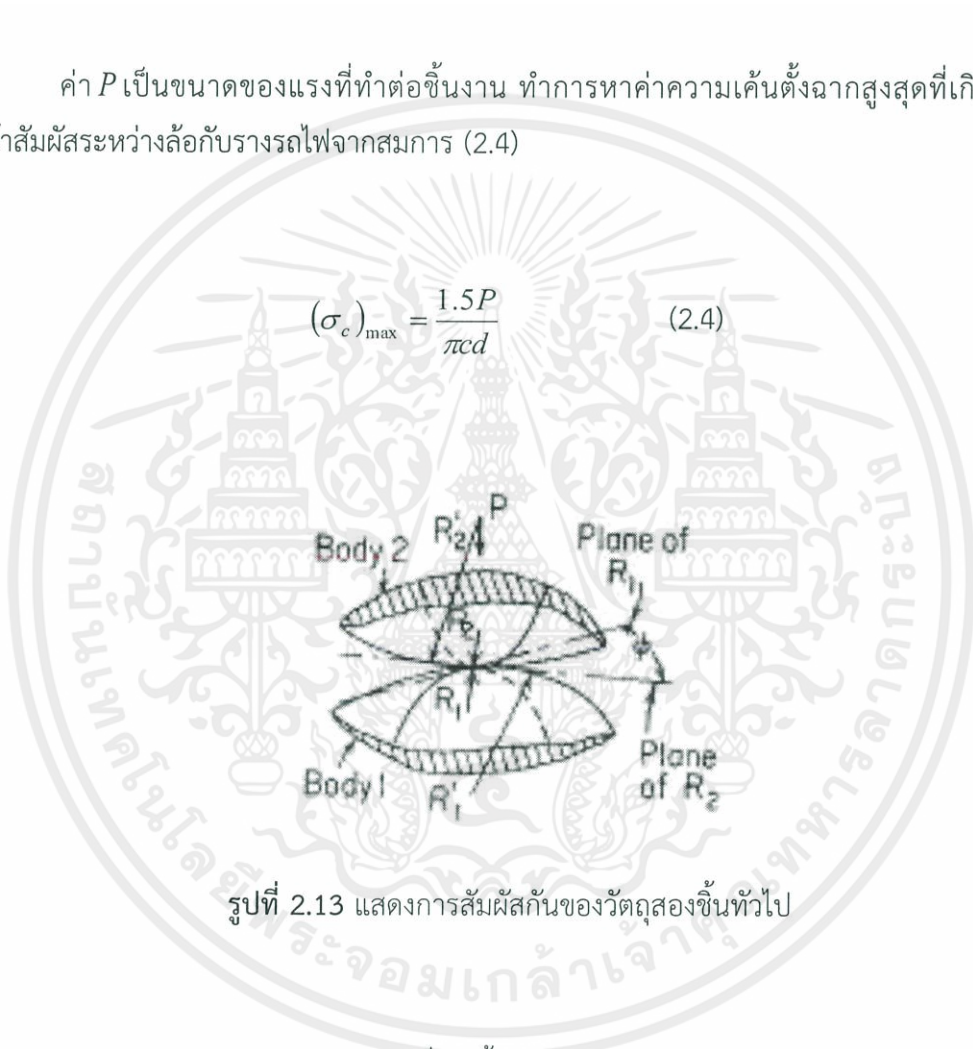
$$c = \alpha^3 \sqrt{PK_D C_E} \quad (2.2)$$

ทำการหาค่า c คือค่าขนาดพื้นที่หน้าสัมผัสโค้งแกนหลักครึ่งแกน, $K_D = (D_1 D_2 / D_1 + D_2)$
ทำการหาขนาดพื้นที่หน้าสัมผัสโค้งแกนรองครึ่งแกน (d) ตามสมการ (2.3)

$$d = \beta^3 \sqrt{PK_D C_E} \quad (2.3)$$

ค่า P เป็นขนาดของแรงที่ทำต่อชิ้นงาน ทำการหาค่าความเค้นตึงฉากสูงสุดที่เกิดขึ้นบน
หน้าสัมผัสระหว่างล้อกับรางรถไฟจากสมการ (2.4)

$$(\sigma_c)_{\max} = \frac{1.5P}{\pi cd} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.13 แสดงการสัมผัสกันของวัตถุสองชิ้นทั่วไป

จากรูป 2.13 ทำการคำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นแบบ General case of two bodies in contact
ทำการคำนวณค่า K_D จากสมการ (2.5) ดังนี้

$$K_D = \frac{1.5}{1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_1' + 1/R_2'} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งสัมผัสที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุดของรัศมีความโค้งของ R_1 และ R_1' ของชิ้นงาน 1, และ R_2 และ R_2' ของชิ้นงาน 2 ทำการคำนวณหาค่าขนาดพื้นที่หน้าสัมผัสโค้งแกนหลักครึ่งแกน (c) กับขนาดพื้นที่หน้าสัมผัสโค้งแกนรองครึ่งแกน (d) ตามสมการ (2.2) กับ (2.3) และทำการคำนวณค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนหน้าสัมผัสระหว่างล้อกับรางรถไฟตามสมการ (2.4)

โดยในการคำนวณแบบ General case of two bodies in contact ค่า α , β และ λ ที่ใช้ในการคำนวณสามารถหาได้จากตาราง 2.3



ตารางที่ 2.5 แสดงค่า α , β และ λ

$\cos\theta$	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
α	1.000	1.070	1.150	1.242	1.351	1.486
β	1.000	0.936	0.878	0.822	0.769	0.717
λ	0.750	0.748	0.743	0.734	0.721	0.703

$\cos\theta$	0.60	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
α	1.661	1.905	2.072	2.292	2.600	3.093
β	0.664	0.608	0.578	0.544	0.507	0.461
λ	0.678	0.644	0.622	0.594	0.559	0.510

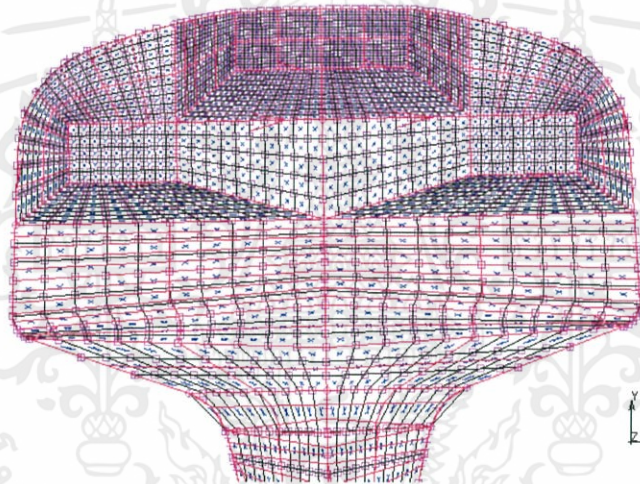
$\cos\theta$	0.92	0.94	0.96	0.98	0.99
α	3.396	3.824	4.508	5.937	7.774
β	0.438	0.412	0.378	0.328	0.287
λ	0.484	0.452	0.410	0.345	0.288

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หรือที่เรียกย่อๆว่า FEM คือเทคนิควิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับการแก้ปัญหาการคำนวณตัวเลขทางฟิสิกส์หรือทางวิศวกรรม รูปแบบปัญหาที่เราสนใจทางวิศวกรรมและฟิสิกส์คณิตศาสตร์สามารถแก้ปัญหาคือได้โดยใช้การวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย การวิเคราะห์ทางโครงสร้าง, การถ่ายเทความร้อน, อัตราของไหล, การเคลื่อนที่ของมวลและความสามารถทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยรูปแบบปัญหาคือ การหาฟังก์ชันการกระจายตัวของตัวแปรในระบบสามมิติ ซึ่งปัญหาแต่ละอันจะสามารถอธิบายด้วย Differential equation/Integral equation

วิธีการของ Finite Element Method โดเมนของโครงสร้างถูกแบ่งย่อยเป็นองค์ประกอบย่อยที่มีรูปร่างอย่างง่ายขนาดเล็ก องค์ประกอบย่อยนี้จะถูกเรียกเป็น “element” ในแต่ละ element การกระจายตัวของตัวแปรที่เราสนใจนั้น จะมีค่าต่างกันตามตำแหน่งซึ่งจากรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงรูปร่างเอลิเมนต์และเมชของราง

ในงานวิจัยนี้เราได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำการวิเคราะห์ความเสียหายของรางที่เกิดขึ้นจากแรงกดที่เกิดจากการสัมผัสของล้อรถไฟที่วิ่งบนราง ทำให้เราทราบตำแหน่งของรางที่เกิดความเสียหายและนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ โดยการวิเคราะห์ทางระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทดสอบนี้เราทำการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ เพื่อจำลองบริเวณที่เกิดความล้าบนตำแหน่งผิวรางที่สามารถเกิดความเสียหาย

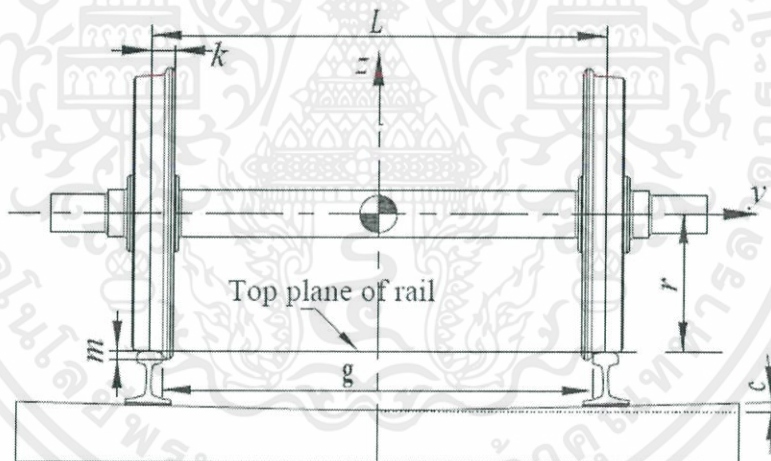
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 บทนำ

การศึกษาความเค้นที่เกิดจากการสัมผัสกันระหว่างล้อและราง ที่นักวิจัยท่านอื่นได้ศึกษามาก่อนถือเป็นองค์ความรู้เริ่มต้นของงานวิจัยนี้ ซึ่งวิธีการศึกษาการวิเคราะห์นั้นได้มีการปรับปรุงมาอย่างต่อเนื่อง โดยการนำเทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์มาช่วยจำลอง และเปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎี ดังนั้นหัวข้อนี้จะเป็นการทบทวนวรรณกรรม และการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อและราง

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2015 Ismail Esen และ Mustafa Eroglu [2] ได้ศึกษาการวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อและรางในรูปแบบสามมิติโดยใช้ระเบียบทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยศึกษาในกรณีการวิเคราะห์แบบสถิตย์ ทำให้ทราบถึงการกระจายตัวของความเค้นบริเวณจุดสัมผัส และการวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นของฮีรต์เหล่านี้ถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานของงานวิจัยนี้

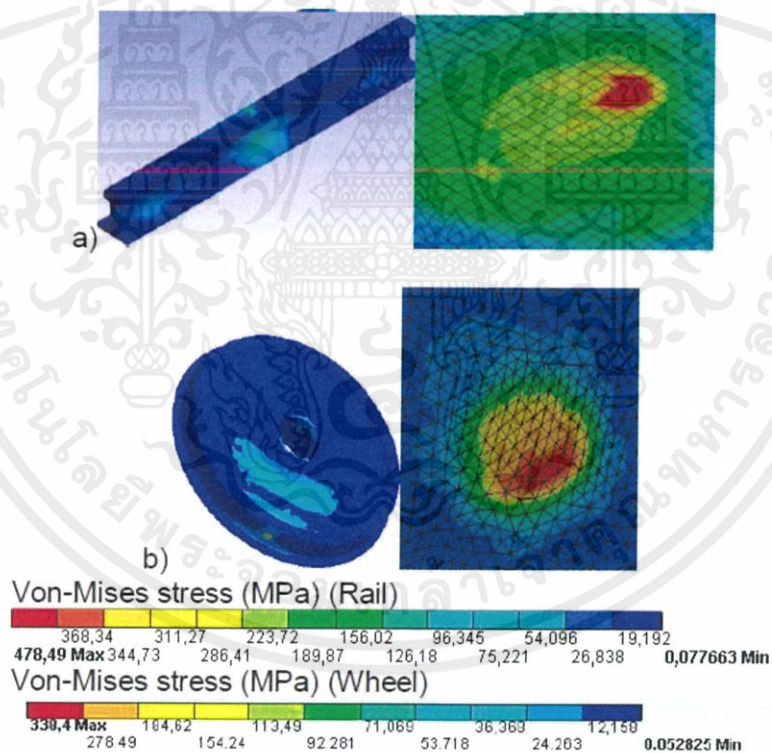


รูปที่ 2.15 แสดงตำแหน่งของชุดล้อบริเวณกึ่งกลางราง

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

Parameter	Value
Gauge (g)	1435 mm
Cant Angle (c)	1:40
Distance between contact point (L)	1500 mm
Wheel Radius (r)	460 mm (new), 420 mm (worn)
Distance of contact point (k)	70 mm
Distance between contact point and flange (m)	14 mm

จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดของแบบจำลอง 179458 เอลิเมนต์ และ 220970 เอลิเมนต์ ของล้อ และรางตามลำดับ จำนวนโหนดทั้งหมด 126261 โหนด และ 176896 โหนด ของล้อและรางตามลำดับ

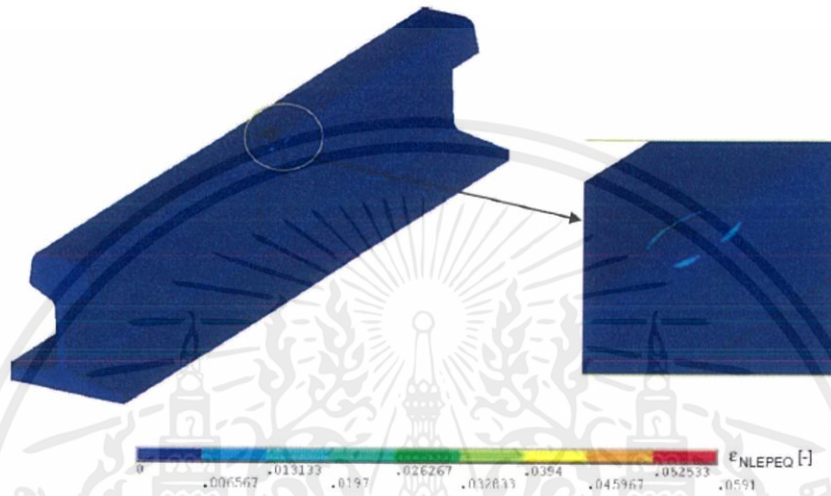


รูปที่ 2.16 แสดงผลจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

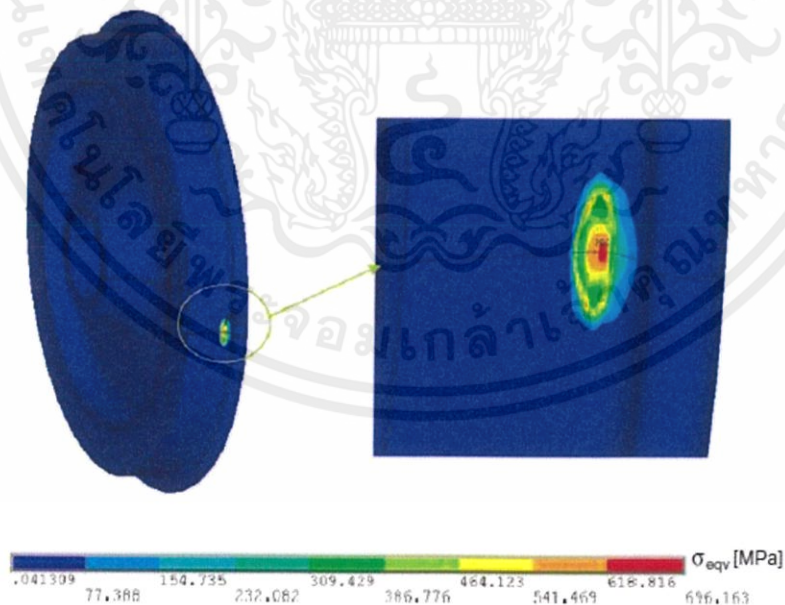
ผลจากการวิจัยของเขาทำให้ทราบถึงการกระจายตัวของความเค้นในล้อและราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ. 2010 Mehmet Ali Arslan และ Oğuz Kayabaşı [3] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อและรางในรูปแบบสามมิติโดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาการกระจายตัวของความเค้นซึ่งเป็นต้นเหตุของการเสียหายของล้อและราง โดยใช้ทฤษฎีของเฮิร์ทในการอ้างอิงในงานวิจัยของเขา จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดที่ใช้คือ 116871 เอลิเมนต์และ 126393 โหนด โดยกำหนดแรงที่กระทำต่อล้อคือ 80 ตัน แรงเสียดทานที่ใช้คือ 0.3

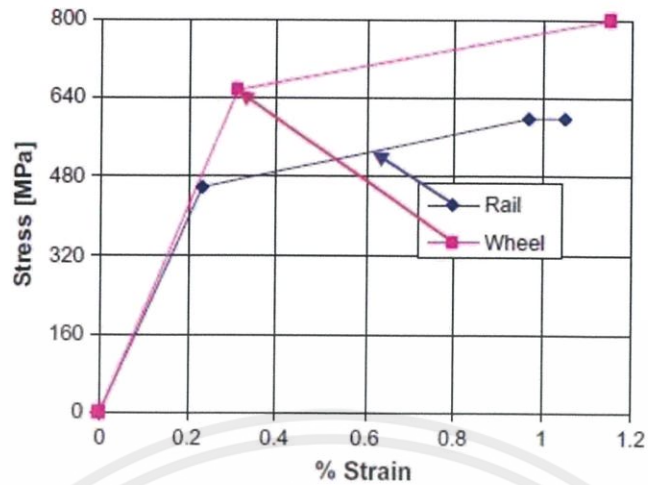


รูปที่ 2.17 แสดงการวิเคราะห์ของราง



รูปที่ 2.18 แสดงการวิเคราะห์ของล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แสดงกราฟพล็อตระหว่าง stress และ strain ของวัสดุล้อและราง

ผลจากงานวิจัยของเขาทำให้ทราบว่า ความเค้นมีค่าสูงสุดบริเวณที่ล้อสัมผัสกับรางและในบริเวณที่ห่างออกไปจากจุดสัมผัสถือว่าไม่มีความเค้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

ในการศึกษาและดำเนินการวิจัยในหัวข้อเรื่อง “การวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางหลังการเจียรรางในรูปแบบสามมิติโดยใช้ระเบียบทางไฟไนต์เอลิเมนต์” โดยขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

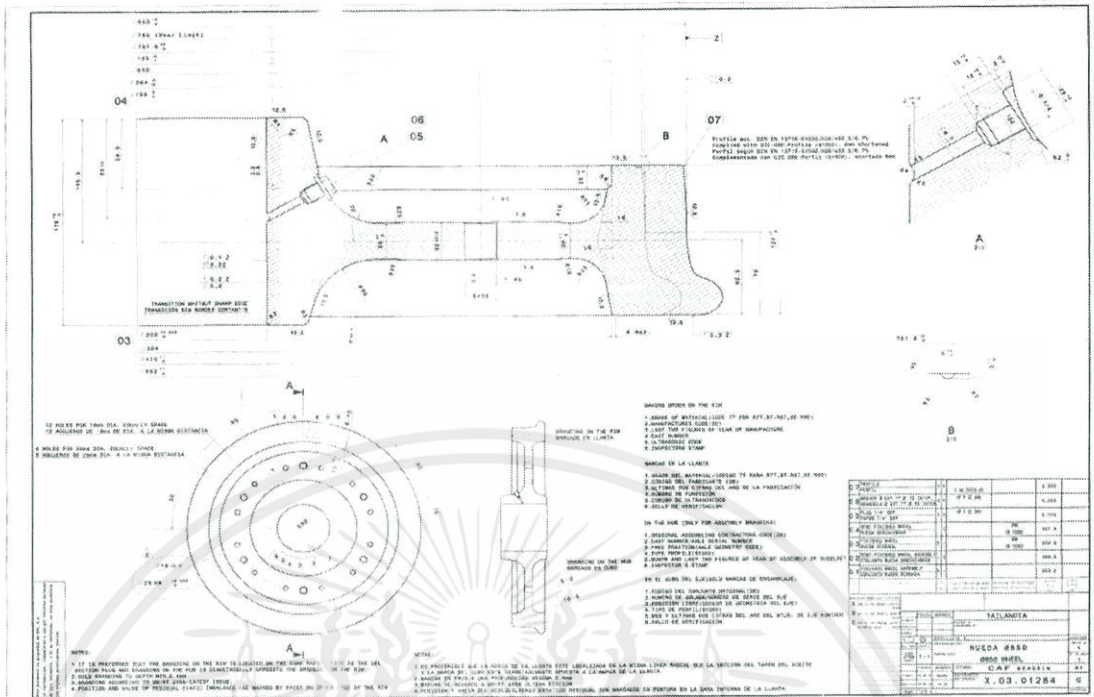
1. ศึกษาวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องตลอดจนแนวคิดและจุดประสงค์ของการวิจัย
2. จัดเตรียมข้อมูล และศึกษาวิธีการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์
3. ออกแบบล้อและรางให้ตรงตามรูปร่างและคุณลักษณะตามแบบของโครงการระบบขนส่งทางรถไฟเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิและสถานีขนส่งผู้โดยสารอากาศยานในเมือง (Suvarnabhumi Airport Rail Link and City Air Terminal)
4. ทำการวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อและรางโดยใช้ระเบียบทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปรียบกับการวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎี Hertz Contact
5. ทำการวิเคราะห์ บันทึกข้อมูล และสรุปผลของการวิจัย

3.2 แบบจำลองของล้อและราง

จุดประสงค์ในการทดลอง เพื่อศึกษาการกระจายตัวของความเค้นในสภาวะก่อนและหลังเจียรราง ซึ่งผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลลักษณะและคุณสมบัติของล้อและรางจากโครงการระบบขนส่งทางรถไฟเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิและสถานีขนส่งผู้โดยสารอากาศยานในเมือง (Suvarnabhumi Airport Rail Link and City Air Terminal) ดังนี้

3.2.1 คุณสมบัติของล้อรถไฟ รุ่น EN13262

ล้อรถไฟรหัส EN13262 ER8 เป็นล้อที่ทางโครงการระบบขนส่งทางรถไฟเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิและสถานีขนส่งผู้โดยสารอากาศยานในเมือง (Suvarnabhumi Airport Rail Link and City Air Terminal) เลือกใช้



ภาพที่ 3.1 ลักษณะทางกายภาพของล้อทึบ EN13262 ER8

3.1 Chemical composition

3.1.1 Values to be achieved

The maximum percentages of the various specified elements are given in Table 1.

Table 1 — Maximum percentages of the various specified elements

Steel grade	Maximum content in % ^a										
	C	Si	Mn	P ^b	S ^{b,c}	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Cr + Mo + Ni
ER6	0,48	0,40	0,75	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50
ER7	0,52	0,40	0,80	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50
ER8	0,56	0,40	0,80	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50
ER9	0,60	0,40	0,80	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50

^a For special applications, variations within the maximum limit of these values may be agreed.
^b A maximum phosphorus content of 0,025% may be agreed at the time of enquiry and the order.
^c A minimum sulfur content may be agreed at the time of enquiry and the order according to the steelmaking process in order to safeguard against hydrogen cracking.

ภาพที่ 3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุในการสร้างล้อทึบ EN13262 ER8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าคุณสมบัติวัสดุของรางชนิดต่างๆ

ชนิดของราง	ค่าคุณสมบัติวัสดุ
UIC 60E1/Grade260 standard	<p>Manufacturing Standard :EN 13674-1</p> <p>Chemistry (%)</p> <p>C: 0.60-0.82 Si:0.13-0.60 Mn:0.65-1.25 S/P:0.040 Max</p> <p>Mechanical Properties</p> <p>Tensile strength \geq 880 Mpa</p> <p>Elongation \geq 10%</p> <p>Hardness : 260 – 330 HB</p> <p>Non-Metal inclusion test (Type A \leq2.5 , Type B\leq 2.0 , Type C\leq 2.0 , Type D \leq 2.0)</p> <p>Shall be carried out as per ASTM standard.</p>
UIC 60E1 Grade 350 HT-Rails	<p>Manufacturing Standard :EN 13674-1</p> <p>Chemistry (%)</p> <p>C: 0.70-0.82 ; Si:0.13-0.60 ; Mn: 0.65-1.25 S/P: 0.030 MAX V:0.12 Max</p> <p>Mechanical Properties</p> <p>Tensile strength : \geq 1180 Mpa</p> <p>Elongation : \geq 9 %</p> <p>Hardness : 350 -390 HB</p> <p>The dept of hardness shall be 20 mm min</p> <p>Non-metal inclusion test ((Type A \leq2.5 , Type B\leq 2.0 , Type C\leq 2.0 , Type D \leq 2.0)</p> <p>Shall be carried out as per ASTM standard .</p>

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

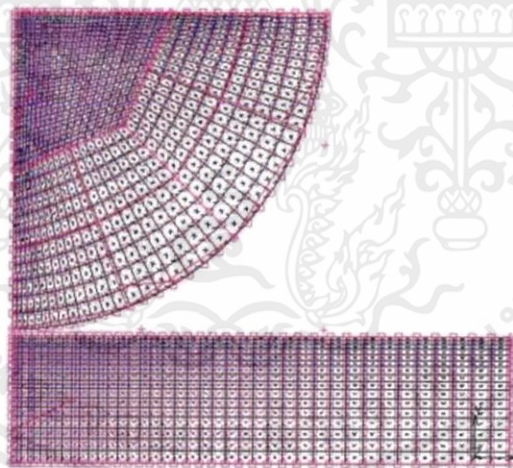
3.3.1 ทำการวิเคราะห์การสัมผัสกันของล้อและรางในพิกัดสองมิติโดยใช้โปรแกรม Marc mentat เพื่อให้ผู้เขียนมีความเข้าใจและสามารถตรวจสอบการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ว่ามีความเชื่อถือได้หรือไม่ โดยค่าเงื่อนไขขอบเขตและโหลดที่กระทำได้ข้อมูลมาจากโครงการระบบขนส่งทางรถไฟเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิและสถานีขนส่งผู้โดยสารอากาศยานในเมือง (Suvarnabhumi Airport Rail Link and City Air Terminal) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Hertz contact problem
Problem	
Geometry	<p>Cylinder of length $L \gg D$, $p = P/L$ $K_D = D$</p>
Material properties	$E = 30 \times 10^6$ Psi, $\nu = 0.3$ for steel and $E = 10 \times 10^6$ Psi, $\nu = 0.33$ for Al
Analysis type	Static with elastic material behavior
Boundary conditions	Symmetry with point load pushing cylinder into block
Element type	Linear and parabolic plane strain quads
FE results	

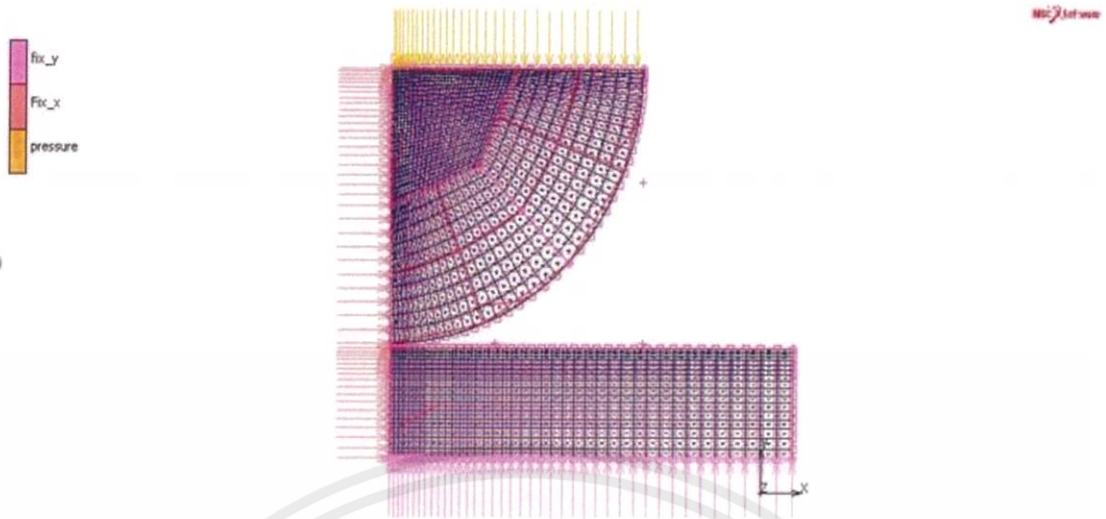
ภาพที่ 3.4 แสดงเงื่อนไขเริ่มต้นในการวิเคราะห์การสัมผัสกัน

3.3.1.1 ทำการวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อและรางในพิกัดสองมิติ โดยการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นพิจารณาล้อเป็นแบบ Mesh Deforming

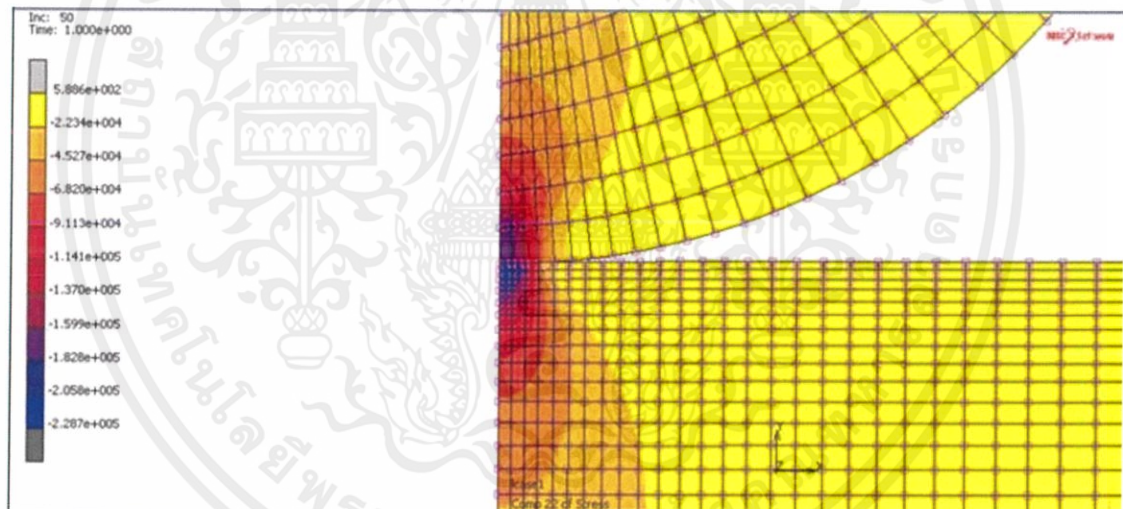


ภาพที่ 3.5 แสดงการวิเคราะห์โดยใช้เงื่อนไขเริ่มต้นของล้อเป็นแบบ Mesh Deforming

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



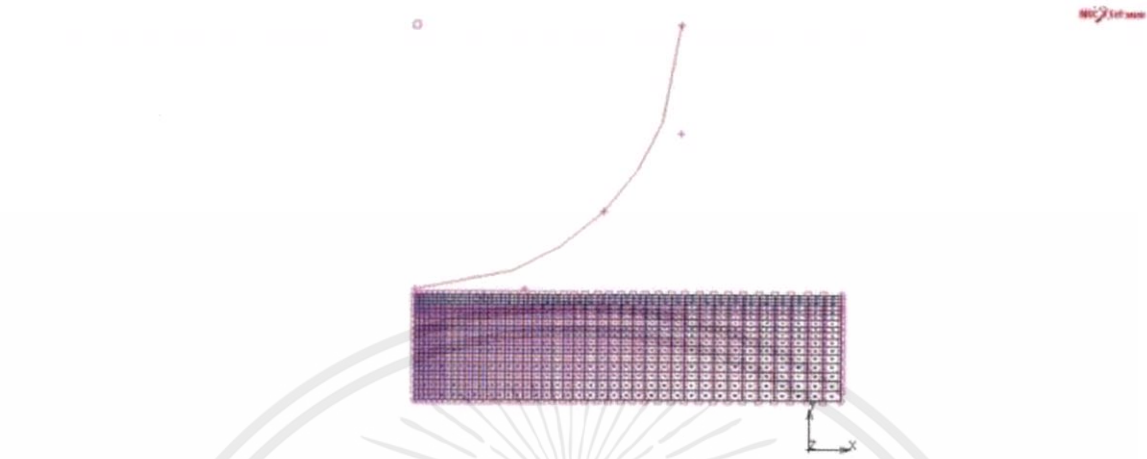
ภาพที่ 3.6 แสดงการfix displacement ของการวิเคราะห์แบบ Mesh Deforming



ภาพที่ 3.7 แสดงผลลัพธ์ของการวิเคราะห์การสัมผัสกันแบบ Mesh Deforming

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

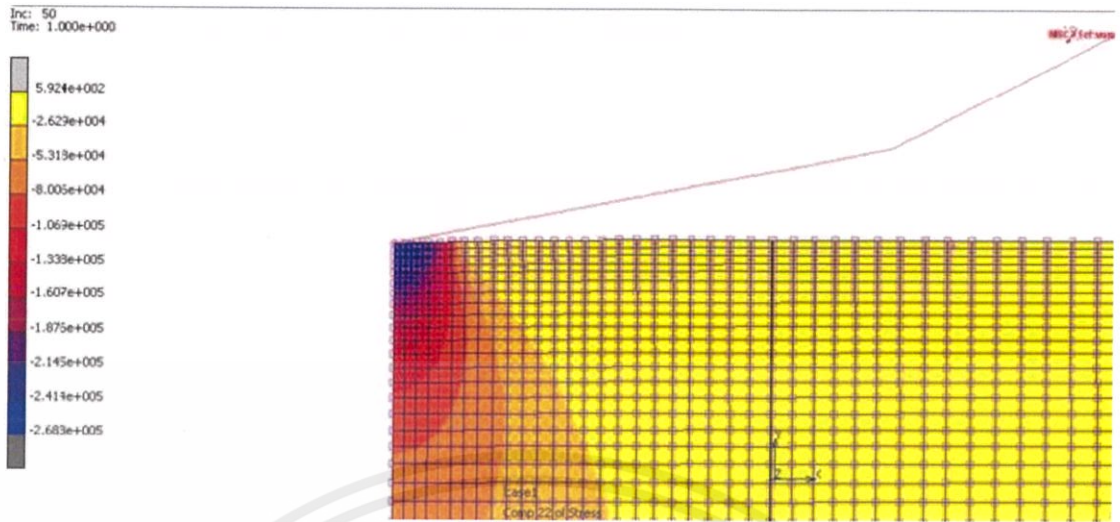
3.3.1.2 ทำการวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อและรางในพิกัดสองมิติ โดยการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นพิจารณาล้อเป็นแบบ Rigid body



ภาพที่ 3.8 แสดงการวิเคราะห์ที่ใช้เงื่อนไขเริ่มต้นของล้อเป็นแบบ Rigid body



ภาพที่ 3.9 แสดงการ fix displacement ของการวิเคราะห์ล้อแบบ Rigid body

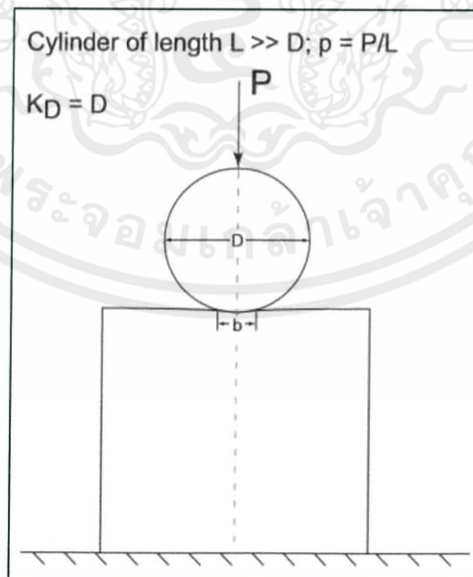


ภาพที่ 3.10 แสดงผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ล้อยแบบ Rigid body

3.3.2 ทำการวิเคราะห์การสัมผัสกันของล้อและรางในพิกัดสองมิติโดยใช้ทฤษฎีการสัมผัสกันของ Hertz contact โดยใช้ข้อมูลในการวิเคราะห์จากโครงการระบบขนส่งทางรถไฟเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิและสถานีขนส่งผู้โดยสารอากาศยานในเมือง (Suvarnabhumi Airport Rail Link and City Air Terminal)

จากหนังสือ Roark's Formulas for Stress and Strain (by Warren C. Young, 1989 , pg 651)

[4] สามารถหาค่าความเค้นสูงสุดได้จาก



ภาพที่ 3.11 แสดงการคำนวณหาค่าความเค้นสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Where } C_E = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$$

$$\text{ค่าความเค้นสูงสุด (Max } \sigma) = 0.798 \sqrt{\frac{p}{K_D C_E}}$$

3.3.2.1 การวิเคราะห์การสัมผัสกันโดยใช้ทฤษฎี Hertz contact ในกรณีที่ล้อเป็นแบบ Mesh Deforming

$$p = 10^5 \text{ psi}$$

$$K_D = D = 10 \text{ in}$$

$$C_E = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} = \frac{1-0.3^2}{3 \times 10^7} + \frac{1-0.33^2}{10^7} = 1.194 \times 10^{-7}$$

$$\text{Max } \sigma = 0.798 \sqrt{\frac{p}{K_D C_E}} = 0.798 \sqrt{\frac{10^5}{10 \times 1.194 \times 10^{-7}}} = 230.9 \text{ ksi}$$

3.3.2.2 การวิเคราะห์การสัมผัสกันโดยใช้ทฤษฎี Hertz contact ในกรณีที่ล้อเป็นแบบ Rigid body

$$p = 10^5 \text{ psi}$$

$$K_D = D = 10 \text{ in}$$

$$C_E = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} = \frac{1-0.33^2}{10^7} + 0 = 8.911 \times 10^{-8}$$

$$\text{Max } \sigma = 0.798 \sqrt{\frac{p}{K_D C_E}} = 0.798 \sqrt{\frac{10^5}{10 \times 8.911 \times 10^{-8}}} = 267.325 \text{ ksi}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การพิสูจน์ความถูกต้อง

การพิสูจน์ความถูกต้องของการวิเคราะห์นั้นเป็นขั้นตอนสำคัญในการดูความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง ในงานวิจัยนี้จะนำการวิเคราะห์โดยระเบียบทางไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีการสัมผัสกันของวัตถุสองชนิด Hertz contact theory

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าการคำนวณระหว่างการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และการคำนวณด้วย Hertz contact

	Quard4 (Mesh 16x40)		Quard8(Mesh 16x40)		Quard4 (Mesh 32x80)		Quard8(Mesh 32x80)	
	2 Deforming 10 ⁴ psi	Rigid 10 ⁵ lb	2 Deforming 10 ⁴ psi	Rigid 10 ⁵ lb	2 Deforming 10 ⁴ psi	Rigid 10 ⁵ lb	2 Deforming 10 ⁴ psi	Rigid 10 ⁵ lb
FEA	228 ksi	268.3 ksi	280 ksi	261.4 ksi	240 ksi	268 ksi	266 ksi	268 ksi
Theory	230.9 ksi	267.325 ksi	230.9 ksi	267.325 ksi	230.9 ksi	267.325 ksi	230.9 ksi	267.325 ksi
File name	Hertz_2710_16	Hertz_Curve	Hertz_2710_16	Hertz_2DQuard	Hertz_271016_3_2_80	Hertz_Curve_3_2_80	Hertz_271016	Hertz_2DQuard

3.3.4 การวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางหลังการเจียรรางในรูปแบบสองมิติโดยใช้ระเบียบทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าเชิงกลของวัสดุจำลองของราง

รายการคุณสมบัติของวัสดุ	ค่าสมบัติของวัสดุ
Modulus of elasticity; E	207 Gpa
Yield stress; σ_y	483 Gpa
Poisson's ratio; ν	0.3

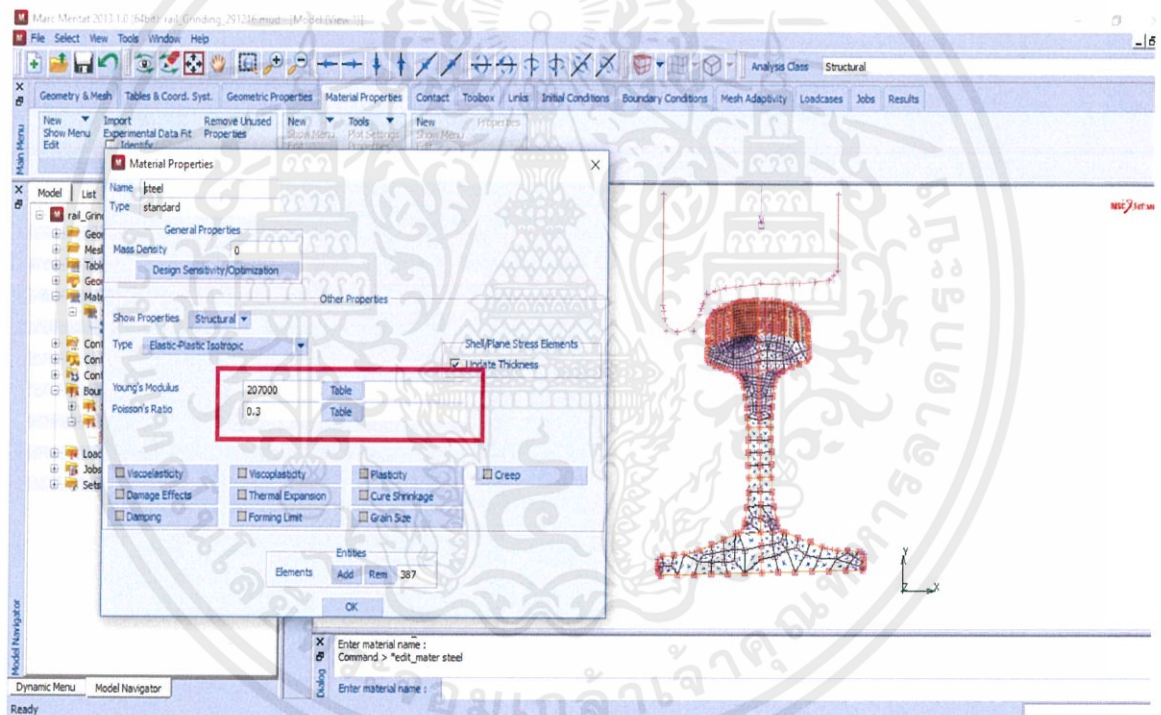
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าที่สำคัญของชุดล้อและราง

Parameter	Value
Gauge (g)	1435 mm.
Cant angle (c)	1:40
Wheel radius	850 mm.
Load	100000 N.

3.3.4.1 การกำหนดวัสดุให้แบบจำลอง

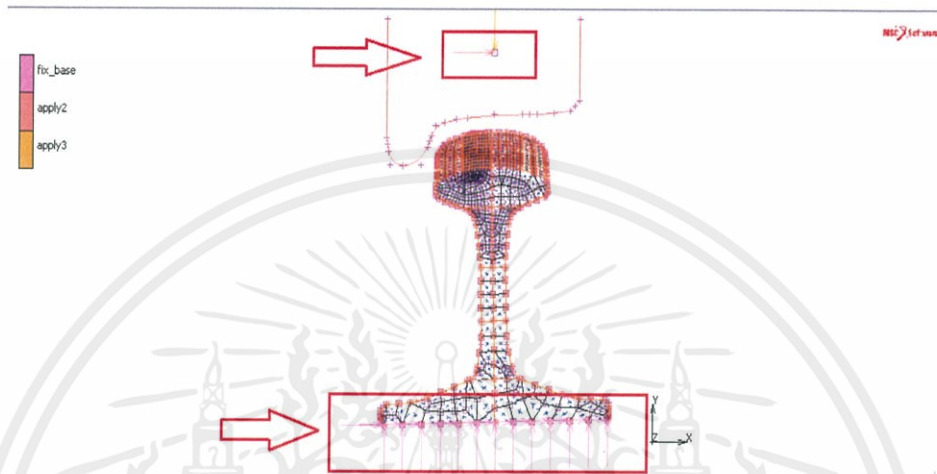
การกำหนดวัสดุให้แบบจำลองจะพิจารณาให้ล้อเป็นวัสดุแข็งเกร็งและรางเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นเพื่อศึกษาการกระจายตัวของความเค้นภายในรางของการสัมผัสกันระหว่างล้อและราง



ภาพที่ 3.12 แสดงการกำหนดค่าวัสดุด้วยโปรแกรม Marc mentat

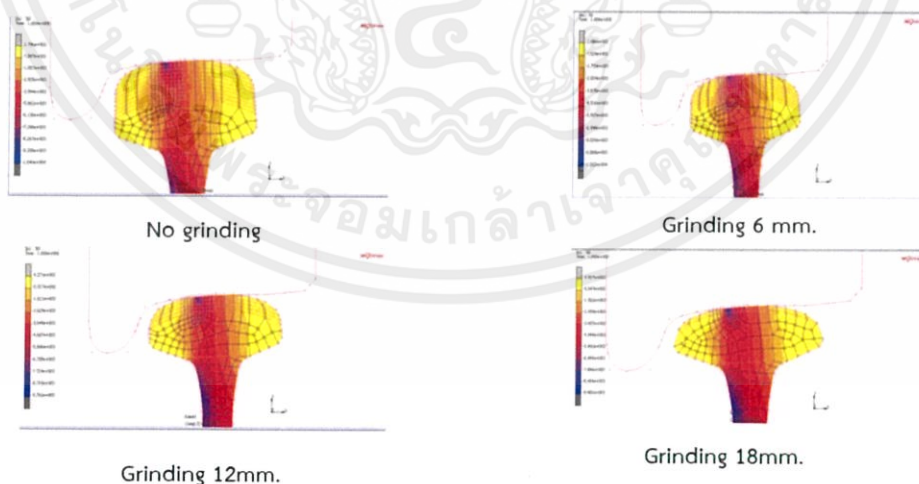
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้แบบจำลองการวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อและรางหลักการเจียรรางในรูปแบบสองมิติโดยใช้ระเบียบทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จะกำหนดให้บริเวณฐานรางจะไม่มีเคลื่อนที่ในแนวแกน x และ y และจะทำการสร้างโหนดขึ้นมาหนึ่งโหนดบริเวณกึ่งกลางล้อเพื่อกำหนดให้โหนดตัวนั้นเป็นตัวส่งผ่านแรงให้ล้อแทนแรงที่ล้อกระทำกับราง (point load) และจะทำการกำหนดให้โหนดตัวนั้นไม่มีการเคลื่อนที่แนวแกน x



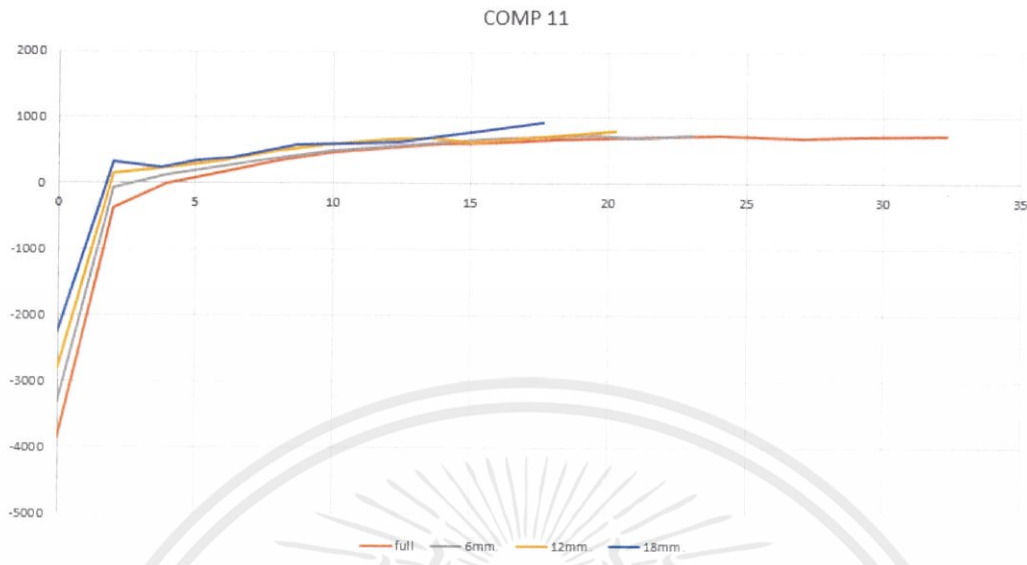
ภาพที่ 3.13 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตด้วยโปรแกรม Marc mentat

3.3.4.3 ทำการวิเคราะห์การเจียรรางทั้งหมดสามระดับ คือ 6 mm., 12mm. และ 18mm. โดยการกำหนดค่าวัสดุและกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้แบบจำลองตามที่ได้อธิบายมาข้างต้น

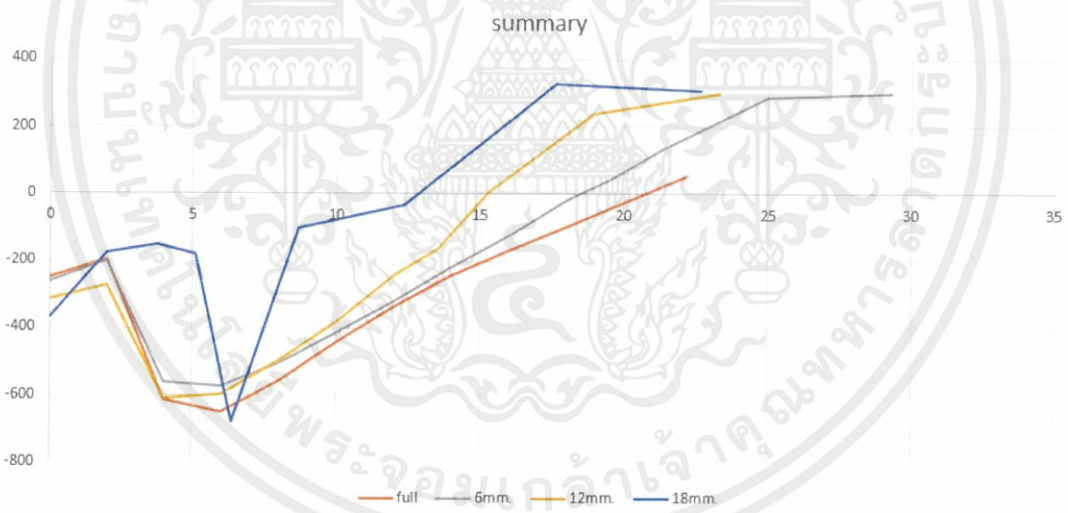


ภาพที่ 3.14 แสดงการวิเคราะห์การเจียรรางในสามระดับด้วยโปรแกรม Marc mentat

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

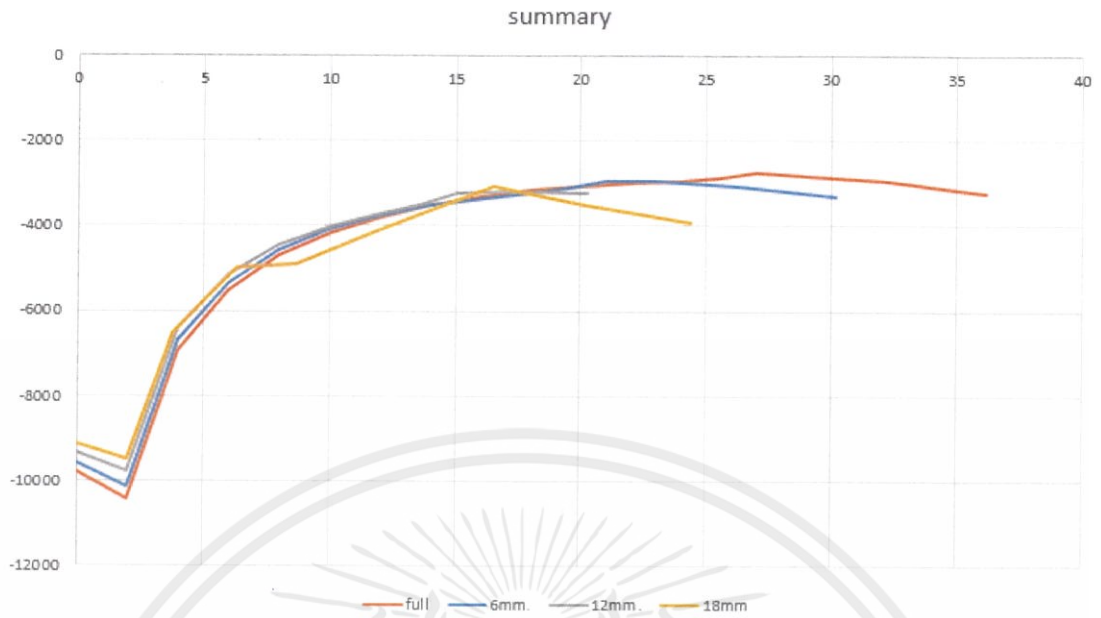


ภาพที่ 3.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ σ_{11} และ arc length ในการเจียร์รางสามระดับ

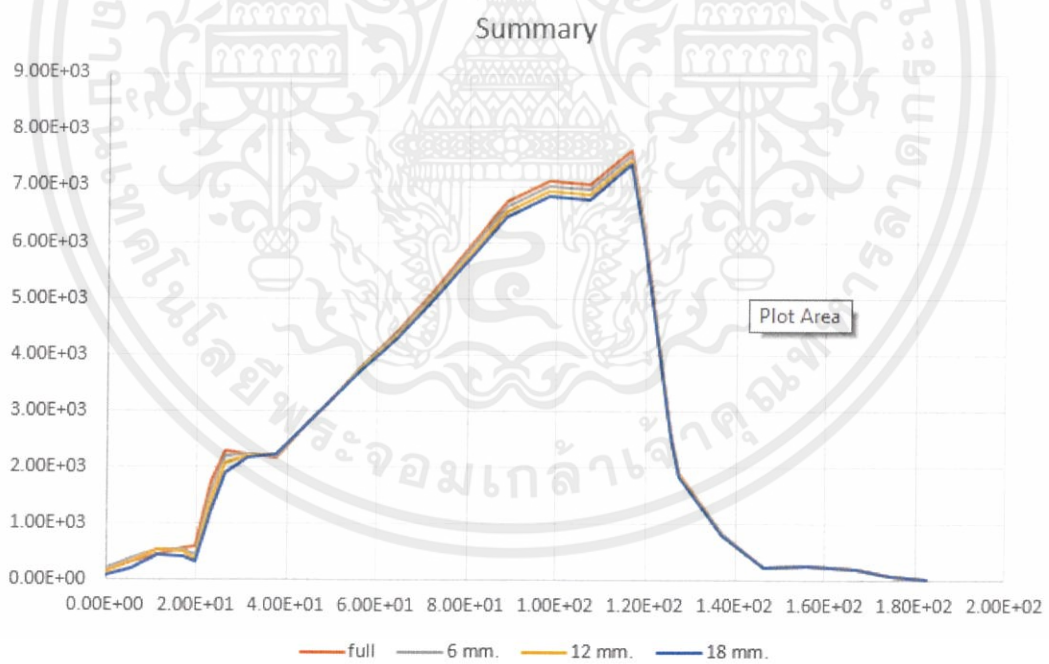


ภาพที่ 3.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ σ_{12} และ arc length ในการเจียร์รางสามระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ σ_{22} และ arc length ในการเจียรรางสามระดับ



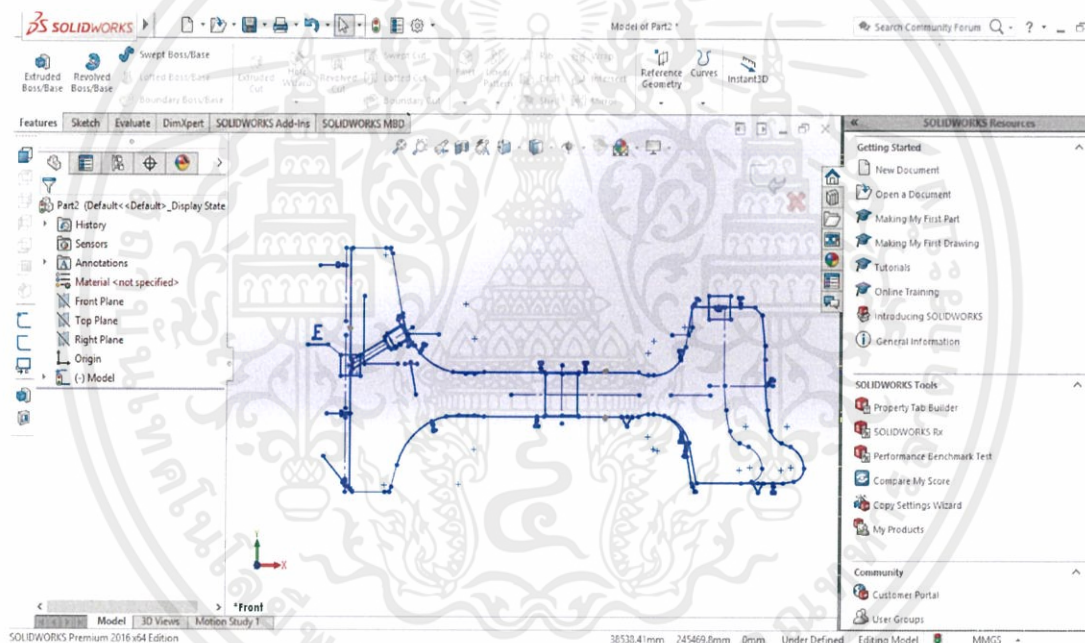
ภาพที่ 3.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ vonmises stress และ arc length ในการเจียรรางสามระดับ

3.3.5 การวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางหลังการเจียรรางในรูปแบบสามมิติโดยใช้ระเบียบทาง ไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3.5.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองสามมิติของล้อและราง

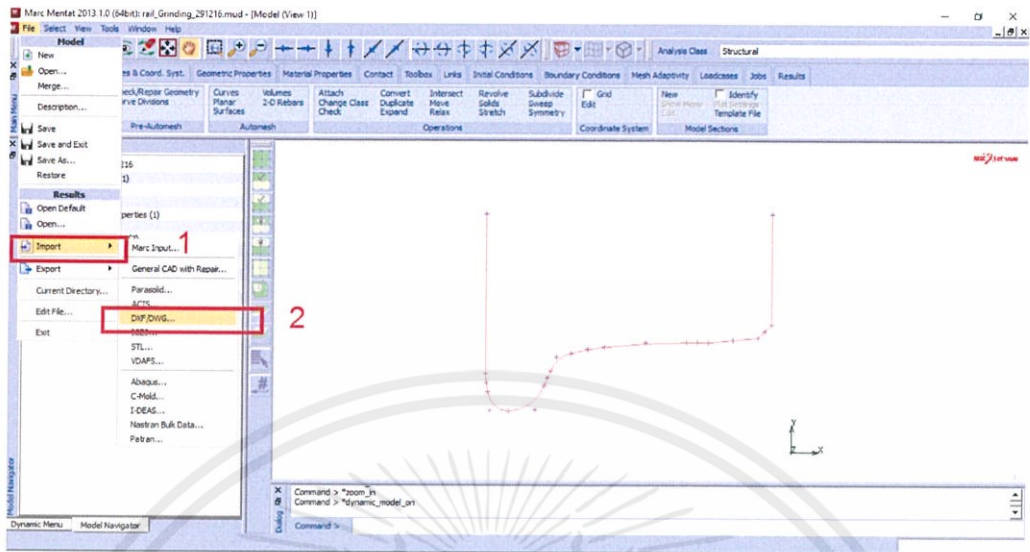
การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะสร้างแบบจำลองของล้อเป็นสองมิติด้วยโปรแกรม Solid work 2016 จากนั้นจะนำแบบจำลองสองมิติของล้อเข้าสู่โปรแกรม Marc mentat จากนั้นจะทำการ Revolve หน้าที่ตัด 360° รอบแกน x

การสร้างแบบจำลองของรางเป็นสองมิติด้วยโปรแกรม Marc mentat จากนั้นทำการ Duplicate และ Expand เพื่อให้รางมีความหนาในแนวแกน z



ภาพที่ 3.19 แสดงการออกแบบล้อด้วยโปรแกรม Solid work

การนำแบบจำลองเข้าสู่โปรแกรม Marc mentat

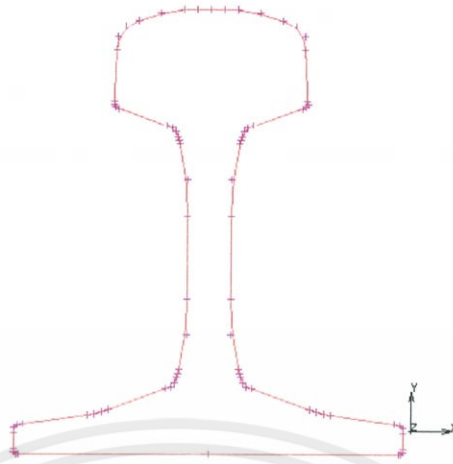


ภาพที่ 3.20 แสดงการออกแบบลวดด้วยโปรแกรม Solid work

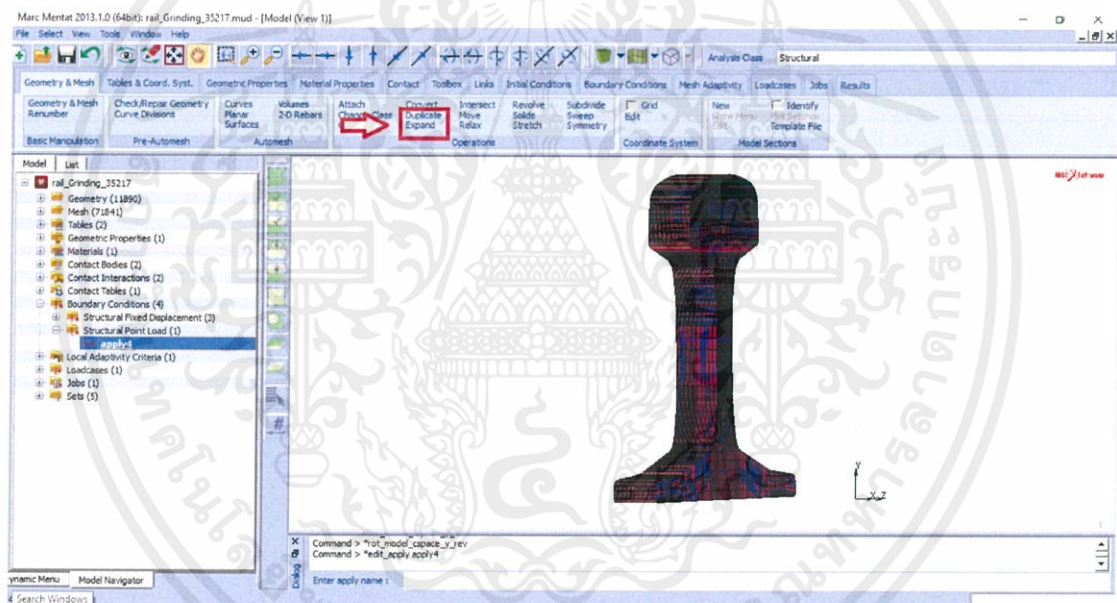


ภาพที่ 3.21 แสดงการออกแบบลวดด้วยโปรแกรม Marc mentat

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.22 แสดงการออกแบบรางสองมิติด้วยโปรแกรม Marc mentat

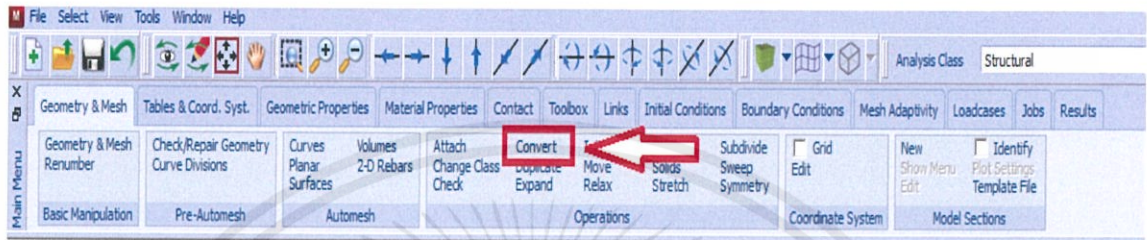


ภาพที่ 3.23 แสดงการออกแบบรางสามมิติด้วยโปรแกรม Marc mentat

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

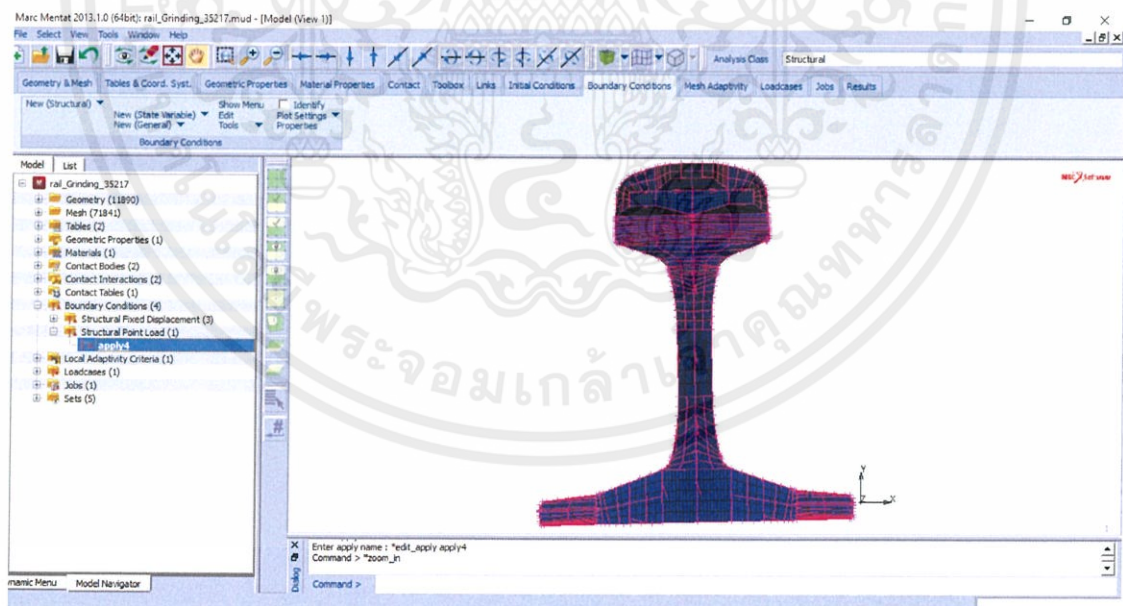
3.3.5.2 การสร้างเอลิเมนต์ให้แบบจำลอง

เนื่องจากการเตรียมขนาดและจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมจะช่วยลดปัญหาเวลาในการคำนวณให้น้อยลง และมีความแม่นยำในการคำนวณสูง ซึ่งจะพิจารณาจากจุดที่สำคัญของแบบจำลองก่อน คือบริเวณที่ลัดสัมผัสกับรางโดยการสร้างเม็ช (Meshing) บริเวณนั้นให้มีความละเอียดสูงกว่าบริเวณที่ห่างจากจุดสัมผัสเนื่องจากมีผลกระทบต่อแรงระหว่างจุดสัมผัสน้อย



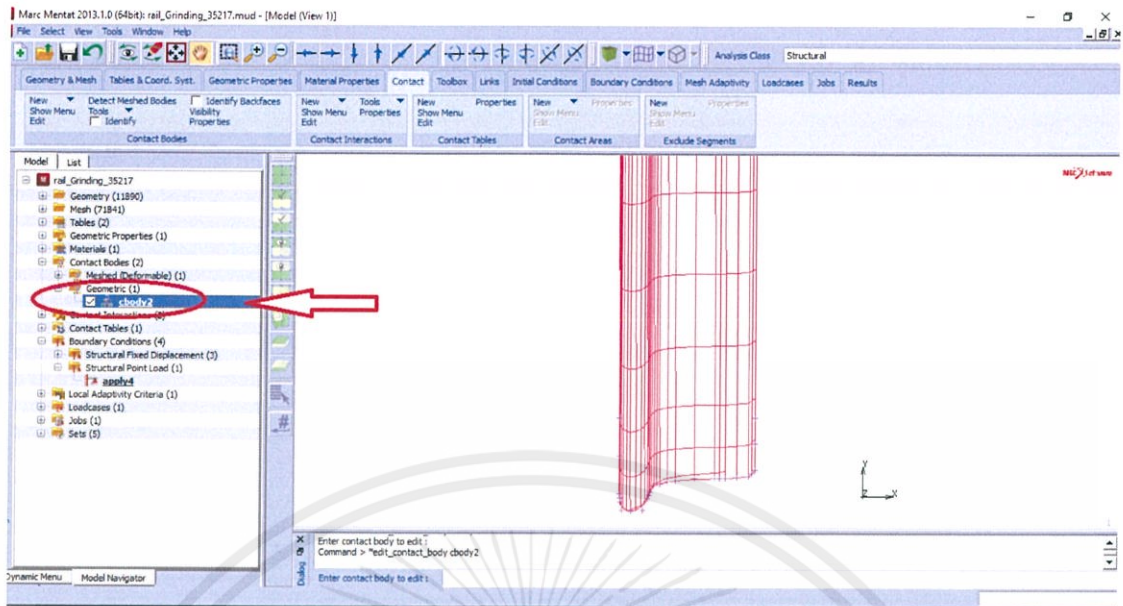
ภาพที่ 3.24 แสดงการสร้างเอลิเมนต์

งานวิจัยนี้จะเลือกใช้เอลิเมนต์แบบสี่หน้า (Four-node tetrahedral element) เนื่องจากเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าสามารถตอบสนองต่อการยุบตัวและสอดคล้องการสัมผัสระหว่างล้อและรางได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 3.25 แสดงการสร้างเม็ช (Meshing) ของราง

งานวิจัยนี้จะพิจารณาการกระจายตัวของความเค้นภายในรางดังนั้น จะกำหนดให้ล้อเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) เนื่องจากต้องการพิจารณาการกระจายตัวของความเค้นภายในราง



ภาพที่ 3.26 แสดงการกำหนดให้ล้อเป็นวัตถุแข็งเกร็ง

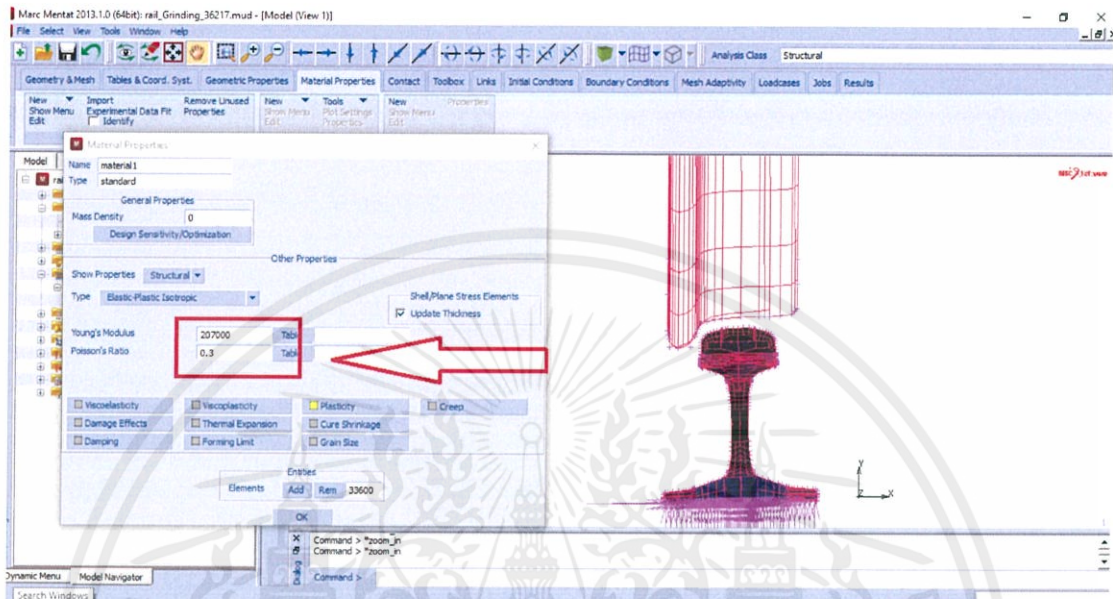
ตารางที่ 3.5 แสดงจำนวนเอลิเมนต์ของร่างก่อนการเจียรร่าง

รายการแบบจำลอง	จำนวนโหนด	จำนวนเอลิเมนต์
ร่าง	38241	33600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

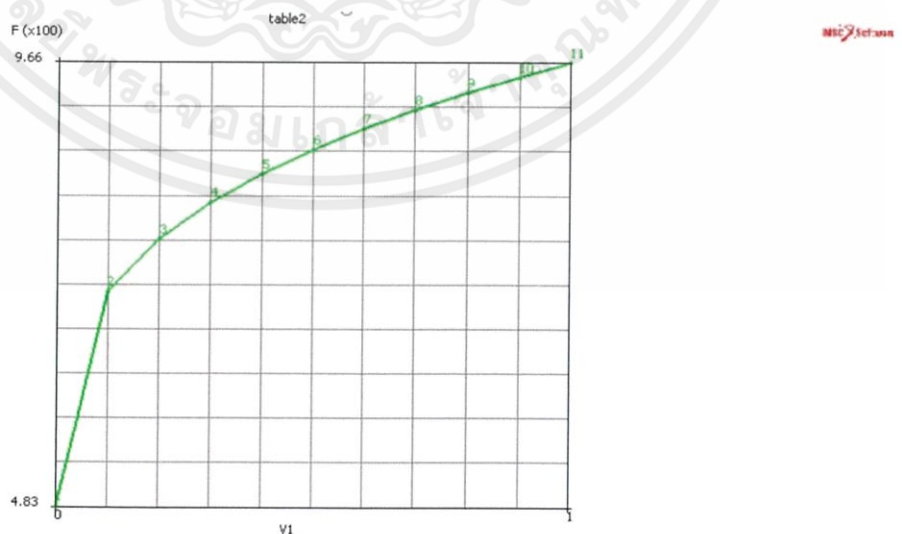
3.3.5.3 การกำหนดวัสดุให้แบบจำลอง

การกำหนดวัสดุจำลองจะพิจารณาให้ล้อยเป็นวัตถุแข็งเกร็งและรางเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น เพื่อศึกษาการสัมผัสกันระหว่างล้อและราง



ภาพที่ 3.27 แสดงการกำหนดให้แบบจำลอง

เพื่อให้แบบจำลองมีความถูกต้อง งานวิจัยนี้จึงได้ใส่ค่าของวัสดุให้มีการเสียรูปอย่างถาวร (Plasticity) ลงในวัสดุของรางด้วย โดยค่าวัสดุที่ใส่ให้แบบจำลองนั้นมาจากกราฟพลอตกราฟระหว่างเปอร์เซ็นต์ความเค้นและเปอร์เซ็นต์ความเครียดของราง

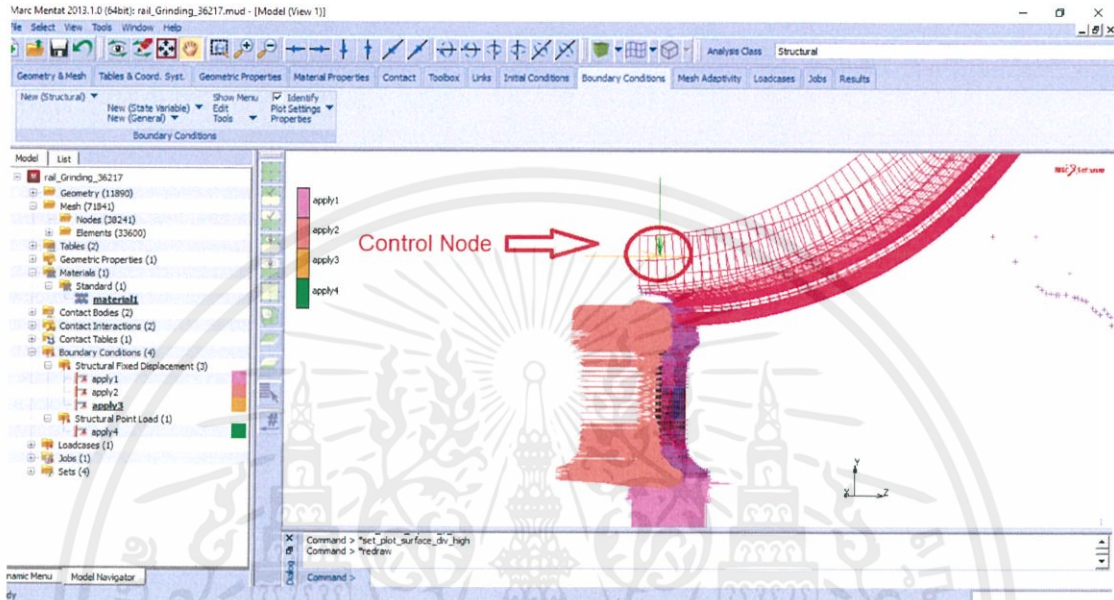


ภาพที่ 3.28 แสดงกราฟการเสียรูปถาวรของวัสดุรางโดยโปรแกรม Marc mentat

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

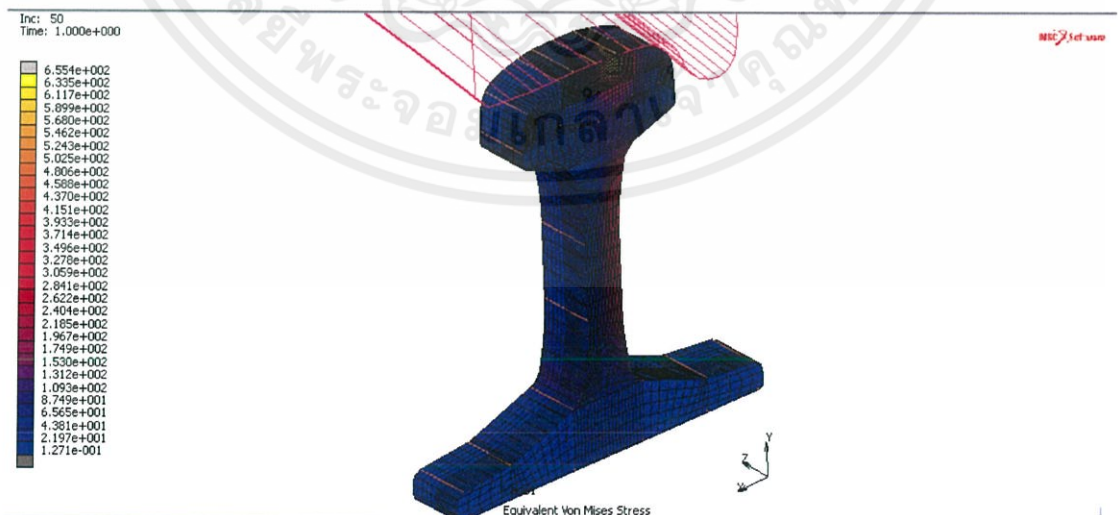
3.3.5.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้แบบจำลอง

การวิเคราะห์ปัญหาเงื่อนไขขอบเขตของการสัมผัสกันระหว่างล้อและราง จะกำหนดให้บริเวณฐานรางไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน x และ y บริเวณผิวหน้าของรางไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน z และบริเวณ Control Node ไม่มีการเคลื่อนที่ในแนว x และ z



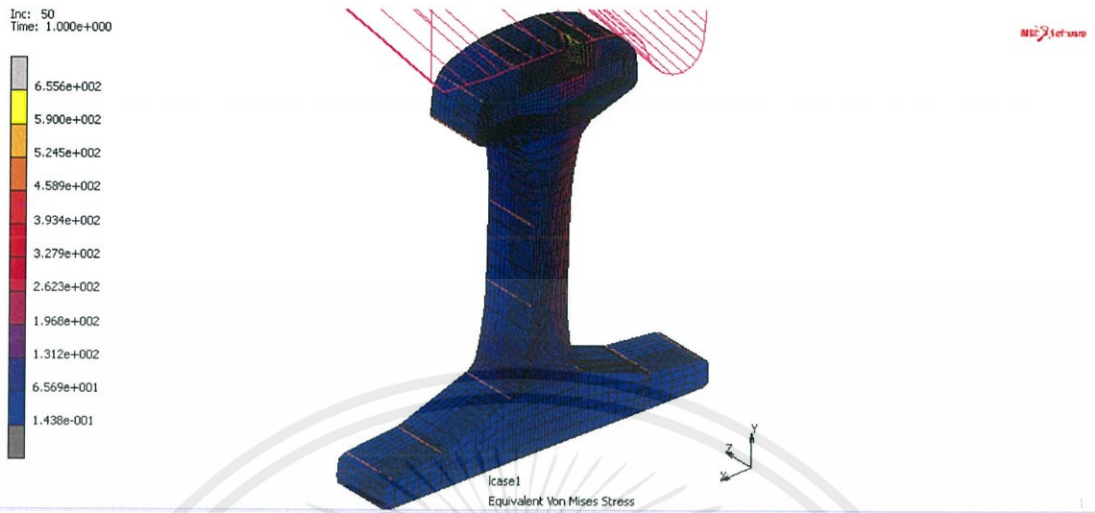
ภาพที่ 3.29 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้แบบจำลอง

3.3.5.5 ทำการเจียรรางทั้งหมดสามระดับคือ 6mm., 12 mm., และ 18 mm. โดยกำหนดค่าวัสดุและเงื่อนไขขอบเขตตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น

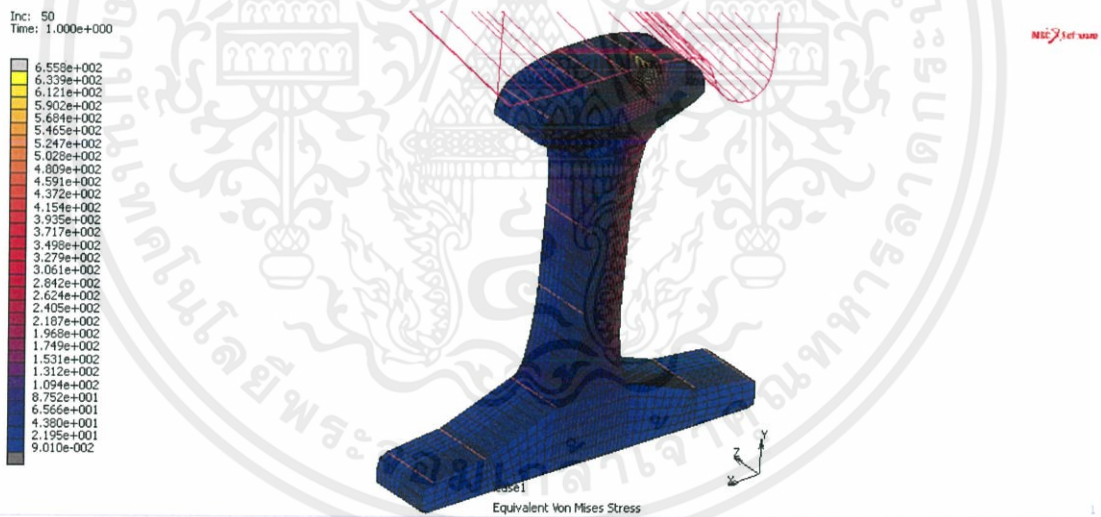


ภาพที่ 3.30 แสดงการวิเคราะห์การเจียรราง 6 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.31 แสดงการวิเคราะห์การเค้นรยาง 12 mm.



ภาพที่ 3.32 แสดงการวิเคราะห์การเค้นรยาง 18 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองการสัมผัสกันระหว่างล้อและรางในสภาวะก่อนและหลังเจียรรางด้วยโปรแกรม Marc mentat เป็นข้อมูลสำคัญ เนื่องจากได้ผ่านการทดลองเพื่อเข้าใจในแบบง่ายๆหลายครั้ง ทั้งการคำนวณ การสร้างแบบจำลอง การเลือกใช้ค่าวัสดุ ให้แบบจำลอง การเลือกใช้เอลิเมนต์ การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และการสร้างเมช (Meshing) เพื่อให้มีค่าที่สอดคล้องกับ การวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อและรางด้วยทฤษฎีของ Hertz contact เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลอง โดยการวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อและราง แบ่งออกเป็น สี่ส่วนหลักๆ คือ ผลการวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางก่อนการเจียรราง หลังเจียรราง 6 mm. หลังเจียรราง 12 mm. และหลังเจียรราง 18 mm. ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดไว้ในบทนี้

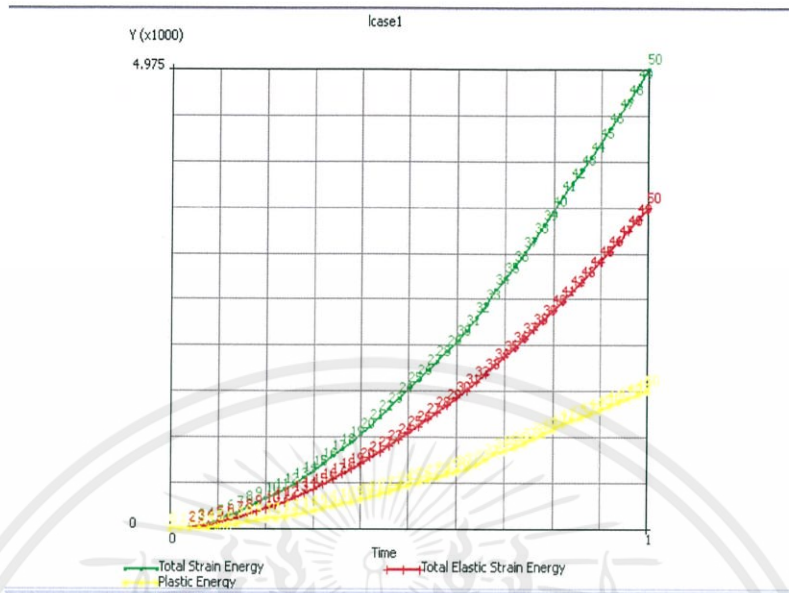
4.1 การศึกษาผลการวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางก่อนการเจียรรางโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลของการจำลองการสัมผัสกันระหว่างล้อและรางก่อนการเจียรรางนำมาวิเคราะห์ในรูปกราฟโดยในแต่ละกราฟจะกำหนดให้แกน y ของกราฟ คือความยาวตามแนวแกน y ของรางจากบริเวณจุดสัมผัสลึกลงไปในราง (arc length) และแกน x คือค่าความเค้นในแนวแกนและพลังงานในการเสีรูปร่างต่างๆ ได้ดังนี้

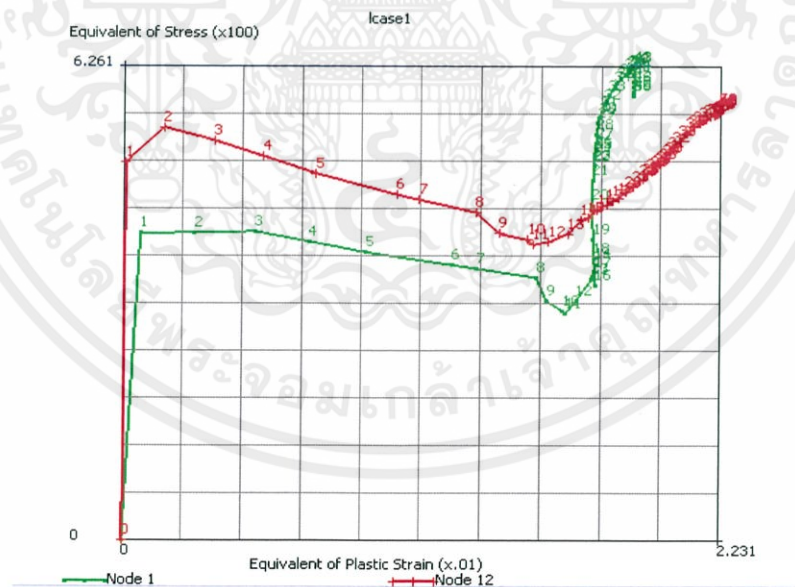


ภาพที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} และ arc length ก่อนการเจียรราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



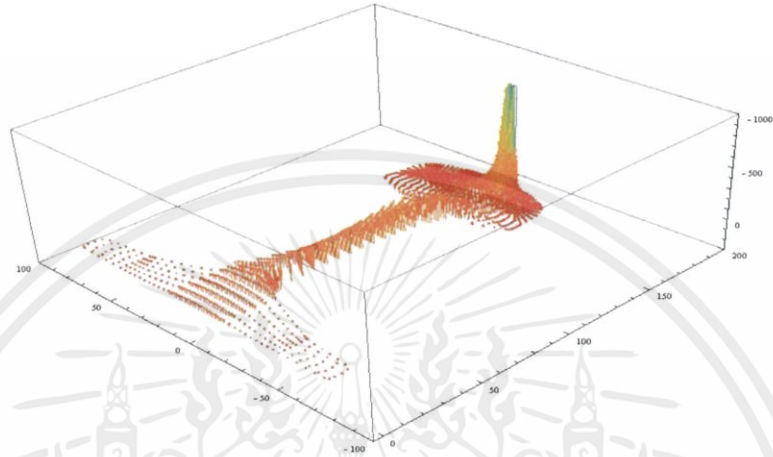
ภาพที่ 4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Total strain energy ,Plastic energy, Total elastic strain energy และ arc length ก่อนการเจียรรูาง



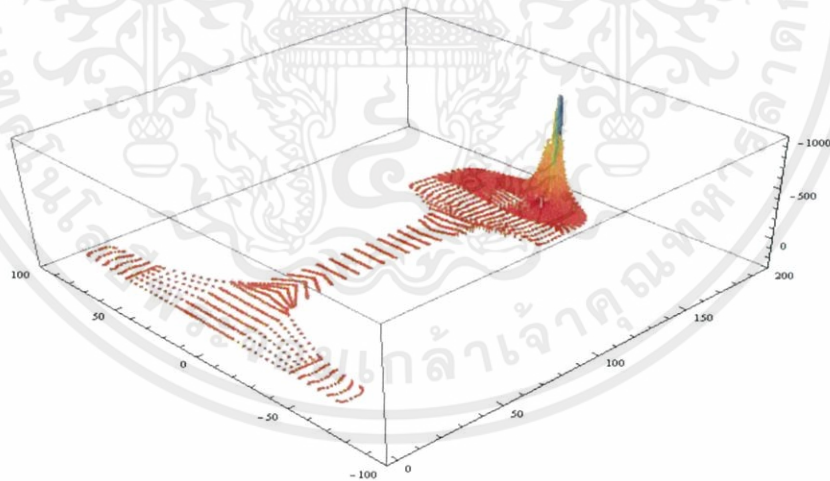
ภาพที่ 4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent of plastic strain และ arc length ก่อนการเจียรรูาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์การสัมพันธ์กันระหว่างล้อและรางก่อนการเจียรรางนำมาพลอตกราฟสามมิติ โดยกำหนดให้แกน x และ y ของกราฟ คือความยาวของรางตามแนวแกน x และ y ตามลำดับ และแกน z ของกราฟ คือค่า σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} และ vonmises stress ซึ่งมีดังนี้

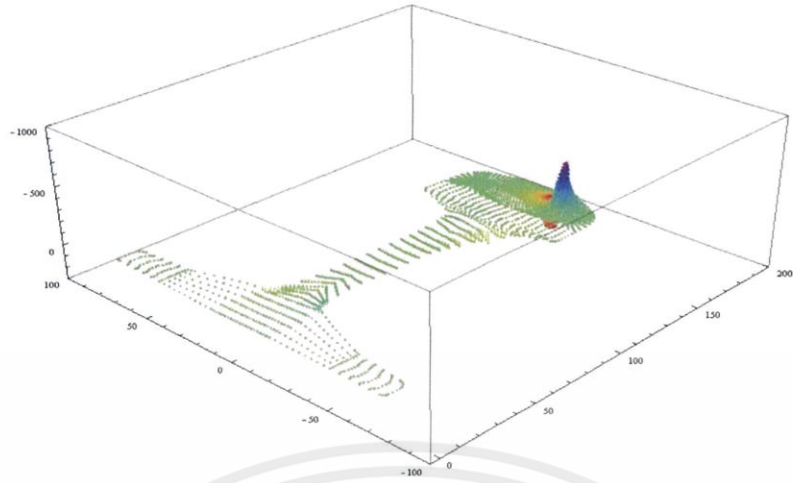


ภาพที่ 4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{22} และ arc length ก่อนการเจียรราง

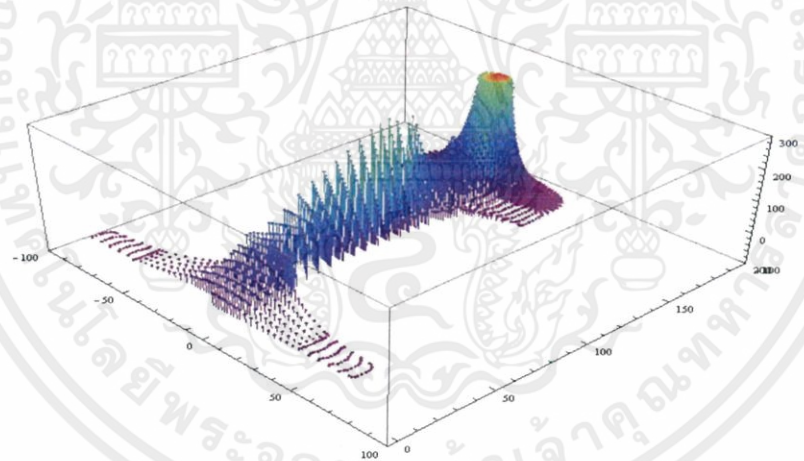


ภาพที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} และ arc length ก่อนการเจียรราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



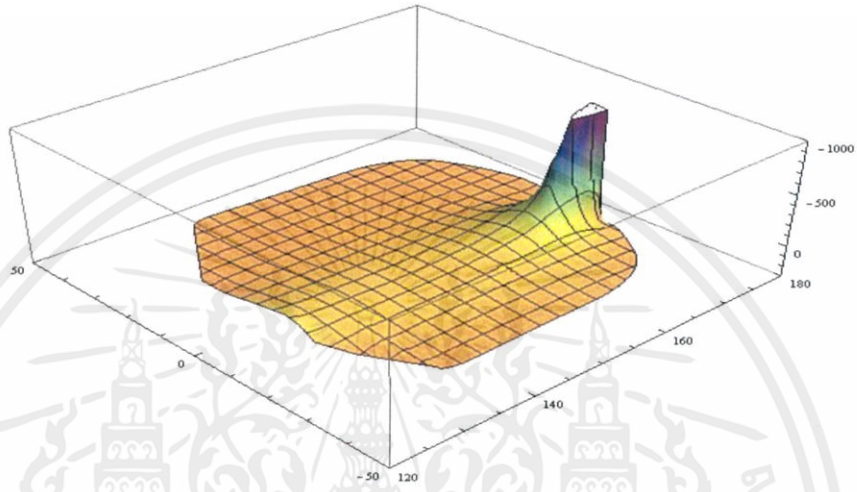
ภาพที่ 4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{12} และ arc length ก่อนการเจริญร้าว



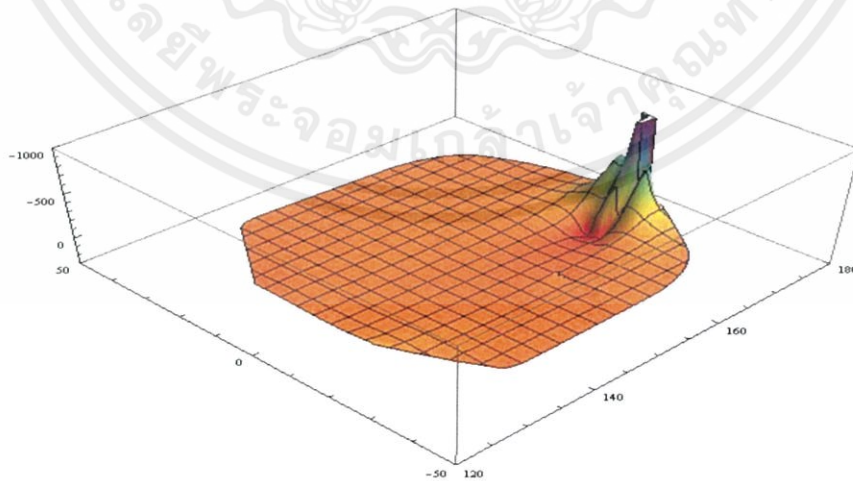
ภาพที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง vonmises stress และ arc length ก่อนการเจริญร้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อและรางก่อนการเจียรราง โดยสนใจบริเวณหัวรายนำมาพลอตกราฟสามมิติ โดยกำหนดให้แกน x และ y ของกราฟ คือความยาวของรางตามแนวแกน x และ y ตามลำดับ และแกน z ของกราฟ คือค่า σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} และ vonmises stress ซึ่งมีดังนี้

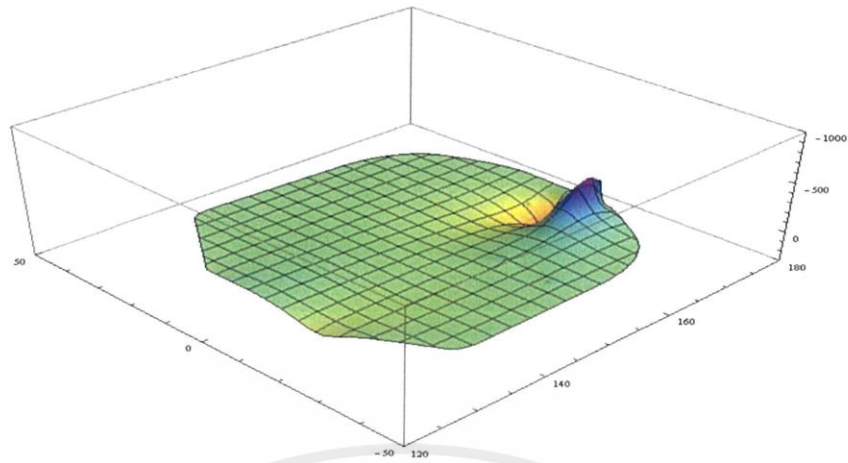


ภาพที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{22} และ arc length ก่อนการเจียรราง

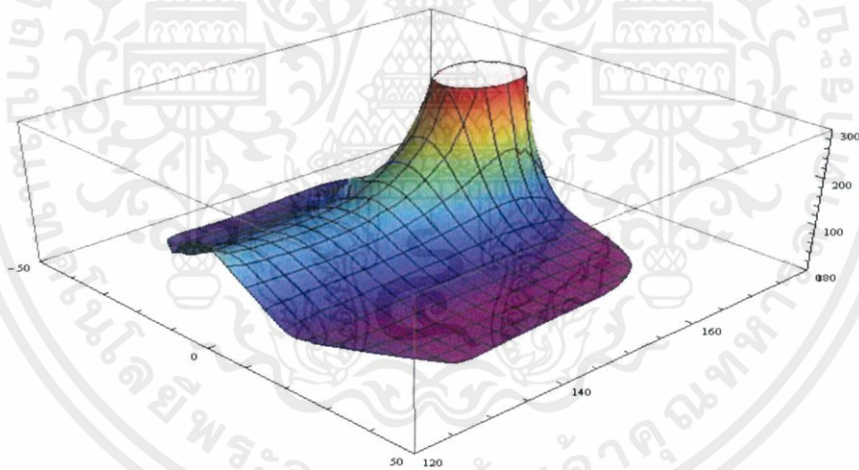


ภาพที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} และ arc length ก่อนการเจียรราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{12} และ arc length ก่อนการเจียรราง

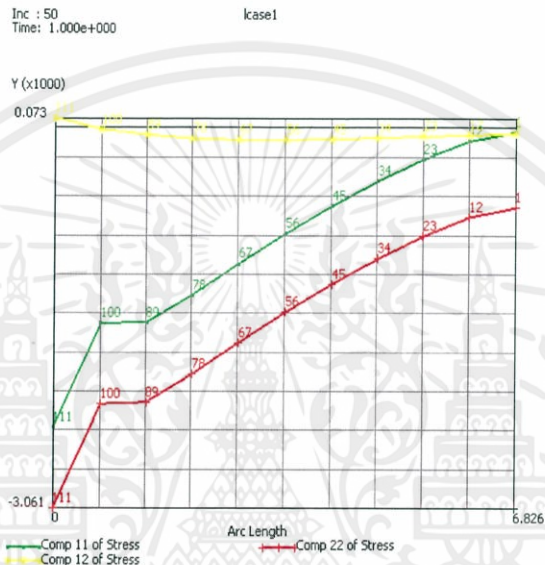


ภาพที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง vonmises stress และ arc length ก่อนการเจียรราง

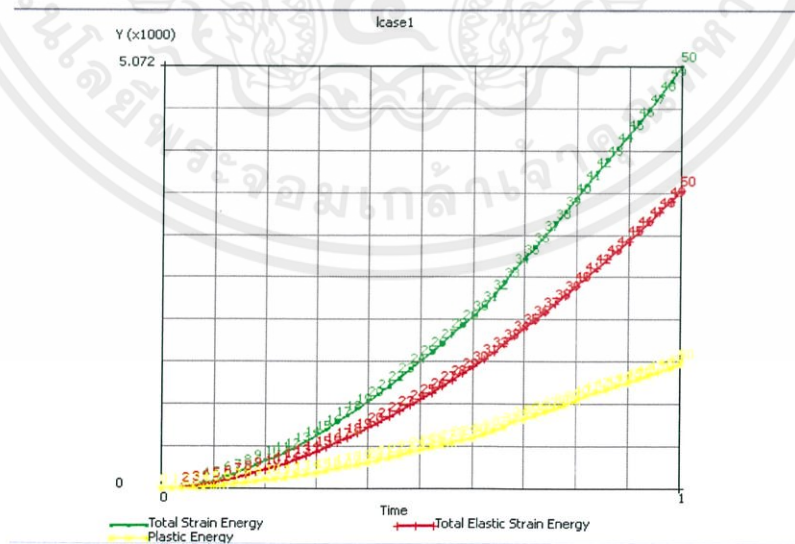
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาผลการวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางหลังการเจียรราง 6 mm. โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลของการจำลองการสัมผัสกันระหว่างล้อและรางหลังการเจียรราง 6 mm. นำมาวิเคราะห์ในรูปกราฟโดยในแต่ละกราฟจะกำหนดให้แกน y ของกราฟ คือความยาวตามแนวแกน y ของรางจากบริเวณจุดสัมผัสลึกลงไปในราง (arc length) และแกน x คือค่าความเค้นในแนวแกนและพลังงานในการเสียรูปต่างๆ ได้ดังนี้

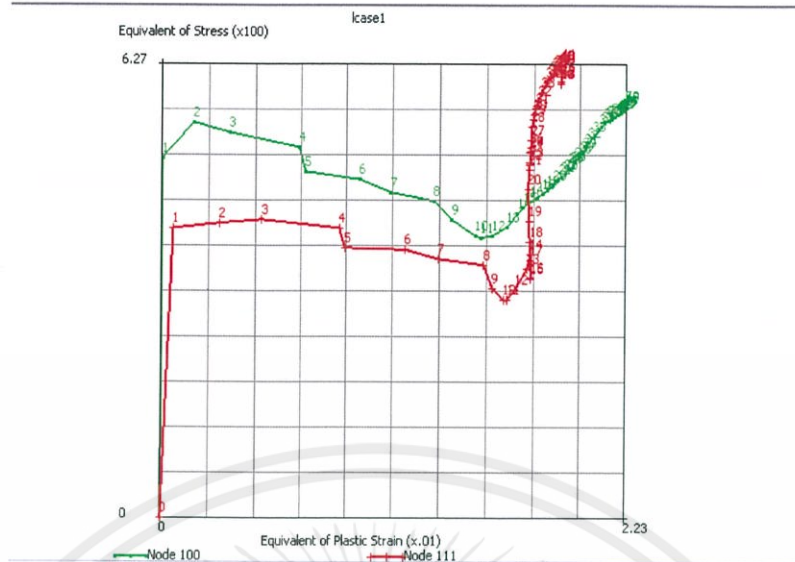


ภาพที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} และ arc length หลังการเจียรราง 6 mm.



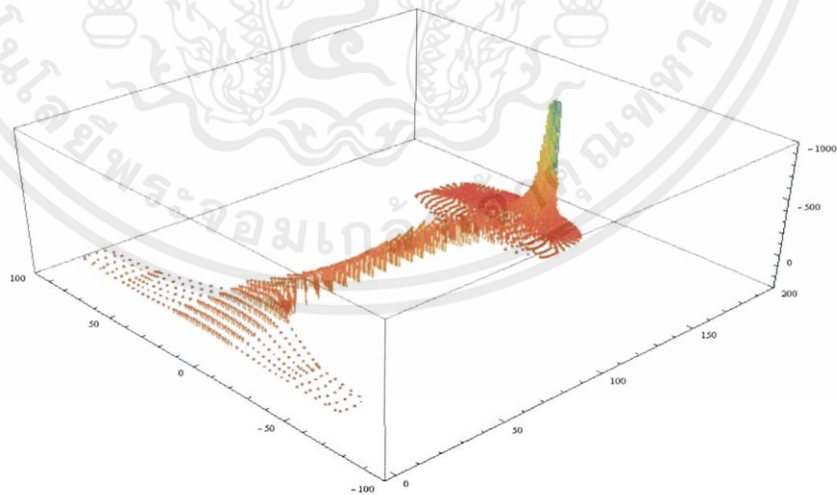
ภาพที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Total strain energy ,Plastic energy, Total elastic strain energy และ arc length หลังการเจียรราง 6 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



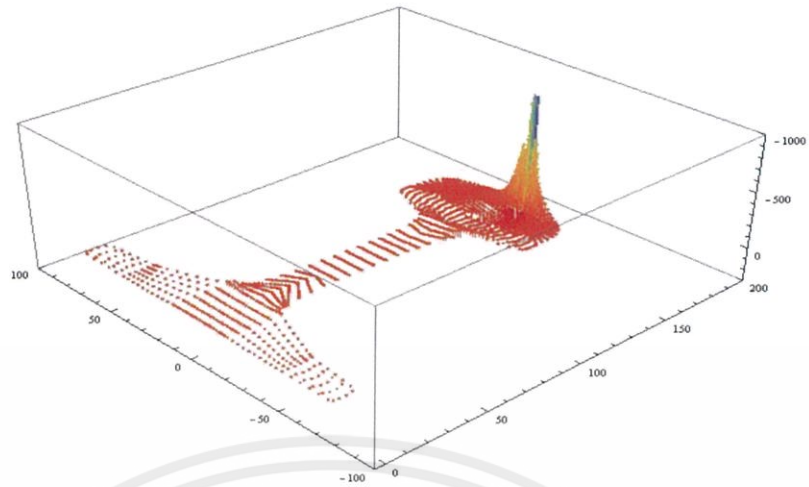
ภาพที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent of plastic strain และ arc length หลังการเจียรรูวง 6 mm.

เมื่อนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อและรางหลังเจียรรูวง 6 mm. นำมาพลอตกราฟสามมิติ โดยกำหนดให้แกน x และ y ของกราฟ คือความยาวของรางตามแนวแกน x และ y ตามลำดับ และแกน z ของกราฟ คือค่า σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} และ vonmises stress ซึ่งมีดังนี้

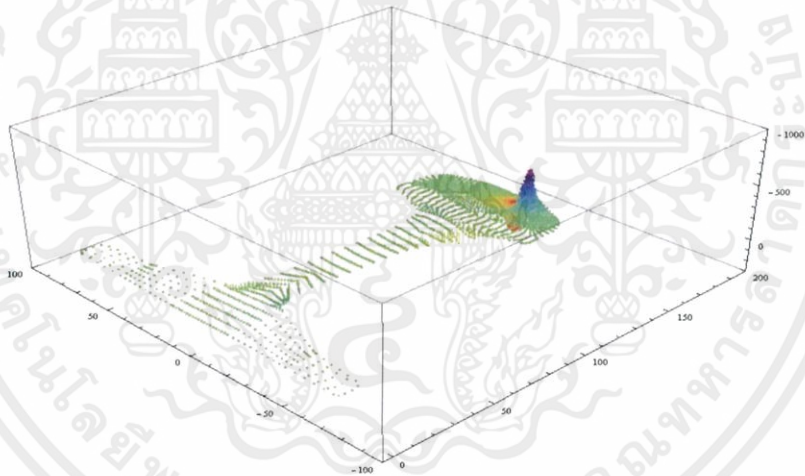


ภาพที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{22} และ arc length หลังการเจียรรูวง 6 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

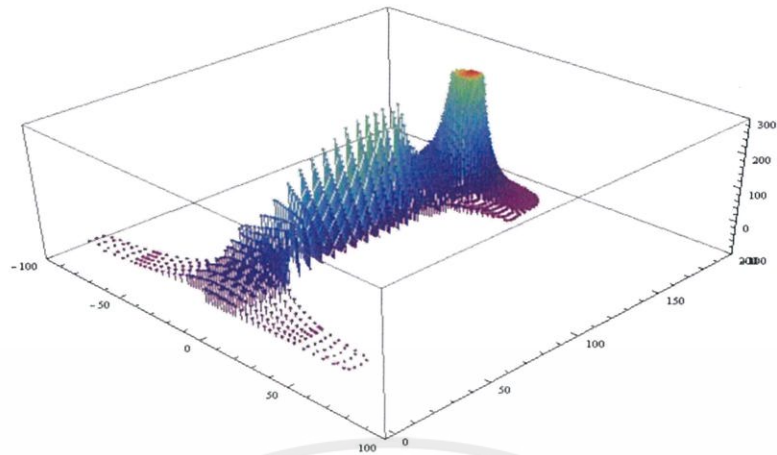


ภาพที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} และ arc length หลังการเจียรรูวง 6 mm.



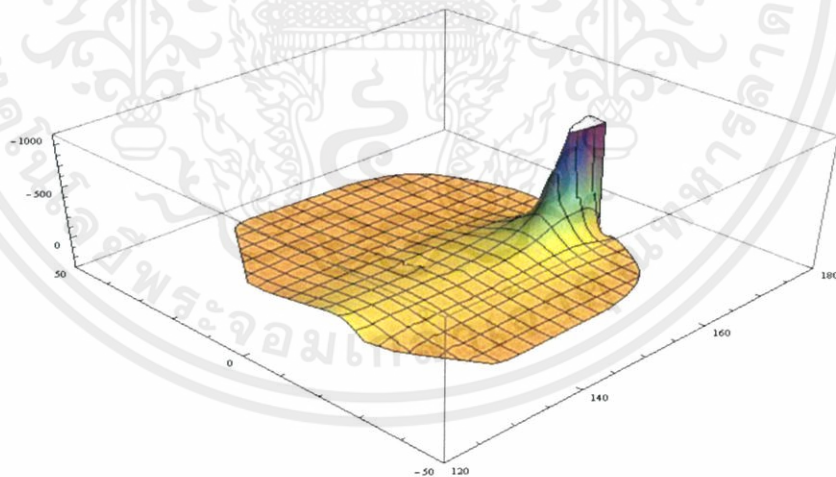
ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{12} และ arc length หลังการเจียรรูวง 6 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

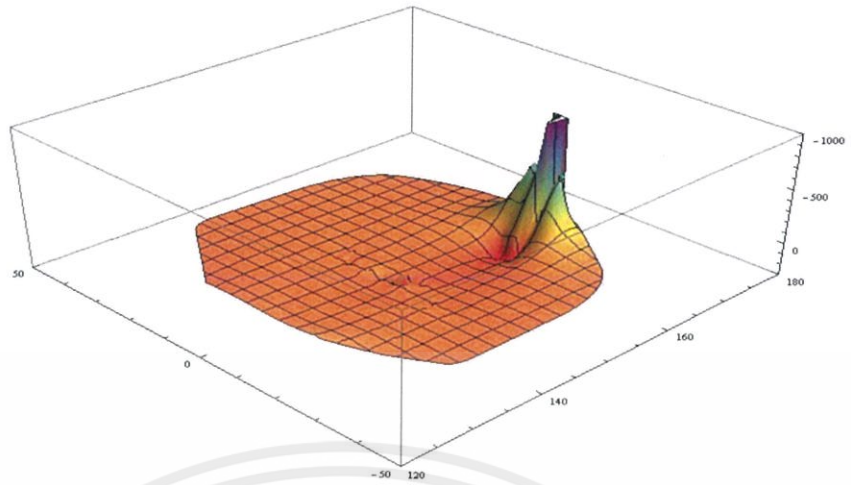


ภาพที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง vonmises stress และ arc length หลังการเจียรรูวง 6 mm.

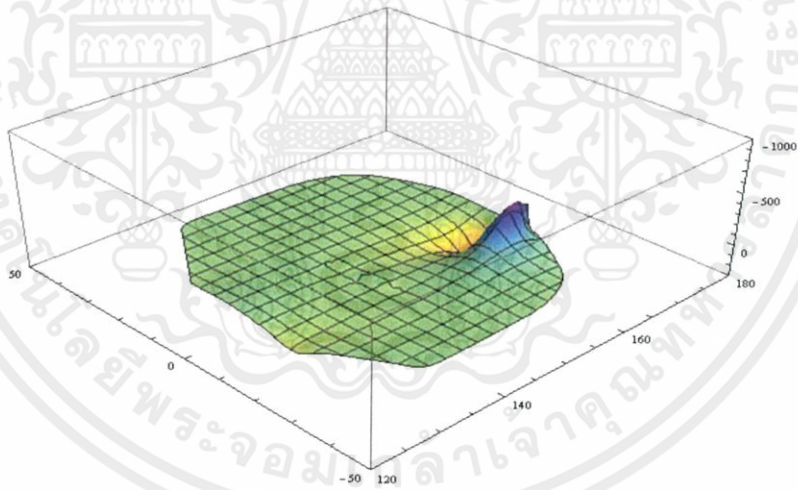
ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อและรางหลังการเจียรรูวง 6 mm. โดยสนใจบริเวณหัวรางนำมาพลอตกราฟสามมิติ โดยกำหนดให้แกน x และ y ของกราฟ คือ ความยาวของรางตามแนวแกน x และ y ตามลำดับ และแกน z ของกราฟ คือค่า σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} และ vonmises stress ซึ่งมีดังนี้



ภาพที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{22} และ arc length หลังการเจียรรูวง 6mm.

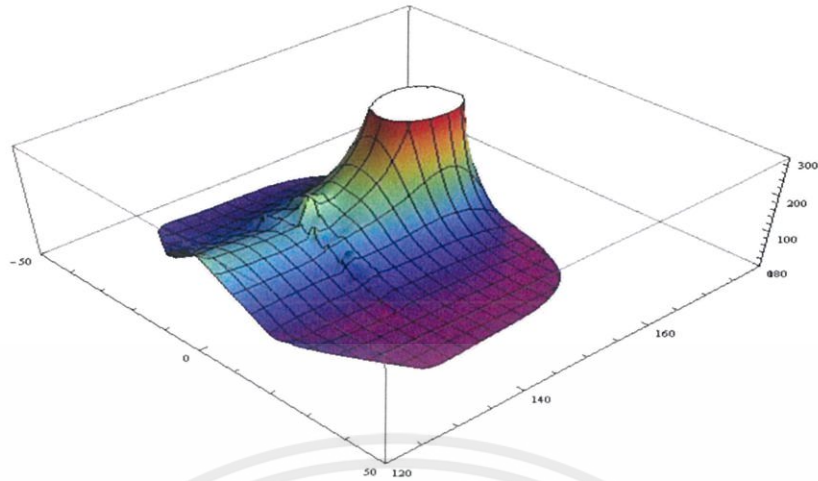


ภาพที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} และ arc length หลังการเฉียรร่าง 6 mm.



ภาพที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{12} และ arc length หลังการเฉียรร่าง 6 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



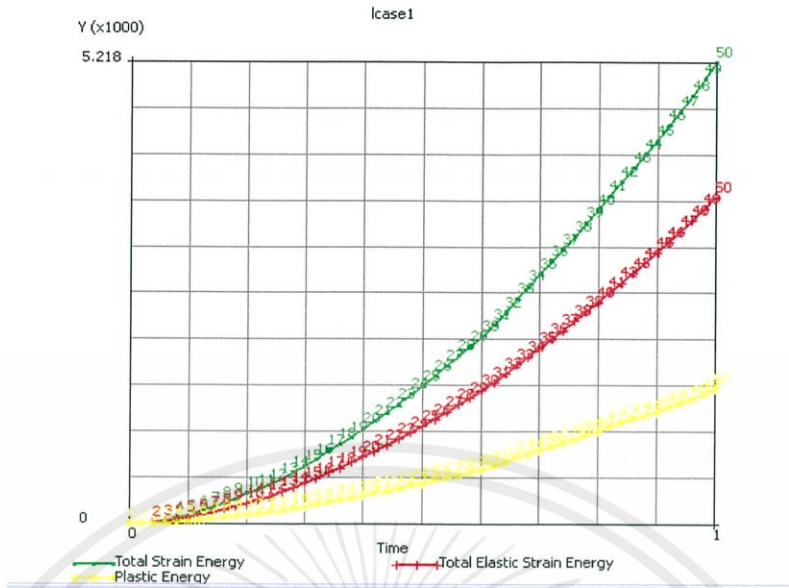
ภาพที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง vonmises stress และ arc length หลังการเจียรรูวง 6 mm.

4.3 การศึกษาผลการวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางหลังการเจียรรูวง 12 mm. โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

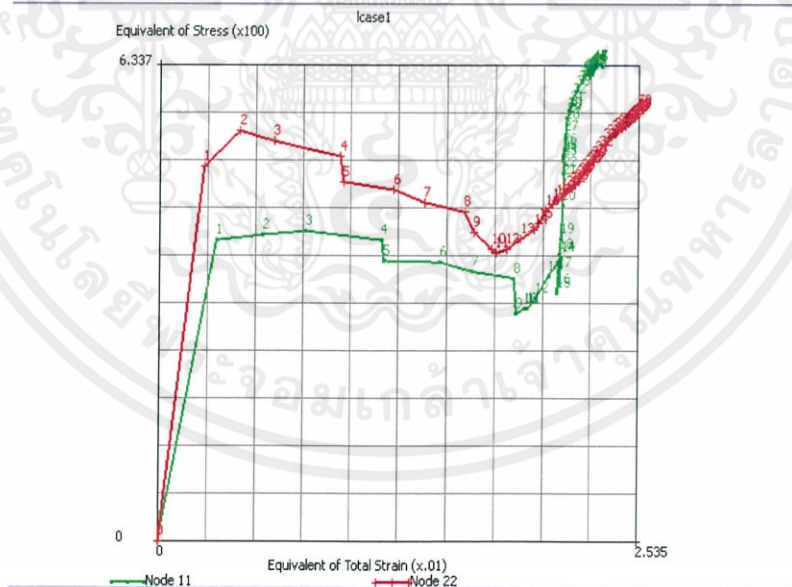
ผลของการจำลองการสัมผัสกันระหว่างล้อและรางหลังการเจียรรูวง 12 mm. นำมาวิเคราะห์ในรูปกราฟโดยในแต่ละกราฟจะกำหนดให้แกน y ของกราฟ คือความยาวตามแนวแกน y ของรางจากบริเวณจุดสัมผัสลึกลงไปในราง (arc length) และแกน x คือค่าความเค้นในแนวแกนและพลังงานในการเสียดรูปต่างๆ ได้ดังนี้



ภาพที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} และ arc length หลังการเจียรรูวง 12 mm.



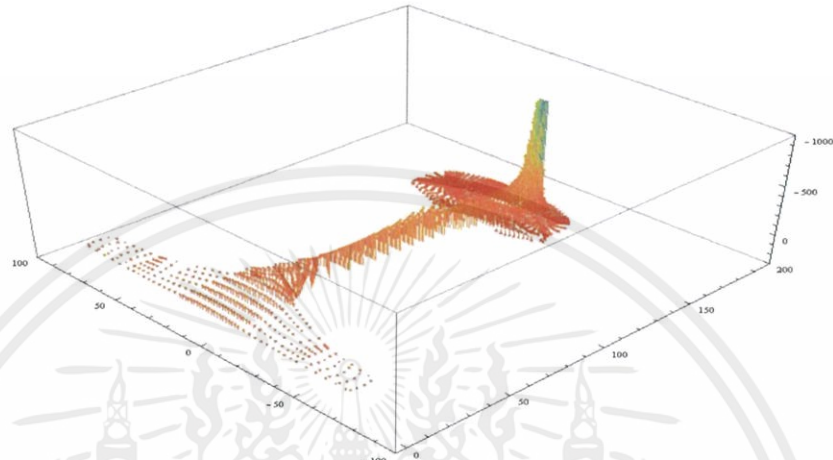
ภาพที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Total strain energy ,Plastic energy,Total elastic strain energy และ arc length หลังการเจียรรูาง 12 mm.



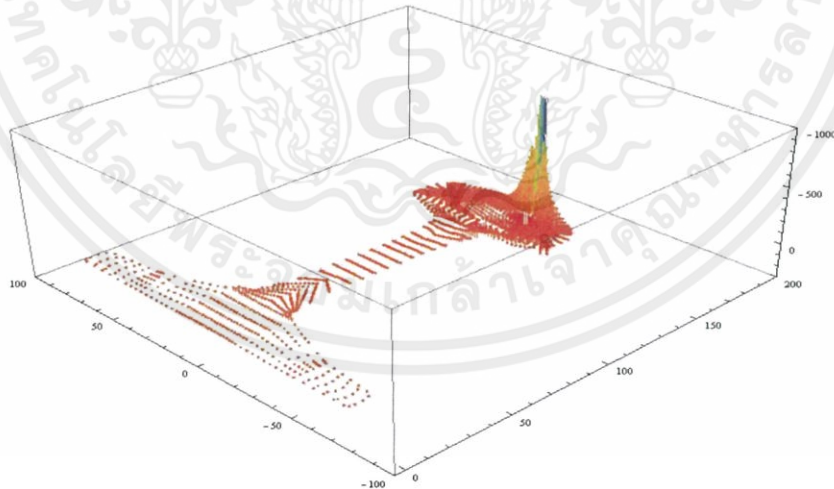
ภาพที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent of plastic strain และ arc length หลังการเจียรรูาง 12 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อและรางหลังการเจียรราง 12 mm. นำมาพลอตกราฟสามมิติ โดยกำหนดให้แกน x และ y ของกราฟ คือความยาวของรางตามแนวแกน x และ y ตามลำดับ และแกน z ของกราฟ คือค่า σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} และ vonmises stress ซึ่งมีดังนี้

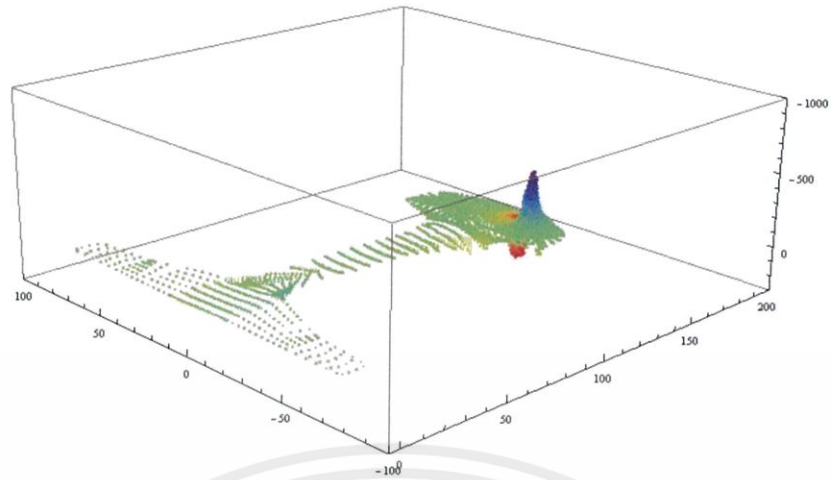


ภาพที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{22} และ arc length หลังการเจียรราง 12 mm.

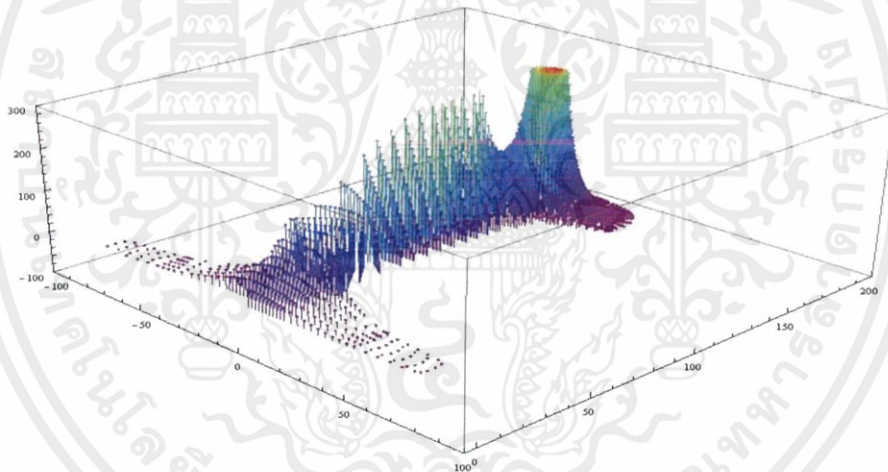


ภาพที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} และ arc length หลังการเจียรราง 12 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



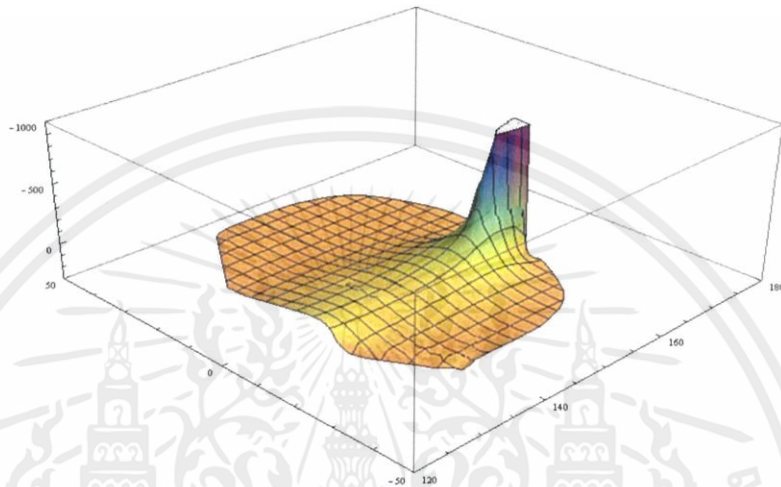
ภาพที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{12} และ arc length หลังการเจียรรูวง 12 mm.



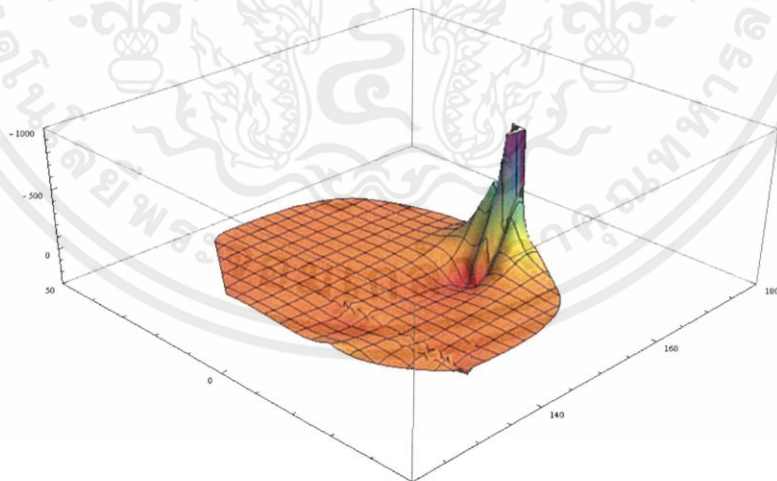
ภาพที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง vonmises stress และ arc length หลังการเจียรรูวง 12 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การสัมพันธ์กันระหว่างล้อและรางหลังการเจียรราง 12 mm. โดยสนใจบริเวณหัวรางนำมาพลอตกราฟสามมิติ โดยกำหนดให้แกน x และ y ของกราฟ คือความยาวของรางตามแนวแกน x และ y ตามลำดับ และแกน z ของกราฟ คือ σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} และ vonmises stress ซึ่งมีดังนี้

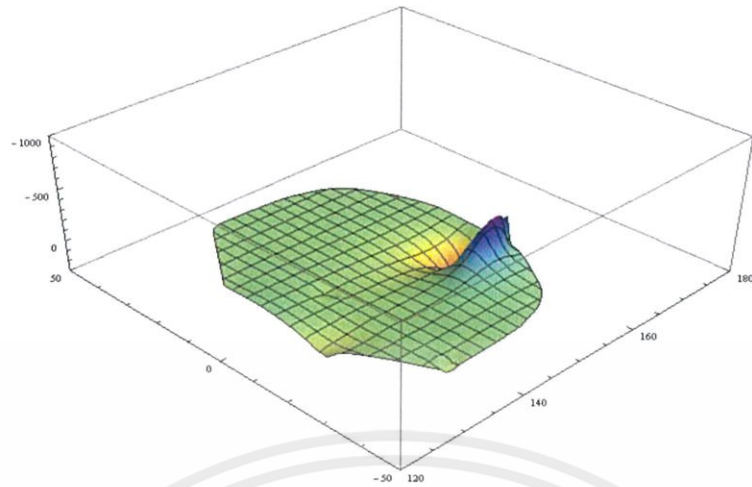


ภาพที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{22} และ arc length หลังการเจียรราง 12 mm.

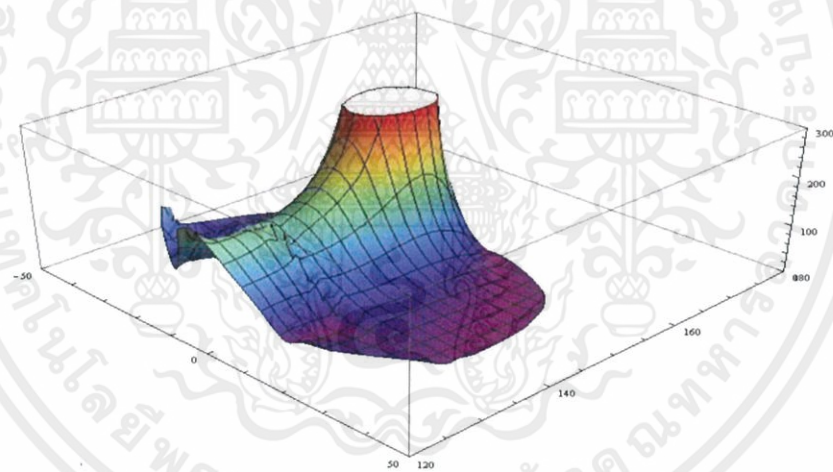


ภาพที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} และ arc length หลังการเจียรราง 12 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{12} และ arc length หลังการเจียรรูวง 12 mm.

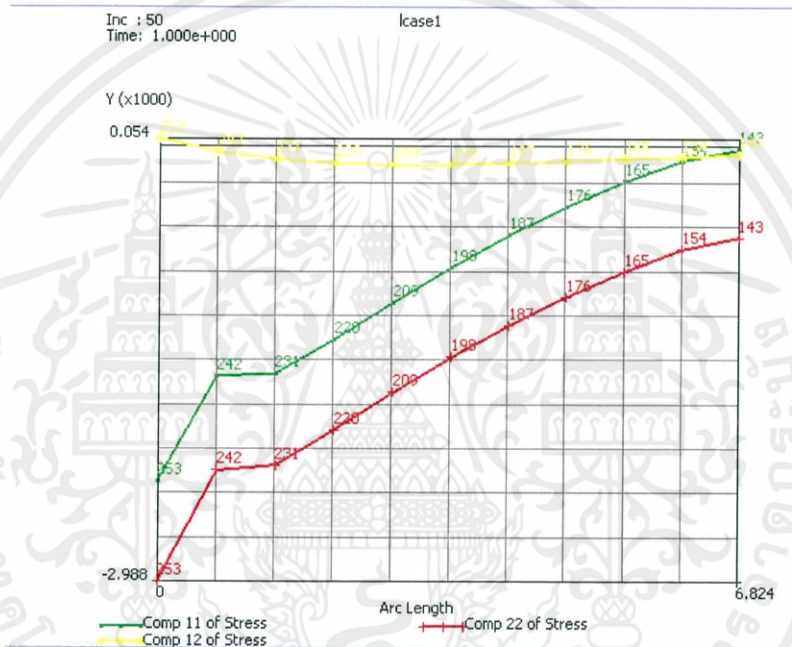


ภาพที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง vonmises stress และ arc length หลังการเจียรรูวง 12 mm.

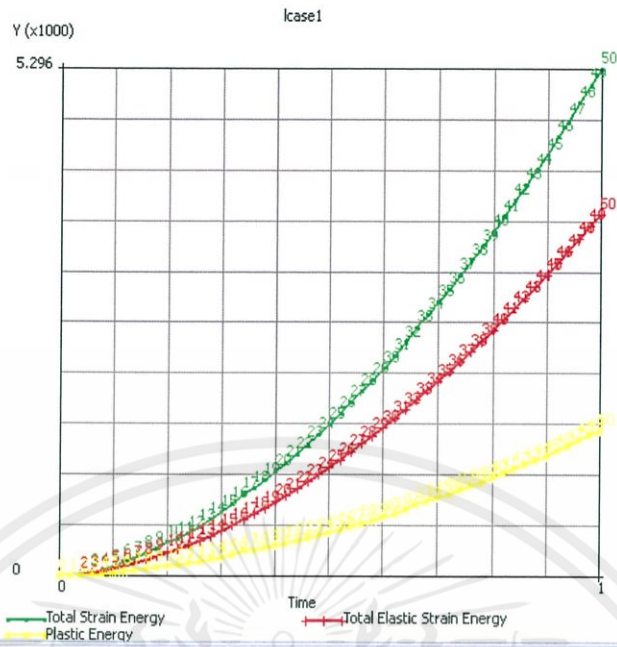
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาผลการวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางหลังการเจียรราง 18 mm. โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

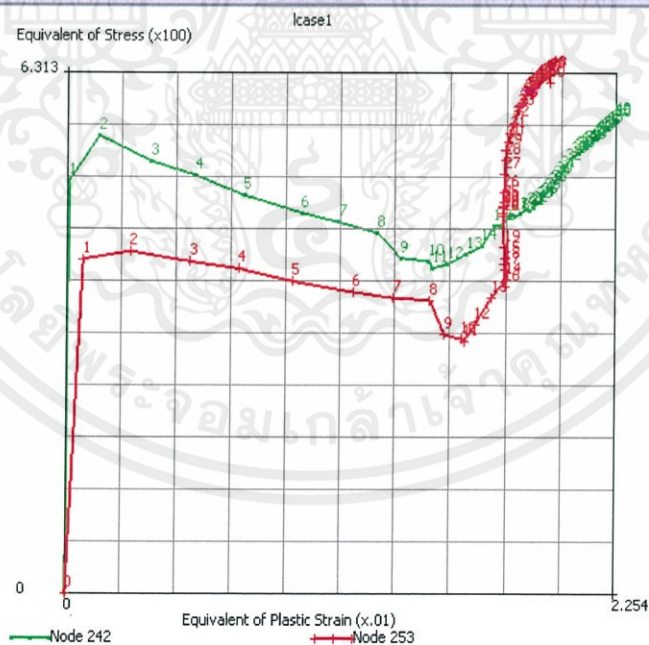
ผลของการจำลองการสัมผัสกันระหว่างล้อและรางหลังการเจียรราง 18 mm. นำมาวิเคราะห์ในรูปกราฟโดยในแต่ละกราฟจะกำหนดให้แกน y ของกราฟ คือความยาวตามแนวแกน y ของรางจากบริเวณจุดสัมผัสลึกลงไปในราง (arc length) และแกน x คือค่าความเค้นในแนวแกนและพลังงานในการเสียรูปต่างๆ ได้ดังนี้



ภาพที่ 4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} และ arc length หลังการเจียรราง 18 mm.



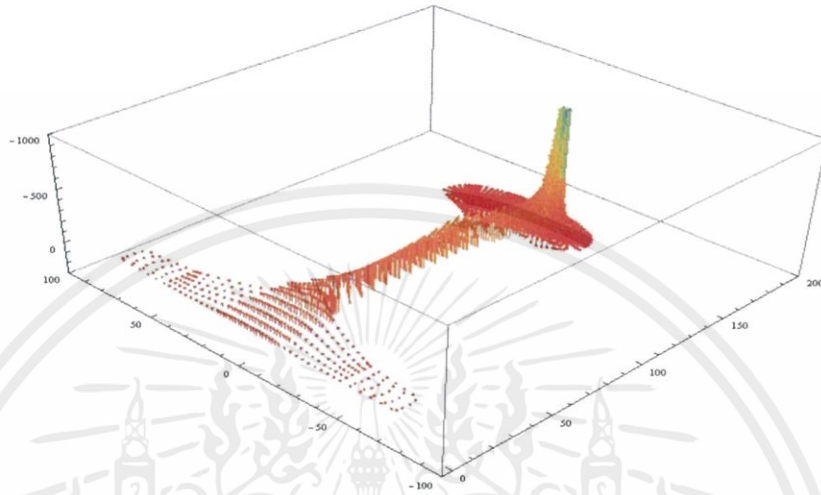
ภาพที่ 4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Total strain energy ,Plastic energy, Total elastic strain energy และ arc length หลังการเจียรรูวง 18 mm.



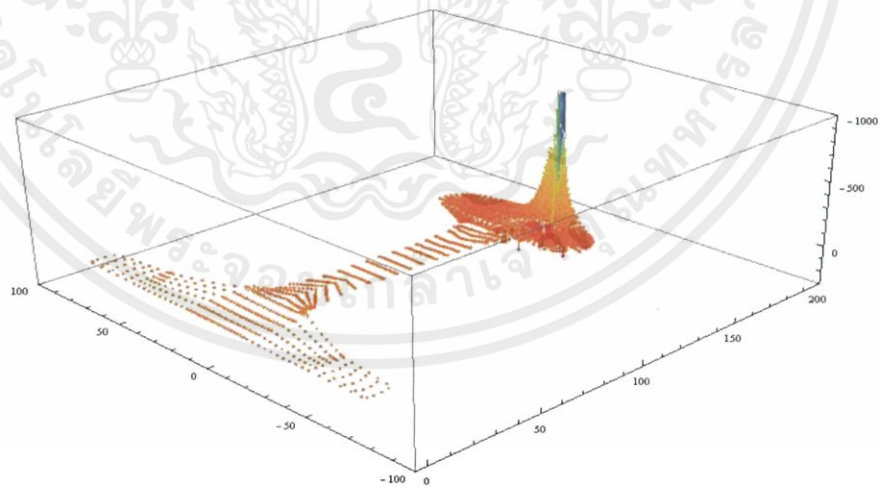
ภาพที่ 4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent of plastic strain และ arc length หลังการเจียรรูวง 18 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อและรางหลังการเจียรราง 18 mm. นำมาพลอตกราฟสามมิติ โดยกำหนดให้แกน x และ y ของกราฟ คือความยาวของรางตามแนวแกน x และ y ตามลำดับ และแกน z ของกราฟ คือค่า σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} และ vonmises stress ซึ่งมีดังนี้

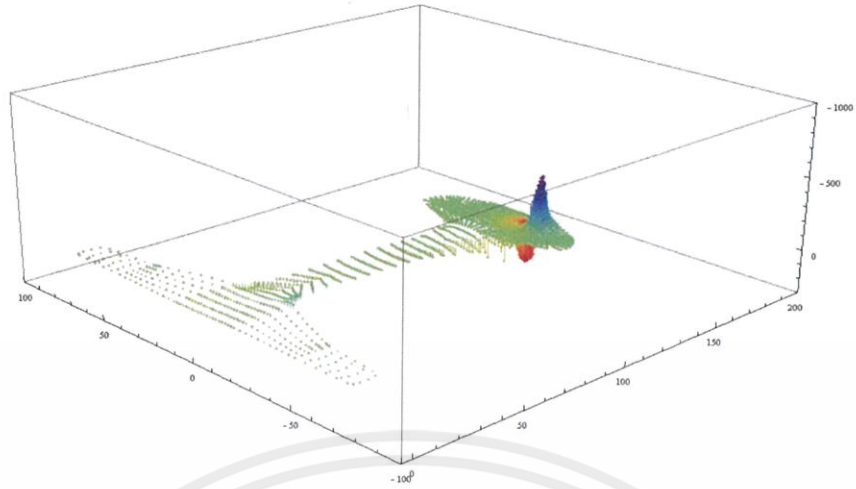


ภาพที่ 4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{22} และ arc length หลังการเจียรราง 18 mm.

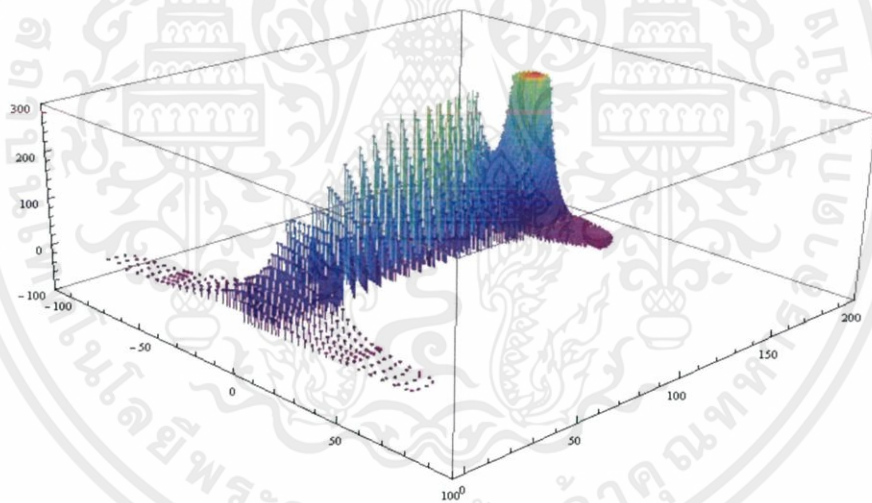


ภาพที่ 4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} และ arc length หลังการเจียรราง 18 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



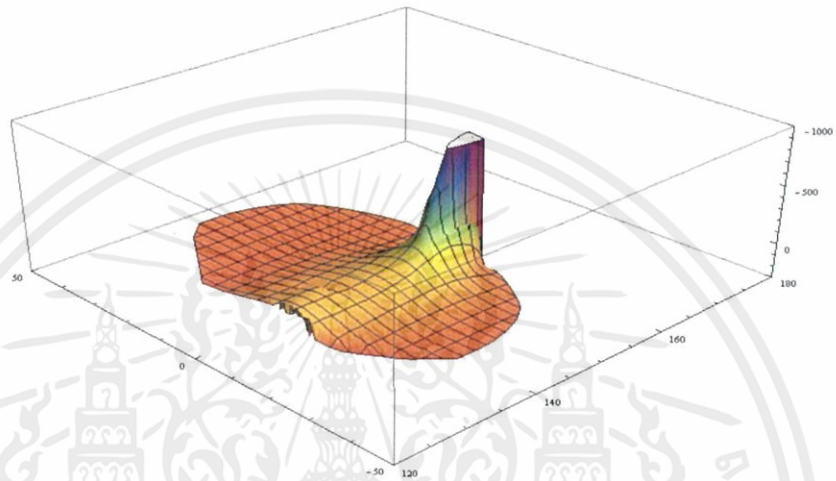
ภาพที่ 4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{12} และ arc length หลังการเจาะรูวง 18 mm.



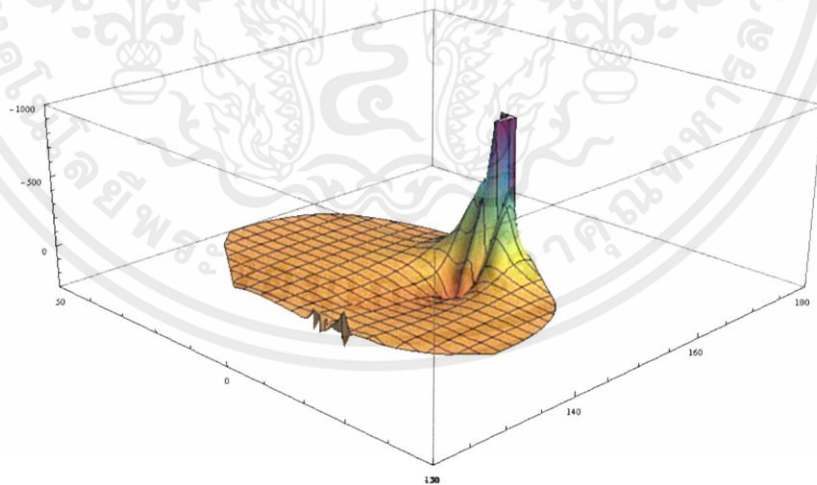
ภาพที่ 4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง vonmises stress และ arc length หลังการเจาะรูวง 18 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การสัมพันธ์กันระหว่างล้อและรางหลังการเจียรราง 18 mm. โดยสนใจบริเวณหัวรางนำมาพลอตกราฟสามมิติ โดยกำหนดให้แกน x และ y ของกราฟ คือความยาวของรางตามแนวแกน x และ y ตามลำดับ และแกน z ของกราฟ คือค่า σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} และ vonmises stress ซึ่งมีดังนี้

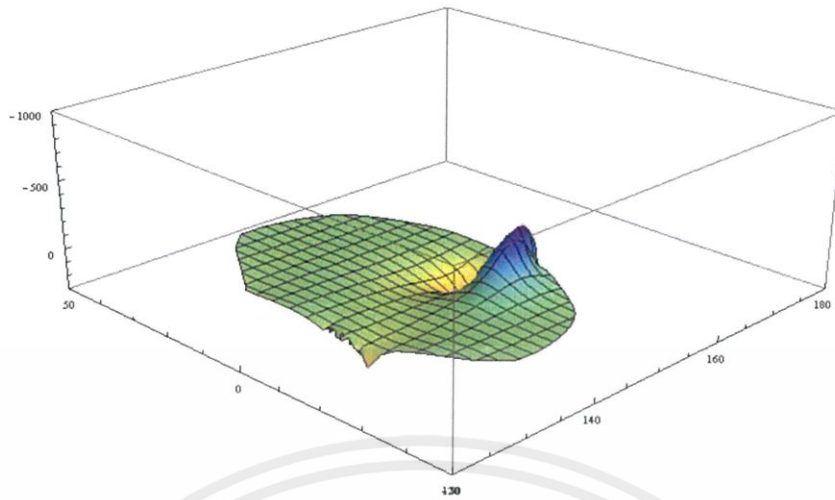


ภาพที่ 4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{22} และ arc length หลังการเจียรราง 18 mm.

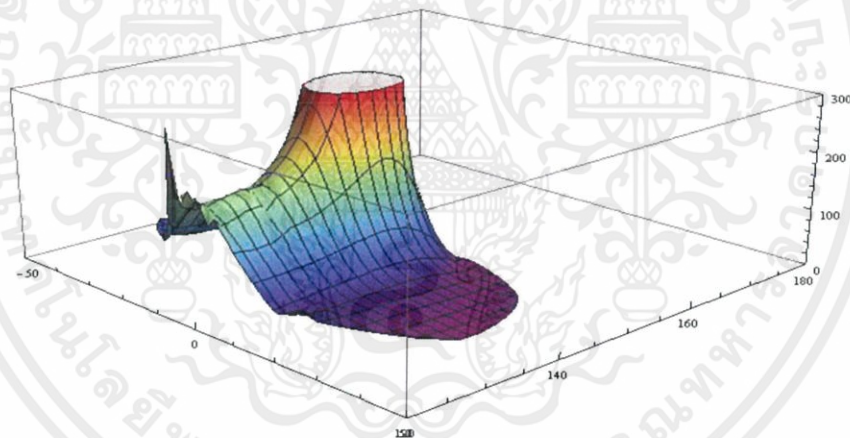


ภาพที่ 4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{11} และ arc length หลังการเจียรราง 18 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



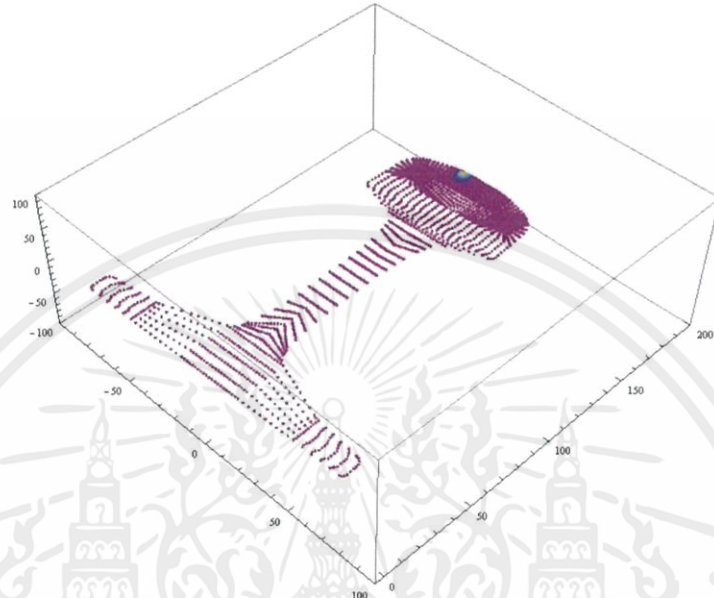
ภาพที่ 4.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง σ_{12} และ arc length หลังการเจียรรัง 18 mm.



ภาพที่ 4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง vonmises stress และ arc length หลังการเจียรรัง 18 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การศึกษาผลการวิเคราะห์การสัมพันธ์ระหว่างล้อและรางหลังสภาวะการเจียรรูาง โดยพิจารณาความเครียดหรือการเสียรูปอย่างถาวร



ภาพที่ 4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง plastic strain และ arc length

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและจำลองการสัมผัสกันระหว่างล้อและรางในรูปแบบสามมิติด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และเปรียบเทียบผลกับทฤษฎี เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการกระจายตัวของความเค้น และผลลัพธ์จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถประเมินอายุการใช้งานของรางได้ในอนาคต โดยสรุปผลได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองสามารถสรุปผลการวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อและรางในสภาวะก่อนและหลังเจียรรางได้ดังนี้

- 5.1.1 การวิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อและรางเป็นการศึกษาการกระจายตัวของความเค้น โดยพิจารณาว่า การสัมผัสระหว่างล้อและรางเป็นการสัมผัสแบบไม่สอดรับกัน
- 5.1.2 ผลลัพธ์ของการสัมผัสกันของล้อและรางหลังสภาวะการเจียรราง พบว่าความเครียดหรือการเสียรูปมีค่าน้อยมาก
- 5.1.3 การสัมผัสกันระหว่างล้อและรางไม่พิจารณาความเสียหายบนพื้นผิวของวัตถุทั้งสอง
- 5.1.4 รางเป็นวัตถุยืดหยุ่นและการเสียรูปในพื้นที่สัมผัสเป็นแบบยืดหยุ่น (elastic deformation)
- 5.1.5 ความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของความเค้นในสภาวะก่อนและหลังเจียรราง พบว่า ความเค้นมีค่าใกล้เคียงกันแต่ พลังงานในการเสียรูปมีค่าที่สูงขึ้นหลังการเจียรรางที่มีขนาดเพิ่มขึ้น ประมาณ 2.1 %

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีปัจจัยหลายด้านที่ทำให้การทดลองเกิดความคลาดเคลื่อน เนื่องจากการกำหนดค่าต่างๆในการตั้งค่าเริ่มต้นในแบบจำลองการสัมผัสกันระหว่างล้อและราง เช่น การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเริ่มต้น การเลือกใช้เอลิเมนต์ และการเลือกใช้เม็ช (Meshing) ซึ่งไม่สามารถกำหนดเงื่อนไขทั้งหมดให้เหมือนจริงทุกประการ ดังนั้นการนำวิธีการวิเคราะห์ทางระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์จึงต้องเข้าใจหลักการและเทคนิคต่างๆในการมาใช้ในการทดลองนี้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเป็นการเสนอแนะแนวทางในการนำไปพัฒนางานวิจัยเพื่อเป็นองค์ความรู้ หรือรูปแบบวิธีการวิจัยในระยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเริ่มต้นให้เหมือนจริงนั้นเป็นไปได้ยาก ดังนั้นการเลือกใช้ควรให้เหมาะสมกับแต่ละกรณีเพื่อให้การวิเคราะห์มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

5.2.2 การวิเคราะห์โดยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ ปัญหาของคอมพิวเตอร์เป็นปัญหาที่สำคัญในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ซับซ้อน ซึ่งในการวิเคราะห์ที่ให้ความแม่นยำสูงย่อมต้องการความละเอียดของเอลิเมนต์ที่สูงด้วย ดังนั้นทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะใช้เวลามาก เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวควรใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยความจำสูงขึ้นจะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้

5.2.3 งานวิจัยนี้วิเคราะห์การสัมผัสกันระหว่างล้อและรางในสภาวะสถิตย์ สามารถนำไปวิจัยต่อยอดโดยการวิเคราะห์การสัมผัสระหว่างล้อและรางในสภาวะพลศาสตร์ได้ในภายหลัง

5.2.4 งานวิจัยนี้ศึกษาการกระจายตัวของความเค้นของราง สามารถนำไปวิจัยต่อยอดโดยการวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นของล้อได้ในภายหลัง

5.2.5 งานวิจัยนี้สามารถเป็นต้นแบบแนวทางในการวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของรางได้ในภายหลัง

เอกสารอ้างอิง

- [1] จันทสร, น. (2555). "ช่างรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ โครงการพัฒนาระบบขนส่งทางรางและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องของประเทศไทย." สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2.
- [2] Esen., İ. and M. Eroğlu. (2015). "3D FINITE ELEMENT ANALYSIS OF UIC 60 RAIL AND UIC 515 WHEEL ROLLING CONTACT AND UNDERSTANDING STARTING MECHANISM OF WEAR."
- [3] Arslan, M.A. and O. Kayabaşı (2012). "3-D Rail–Wheel contact analysis using FEA." *Advances in Engineering Software* 45(1): 325-331.
- [4] YOUNG, W.C. and R.G. BUDYNAS (2002). "Roark's Formulas for Stress and Strain." McGraw-Hill: 689-705.
- [5] Budynas, R.G. and J.K. Nisbett (2011). "Shigley's Mechanical Engineering Design " McGraw-Hill Ninth Edition.