



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การคาดการณ์ความเสียหายของรางรถไฟภายใต้ภาระกระทำซ้ำๆจากผลการวิเคราะห์
ของไฟไนต์เอลิเมนต์

โดย นายอัศวิน ขอดรักษ์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

21 พฤษภาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายประสิทธิ์ เกิดนิม)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วัจจะตรากุล)

การคาดการณ์ความเสียหายของรางรถไฟภายใต้ภาระกระทำซ้ำๆ
จากผลการวิเคราะห์ของไฟไนต์เอลิเมนต์

นายอัศวิน ขอศรีรักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายอัศวิน ขอดรักษ์
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การคาดการณ์ความเสียหายของรางรถไฟภายใต้ภาระกระทำซ้ำๆจากผล
การวิเคราะห์ของไฟไนต์เอลิเมนต์
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาปประสิทธิ์ เกิดนิยม
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการแก้ปัญหาการคาดการณ์ความเสียหายที่วัสดุรางรถไฟที่รับภาระ
แบบกระทำซ้ำๆ โดยใช้กรณีศึกษาการรับน้ำหนักของรางรถไฟในประเทศไทย

ในการดำเนินงานวิจัย ใช้วัสดุทำรางรถไฟคือเหล็กกล้า 70A ,เหล็กกล้า 80A และเหล็กกล้า
JIS S45C ซึ่งเป็นวัสดุโลหะที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป โดยทำการตรวจสอบความแข็ง
ตรวจสอบโดยสร้างจุดภาคตรวจสอบหาชั้นแข็งลึก และตรวจสอบความล้าแบบหมุนดัด (Rotating
Bending) เพื่อยืนยันผลการทดลองจากนั้นทำการจำลองการรับแรงของรางรถไฟ ด้วยโปรแกรม
ไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาความเค้นสูงสุด – ต่ำสุด แล้วทำการออกแบบรางรถไฟโดยใช้เหล็กกล้า JIS
S45C ให้สามารถรับน้ำหนักให้ได้ใกล้เคียงกับเหล็กกล้า 80A เหล็กกล้า 70A

ผลการทดลองพบว่า คุณสมบัติของวัสดุเหล็กกล้า JIS S45C มีค่าต่ำกว่าเหล็กรางรถไฟ 70A
และ80A แต่สามารถรับน้ำหนักได้ใกล้เคียงกับเหล็กกล้ารางรถไฟ 70A และ80A และมีอายุการล้า
ใกล้เคียงกัน

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 76 หน้า)

คำสำคัญ : วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์,การคาดการณ์อายุความล้า , การทดสอบความล้า



อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr.Aswin Yodrux
Thesis Title : Failure Prediction of Railway Under Cyclic Loading form Result
of Finite Element Analysis.
Major Field : Mechanical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Assistant Professor Dr.Saiprasit Koethniyom
Academic Year : 2006

Abstract

This thesis present failure prediction of metallic material by cyclic loading by case study of loading on railway in Thailand.

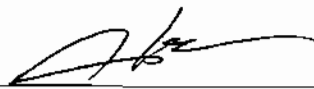
In this case study , the railway was constructed from 70A and 80A steel. JIS S45 C steel has been chosen to replace 70A and 80A steel. This steel can be found in great quantities in Thailand. So it can be bought easily. Gathering work – piece would be carefully checked rotating bending check in order to confirm the experiment.

In order to making the simulation of railway force condition by using Finite Element Analysis of metal fatigue testing for evaluate the maximum and minimum stress. After that design the railway by JIS S45C steel can be able to accept the load while similar to 70A and 80A steel.

As the experimental results , the material properties of JIS S45C Steel are less than 70A and 80A steel. But can be able expanded to accept the load and fatigue life while similar to 70A and 80A railway type.

(Total 76 pages)

Keywords : Finite Element Analysis (FEA) , Failure Prediction, Fatigue Testing



Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ต้องผ่านอุปสรรคต่าง ๆ มากมายหลายประการต้องระลึกถึงคุณานุภาพของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือและใคร่ขอขอบคุณบุคคลดังจะกล่าวต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สายประสิทธิ์ เกิดนิยม ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือให้คำปรึกษาแก้ไขปัญหารวมไปถึงมอบโอกาสให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย วัจนะตราชกุล ที่สละเวลาอันมีค่ามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์รวมถึงให้คำแนะนำในการเขียนวิทยานิพนธ์ ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ครู อาจารย์ทุก ๆ ท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในแขนงต่าง ๆ จนกระทั่งทำให้มีความรู้ ความเข้าใจในการวางแผนทาง และดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาเทคโนโลยีขนถ่ายวัสดุที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ เครื่องคอมพิวเตอร์ สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ การรถไฟแห่งประเทศไทยที่อนุเคราะห์ข้อมูลและวัสดุสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และเจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัยทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในระหว่างการทำงานวิจัย และขอขอบคุณผู้ให้ความช่วยเหลืออีกหลายท่านที่มีได้กล่าวนามไว้ ณ. ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ พี่ๆ และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้อำลัใจ คอยคำปรึกษาและคอยกระตุ้นเป็นระยะๆ ช่วยทำให้งานวิจัยสามารถดำเนินไปได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ ภรรยา และบุตรที่เป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มาโดยตลอด

ทั้งนี้ประ โยชน์ และคุณค่าของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบแก่ บิดา และ มารดา ที่ให้กำเนิด เลี้ยงดู ให้กำลังใจในการทำงานและให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน โดยมาตลอด

อัศวิน ขอดรักษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ประวัติความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ลำดับขั้นตอนในการทำวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 ทฤษฎีที่สำคัญ	5
2.3 ผลกระทบอื่นที่มีต่อการทดสอบ	13
2.4 สมการพื้นฐานของทฤษฎียืดหยุ่นของวัสดุ	18
2.5 ทฤษฎีความเสียหายเนื่องจากการล้า	26
2.6 พื้นฐานไฟไนต์เอลิเมนต์	28
2.7 ขั้นตอนการคำนวณจะแยกตามวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)	28
2.8 การสร้างรูปแบบคณิตศาสตร์	29
2.9 การสร้างชิ้นส่วนแบบแบ่งเอลิเมนต์	30
2.10 เอลิเมนต์	30
2.11 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์	37
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	38
3.1 ขั้นตอนการตรวจสอบวัดความถี่กัมมันต์	39
3.2 ขั้นตอนการทดสอบความล้า	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การตั้งสมมุติฐานการวิเคราะห์ของรางรถไฟ	43
3.4 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองและการแบ่งเอลิเมนต์	45
บทที่ 4 ผลการทดลอง	47
4.1 ผลการทดสอบวัดค่า Yield Strength และค่า Tensile Strength ของโลหะ	47
4.2 ผลการทดสอบวัดชั้นแข็งลึก	48
4.3 ผลการทดสอบวัดความล้า	48
4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	52
4.5 การคำนวณอายุการล้าตัว	60
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	63
5.1 สรุปผลการทดลอง	63
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง	64
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก ก	67
เครื่องทดสอบความล้าและหน้าตัดรางรถไฟ	67
ภาคผนวก ข	73
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง และระยะยืด	73
ประวัติผู้วิจัย	76

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1 แสดงค่าคุณสมบัติของวัสดุทำรางรถไฟ	45
4-1 ค่า Yield Strength และค่า Tensile Strength ของโลหะทั้ง 3 ชนิดที่ได้จากการทดสอบ	47
4-2 แสดงผลการทดสอบวัดชิ้นแข็งลึก	48
4-3 แสดงผลการทดสอบหาจำนวนรอบความเสียหายวัสดุรางรถไฟ 80 A	49
4-4 แสดงผลการทดสอบหาจำนวนรอบความเสียหายวัสดุรางรถไฟ 70 A	49
4-5 แสดงผลการทดสอบหาจำนวนรอบความเสียหายวัสดุเหล็กกล้า JIS S45C	50
4-6 แสดงสมการความสัมพันธ์ของความถี่ของเหล็กทั้ง 3 ชนิด	52
4-7 แสดงผลการวิเคราะห์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการรองรับแบบยึดแน่นตลอด	53
4-8 แสดงผลการวิเคราะห์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการรองรับอย่างง่าย	53
4-9 แสดงผลการวิเคราะห์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคำนวณหาค่าอายุการใช้งานสำหรับการรองรับแบบยึดแน่นตลอด	61
4-10 แสดงผลการวิเคราะห์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคำนวณหาค่าอายุการใช้งานสำหรับการรองรับอย่างง่าย	62

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 แบบต่าง ๆ ของความเค้นเปลี่ยนแปลง	6
2-2 ขั้นตอนทดสอบโลหะสำหรับการทดสอบแบบ Rotating –Beam	7
2-3 ขั้นตอนทดสอบความเค้นเปลี่ยนแปลงดึง	8
2-4 แผนภาพแสดงการทดสอบความล้าแบบ Wöhler	8
2-5 แผนภาพแสดงการทดสอบความล้าแบบ Four-Point Loading Test	9
2-6 แผนภาพ S-N ของโลหะ	10
2-7 แผนภาพ S-N สำหรับโลหะเหล็กและโลหะไม่ใช่เหล็ก	10
2-8 แผนภาพแสดงพิกัดความล้า และพิกัดความทนทาน	11
2-9 ลักษณะของรอยแตกหักเนื่องจากความล้า	11
2-10 รอยแตกหักที่เกิดจากการล้า	12
2-11 การแตกหักของชิ้นทดสอบภายใต้ความเค้นเปลี่ยนแปลงต่างๆ	12
2-12 เอลิเมนต์ระนาบที่มีความเค้นกระทำ	19
2-13 เอลิเมนต์สามมิติภายใต้สภาวะความเค้น	20
2-14 การเปลี่ยนรูปของเอลิเมนต์	21
2-15 เอลิเมนต์สามมิติที่ความเค้นตั้งฉากกระทำ	24
2-16 ขั้นตอนการคำนวณ	28
2-17 โมเดลเอลิเมนต์	29
2-18 ขั้นตอนแบบแบ่งเอลิเมนต์	30
2-19 เอลิเมนต์มิติเดียว	31
2-20 เอลิเมนต์ (ก) เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม(ข) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม	31
2-21 เอลิเมนต์ (ก) ชนิดปริซึม หรือชนิดทรงหกหน้า (ข) ชนิดกรวยสามเหลี่ยม หรือชนิดทรงสี่หน้า	32
2-22 (ก) เอลิเมนต์ทรงกระบอก (ข) เอลิเมนต์แผ่น โลหะสองมิติ (ค) เอลิเมนต์กรวยสมมาตร (สองมิติ)	33
2-23 เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมสองมิติที่ประกอบด้วยจุดต่อต่าง ๆ	33
2-24 การแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม	34
2-25 ตำแหน่งของจุดต่อที่สำคัญ	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-26 การแบ่งชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม	35
2-27 การแบ่งชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมโค้งออกเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมย่อย	36
2-28 การขยายขนาดของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม	36
3-1 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	38
3-2 แสดงตำแหน่งหน้าตัดชั้นทดสอบ	39
3-3 แสดงตำแหน่งทดสอบของส่วนที่ 1	40
3-4 แสดงตำแหน่งในการวัดความแข็งลึก	40
3-5 ขั้นตอนการทดสอบความล้า	41
3-6 หลักการเครื่องทดสอบความล้าแบบ โมเมนต์ดัดคงที่	41
3-7 ขั้นตอนทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน DIN 50125	42
3-8 แบบขั้นตอนทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน DIN 50125 (หน่วยมิลลิเมตร)	42
3-9 ขั้นตอนทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน DIN 50125	43
3-10 แสดงแบบจำลองการรับภาระของรางรถไฟแบบผิวสัมผัส	44
3-11 แสดงการรับภาระของรางรถไฟสูงสุดต่ำสุด	44
3-12 แสดงการแบ่งเอลิเมนต์แบบรูปทรงสี่เหลี่ยมสี่จุดต่อ	45
3-13 แสดงการกำหนดขอบเขตของปัญหาแบบฐานยึดแน่นตลอด (Fixed Support)	46
3-14 แสดงการกำหนดขอบเขตของปัญหาฐานรองรับอย่างง่าย (Simply Support)	46
4-1 กราฟ S-N Curve ของวัสดุรางรถไฟ เกรด 80 A	50
4-2 กราฟ S-N Curve ของวัสดุรางรถไฟ เกรด 70 A	51
4-3 กราฟ S-N Curve ของวัสดุเหล็กกล้าเกรด JIS S45C	51
4-4 กราฟเปรียบเทียบ S-N Curve ของวัสดุ รางรถไฟทั้ง 3 เกรด	52
4-5 แสดงผลการวิเคราะห์การโก่งของรางรถไฟที่ฐานถูกยึดแน่นตลอด	54
4-6 แสดงผลการวิเคราะห์การโก่งของรางรถไฟที่มีฐานรองรับอย่างง่าย	54
4-7 แสดงผลการวิเคราะห์ความเครียดหลักสูงสุดของรางรถไฟที่ฐานถูกยึดแน่นตลอด	55
4-8 แสดงผลการวิเคราะห์ความเครียดหลักต่ำสุดของรางรถไฟที่มีฐานรองรับอย่างง่าย	55
4-9 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลักต่ำสุดของรางรถไฟที่ฐานถูกยึดแน่นตลอด	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-10 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลักต่ำสุดของรางรถไฟที่ฐานรองรับ อย่างง่าย	56
4-11 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นหลักสูงสุดของรางรถไฟที่ฐานถูกยึดแน่นตลอด	57
4-12 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นหลักสูงสุดของรางรถไฟที่มีฐานรองรับอย่างง่าย	57
4-13 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นหลักต่ำสุดของรางรถไฟที่ฐานถูกยึดแน่นตลอด	58
4-14 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นหลักต่ำสุดของรางรถไฟที่มีฐานรองรับอย่างง่าย	58
4-15 แสดงผลการวิเคราะห์ Minimum Principal Strain ของรางรถไฟที่ฐานถูกยึดแน่น ตลอด	59
4-16 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นรวมของรางรถไฟที่มีฐานรองรับอย่างง่าย	59
ก-1 แสดงส่วนประกอบเครื่องทดสอบความล้า	68
ก-2 แสดงภาพประกอบเครื่องทดสอบความล้า	69
ก-3 แสดงภาพประกอบหน้าตัดรางรถไฟ 70A	70
ก-4 แสดงภาพประกอบหน้าตัดรางรถไฟขนาด 80A	71
ก-5 แสดงภาพฉายด้านหน้าของรางรถไฟหน้าตัด A-A	72
ก-6 แสดงภาพฉายด้านหน้าของรางรถไฟหน้าตัด B-B	72
ข-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง และระยะยืดของวัสดุรางรถไฟ 80A	74
ข-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง และระยะยืดของวัสดุรางรถไฟ JIS S45C	74
ข-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง และระยะยืดของวัสดุรางรถไฟ 70A	75

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
S_r	ความแข็งแรงต่อการล้า
a, b	ค่าคงที่ของวัสดุ
N	จำนวนรอบการใช้งาน
σ_{max}	ความเค้นสูงสุดในไซเคิล
σ_{min}	ความเค้นต่ำสุดในไซเคิล
σ_m	ความเค้นเฉลี่ย
σ_a	แอมพลิจูดของความเค้นสลับ
σ_F	ความเค้นล้า
σ_{ba}	ความเค้นดัดสลับ
W_b	โมดูลัสภาคดัด
M_b	โมเมนต์ดัด
F	แรงที่ใช้ในการทดสอบ
d	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นทดสอบ
l	ความยาว
E	โมดูลัสยืดหยุ่น
σ	ความเค้นดึงฉาก
τ	ความเค้นเฉือน
γ	ความเครียดเฉือน
G	โมดูลัสเฉือน
$[D]$	เมทริกซ์กำลังสองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น - ความเครียด

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ประวัติความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาในทางวิศวกรรมจำนวนไม่น้อยที่วิศวกรจะต้องเข้าไปทำการศึกษาพร้อมทั้งหาทางแก้ไขมิสาเหตุของปัญหาเกิดขึ้นเนื่องจากการแปรเปลี่ยนภาระแรงกระทำซ้ำๆ ที่เรียกว่าการแตกหักเนื่องจากความล้า (Fatigue) การศึกษาเรื่องความล้าจึงมีความสำคัญมากในการทำนายอายุความล้าของชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ นั้นสิ่งหนึ่งที่มีผลต่อความแม่นยำในการทำนายก็คือ ความเหมาะสมในการจำลองสภาวะในสภาพการใช้งานจริงมายังสภาวะของภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบแต่เนื่องจากการระบุลักษณะของภาระแบบแอมปีจูดคงที่นั้นจำเป็นต้องกำหนดตัวแปรแอมปีจูดภาระทำให้เกิดปัญหาว่าจะต้องกำหนดภาระกับชิ้นงานเท่าใดจึงจะให้ผลลัพธ์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ใกล้เคียงที่สุด เพราะส่วนใหญ่แล้วเราไม่สามารถจะทำการทดสอบที่ภาระเท่ากับของจริงได้ซึ่งการที่เราสามารถทำการประเมินอายุของชิ้นส่วนอันจะเป็นประโยชน์ในด้านการบำรุงรักษาและด้านการผลิตเพราะสามารถวางแผนการทำงานล่วงหน้าได้ เช่นการบำรุงรักษาประจำปี และการวางแผนการผลิต เป็นต้น

งานวิจัยนี้ได้มีการจำลองเหตุการณ์ของปัญหาที่เกิดขึ้นจากการแปรเปลี่ยนภาระกระทำซ้ำของรางรถไฟโดยมีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์และทำนายอายุการล้าตัวของรางรถไฟโดยการจำลองเหตุการณ์การเลือกใช้วัสดุ 3 ชนิดคือ วัสดุรางรถไฟชนิด 70A , วัสดุรางรถไฟชนิด 80A และวัสดุที่สามารถซื้อขายได้ในประเทศไทย JIS S45C และเลือกใช้หน้าตัดรางรถไฟ 2 แบบคือ หน้าตัดแบบ A-A (ภาคผนวกภาพที่ ก-5) และหน้าตัดแบบ B-B (ภาคผนวกภาพที่ ก-6) เป็นหน้าตัดหลักในการวิเคราะห์ การดำเนินงานวิจัยนี้เลือกใช้การทดสอบการล้าตัวของวัสดุโลหะด้วยเครื่องทดสอบความล้าแบบรับ โมเมนต์คด (ภาคผนวกภาพที่ ก-1) เปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสามารถแบ่งขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อจำลองเหตุการณ์ออกเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลพื้นฐาน (Pre-Processing), ขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาผลเฉลย (Analysis Processing) และขั้นตอนการแสดงผลข้อมูล (Post Processing) ขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลพื้นฐานของปัญหาที่ต้องการจะนำมาวิเคราะห์ประกอบไปด้วย ข้อมูลการกำหนดตำแหน่งรูปทรงของโครงสร้าง, ข้อมูลเกี่ยวกับค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่กำลังทำการวิเคราะห์ปัญหา, ข้อมูลเกี่ยวกับการกำหนดตำแหน่งพร้อมกับขนาดและทิศทางของแรงกระทำ, ข้อมูลเกี่ยวกับการกำหนดขอบเขตของปัญหาที่ทำการวิเคราะห์ และข้อมูลการแบ่งโครงสร้างเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ

พร้อมทั้งกำหนดชนิดของอิเล็กเมนต์ที่นำมาใช้อธิบายพฤติกรรมของตัวแปรที่ต้องการทราบแล้ว จำลองเหตุการณ์อธิบายการเกิดความเค้นอันเนื่องมาจากการรับน้ำหนัก แล้วคำนวณหาค่าจำนวนรอบความเสียหายของวัสดุด้วยเครื่องทดสอบความล้าเปรียบเทียบกับกันเพื่อให้ได้ผลที่สอดคล้องกัน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ เหล็กเกรด JIS S45 C , เหล็กแรงรถไฟเกรด 70A และเหล็กแรงรถไฟเกรด 80A

1.2.2 เพื่อศึกษา และเปรียบเทียบการล้าตัวของวัสดุโลหะทั้ง 3 ชนิด อันเนื่องมาจากการรับน้ำหนักทำให้เกิดความเค้นกระทำซ้ำๆ ด้วยเครื่องทดสอบความล้าชนิดรับโมเมนต์ดัด

1.2.3 เพื่อศึกษา และเปรียบเทียบการล้าตัวของวัสดุโลหะทั้ง 3 ชนิด อันเนื่องมาจากการรับน้ำหนักทำให้เกิดความเค้นกระทำซ้ำๆ ด้วยด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิเล็กเมนต์ จำลองเหตุการณ์อธิบายการเกิดความเค้นอันเนื่องมาจากการรับน้ำหนักของรางรถไฟ

1.2.4 เพื่อวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของวัสดุรางรถไฟของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เหล็กเกรด JIS S45 C , เหล็กแรงรถไฟเกรด 70A และเหล็กแรงรถไฟเกรด 80A

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ เหล็กเกรด JIS S45C , เหล็กแรงรถไฟเกรด 70A และเหล็กแรงรถไฟเกรด 80A

1.3.2 ศึกษาและเปรียบเทียบการล้าตัวของวัสดุโลหะทั้ง 3 ชนิด อันเนื่องมาจากการรับน้ำหนักทำให้เกิดความเค้นกระทำซ้ำๆ ด้วยเครื่องทดสอบความล้า

1.3.3 ศึกษาและเปรียบเทียบวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุโลหะทั้ง 3 ชนิดอันเนื่องมาจากการรับน้ำหนักทำให้เกิดความเค้นด้วยด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิเล็กเมนต์ จำลองเหตุการณ์อธิบายการเกิดความเค้นอันเนื่องมาจากการรับน้ำหนักกระทำของวัสดุ

1.3.4 วิเคราะห์หาอายุการใช้งานของวัสดุโลหะทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เหล็กเกรด JIS S 45 C , เหล็กแรงรถไฟเกรด 70A และเหล็กแรงรถไฟเกรด 80A

1.4 ลำดับขั้นตอนในการทำงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาวิธีการทดสอบ, วิธีการคำนวณหาค่าคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยพร้อมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ตามมาตรฐาน JIS ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

1.4.2 ทำการทดสอบหาข้อมูลเบื้องต้นแล้วคำนวณหาค่าคุณสมบัติที่ต้องการ

- 1.4.3 ศึกษาทฤษฎีการล้าตัวของวัสดุโลหะในสภาวะอีลาสติก
- 1.4.4 ศึกษาทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์ในสภาวะอีลาสติกของวัสดุโลหะ
- 1.4.5 ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์จำนวนรอบความเสียหายเนื่องจากความเค้นที่เกิดขึ้น
- 1.4.6 วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถเข้าใจถึงพฤติกรรมของการแปรเปลี่ยนค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุตัวอย่างที่นำมาทำการทดสอบ
- 1.5.2 สามารถเข้าใจถึงพฤติกรรมของความเค้นของวัสดุในสภาวะต่างๆ เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่ความเค้นเปลี่ยนแปลง
- 1.5.3 สามารถนำข้อมูลค่าคุณสมบัติทางกลที่ได้จากการทดลองไปใช้กับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในภายหลัง
- 1.5.4 สามารถนำโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ไปประยุกต์ใช้ เพื่อวิเคราะห์จำนวนรอบความเสียหายเนื่องจากความเค้นที่เกิดขึ้น
- 1.5.5 ผลการวิจัยสามารถเผยแพร่ และถ่ายทอดเทคโนโลยีให้แก่ผู้สนใจต่อไป

1.6 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1.6.1 เครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบมหภาค (Macro Hardness Tester)
- 1.6.2 เครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบจุลภาค (Micro Hardness Tester)
- 1.6.3 เครื่องทดสอบความต้านการล้าแบบโมเมนต์ดัดคงที่ (Constant Bending Moment)
- 1.6.4 เครื่องดัดชิ้นงาน
- 1.6.5 เครื่องเตรียมชิ้นทดสอบสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Metallography)
- 1.6.6 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)
- 1.6.7 เครื่องกลึง CNC
- 1.6.8 เครื่องคอมพิวเตอร์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tanel Telliskivi, Ulf Olf Olofsson, Ulf Sellgren and Patrik Kruse ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดความเสียหาย และการเกิดรอยแตกร้าวที่ผิวสัมผัสระหว่าง ล้อกับรางรถไฟ โดยใช้ การทดลองร่วมกับการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS Release 5.4 ซึ่งผล ปรากฏว่า ความเค้นดกค้ำงในตำแหน่งที่ผิวสัมผัสมากที่สุดระหว่างล้อและเพลาคงก่อให้เกิดความเค้น ดกค้ำงมากที่สุด [1]

Jun Feng ได้ทำการศึกษาถึง การทำนายความเสียหายจากการเริ่มแตกร้าวของรางรถไฟ เนื่องจากการกระโดยวิธีวิเคราะห์ระหว่างหน้าสัมผัส (Contact Body Analysis) ของรางรถไฟกับล้อ รถไฟ ด้วยการวิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งผลปรากฏว่าตำแหน่งที่เกิดความเค้นดกค้ำง มากสุดเกิดขึ้นบริเวณที่หน้าสัมผัสของล้อและรางสัมผัสกัน [2]

S.Farfan, C. Rubio-Gonyalez, T. Cervantes-Hernandez, G. Mesacque ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ รูปแบบการเสียหายของเหล็กกล้า AISI 8620 ในช่วงของการล้าตัวที่ช่วงความถี่สูง (High Cycle Fatigue) ลักษณะของผิวรอยหักของชิ้นทดสอบแสดงให้เห็นกลไกการแตกหักสองรูปแบบร่วมกัน คือการแตกหักแบบเปราะที่บริเวณผิวแข็งและการแตกหักแบบเหนียวที่เนื้อในของชิ้นทดสอบจาก การทดลองได้นำเอาผลไปใช้ปรับปรุงตัวแบบ Fatigue Crack Initiation Model Parameters (Coffin-Manson) เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนส่งกำลัง เช่น เพลลา และเฟือง [3]

Kenan Genel, Mehmet Demirkol ได้ทำการทดลองหาผลกระทบของความล้าชั้นผิวแข็งที่มี ต่อการรับภาระแบบล้าตัวของเหล็กกล้า AISI 8620 โดยทำการทดลองการล้าของชิ้นทดสอบที่มี ความล้าผิวแข็งต่างกัน ด้วยเครื่องทดสอบแบบ Rotating Bending Fatigue ผลการทดลองสรุปได้ว่า เมื่อความล้าชั้นผิวแข็งมากขึ้น ค่าความต้านทานการล้าตัวจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย [4]

H. Bomas, P. Mayr และ M. Schleicher ได้ทำการพัฒนาวิธีการคำนวณหาค่าขีดจำกัดการล้า ของชิ้นส่วนที่ผลิตจากเหล็กกล้าชุบผิวแข็งของชิ้นส่วนที่ทำการชุบผิวแข็งที่มีส่วนผสมทางเคมี ต่างกัน และความแข็งผิวต่างกัน โดยทดสอบด้วยการให้ภาระในช่วงที่ใกล้กับช่วงขีดจำกัดการล้า ที่คำนวณได้ การเริ่มต้นคำนวณต้องใช้ความรู้ในเรื่องของความแข็ง และคุณภาพผิว จากการ ประยุกต์ใช้ทฤษฎีความเสียหาย ทำให้สามารถคำนวณหาขีดจำกัดความล้าของชิ้นส่วนได้ใกล้เคียง

กับความเป็นจริงมากขึ้น แต่ในการวิจัยนี้ยังไม่สมบูรณ์เนื่องจากไม่ได้นำเอาองค์ประกอบของรูปร่างมาคิดด้วย [5]

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้อ้างอิงวิธีการของ Tanel Telliskivi , Ulf Olofsson , Ulf Sellgren and Patrik Kruse [1] และ Jun Feng [2] เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดสภาวะพื้นฐานเบื้องต้นในการรับภาระของรางรถไฟเป็นแบบผิวสัมผัสระหว่างล้อรถไฟและรางรถไฟ(Contact Body Analysis) โดยกำหนดให้ล้อรถไฟเป็นวัสดุแบบที่ไม่มีการเปลี่ยนรูปทรง(Rigid Body) แล้วทำการจำลองการรับน้ำหนักของรางรถไฟเพื่อหาความเค้นพอนมีสเชสสูงสุด (Von-Mises Stress) ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับการทดสอบคุณสมบัติวัสดุจริงจากการทดสอบความล้าโดยอาศัยวิธีการทดสอบความล้าของ S.Farfan, C. Rubio-Gonzalez, T. Cervantes-Hernandez, G. Mesaque [3] , Kenan Genel, Mehmet Demirkol [4] และ H. Bomar, P. Mayr และ M. Schleicher [5] เพื่อหาจำนวนรอบความเสียหาย และความต้านทานการล้า

2.2 ทฤษฎีที่สำคัญ

2.2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการล้าในวัสดุ [6]

การทดสอบความล้า เป็นการทดสอบประเภทแรงกระทำซ้ำๆ (Cyclic Load Test) ซึ่งเป็นการทดสอบที่แตกต่างจากการทดสอบอื่นๆ ที่กล่าวมาแล้ว เพราะแรงทดสอบจะทำให้เกิดความเค้นเปลี่ยนแปลงกระทำซ้ำๆ เป็นจำนวนมากครั้งจนกระทั่งชิ้นทดสอบเกิดความล้าและในที่สุดก็แตกหัก การทดสอบความล้าเป็นการทดสอบที่สำคัญ และนิยมใช้มากเพราะชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลส่วนมากที่ใช้ในงานวิศวกรรมเกิดการชำรุดเสียหายหรือแตกหักทำลายเนื่องจากความล้า เช่น เพลา ถ้าพิจารณาที่จุดๆ หนึ่งบนผิวของเพลาหมุน ภายใต้แรงคด แต่ในรอบที่เพลาหมุนไปจะเกิดความเค้นดึงและความเค้นอัดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลากระทำซ้ำๆ ไปเรื่อย จนทำให้มีรอยแตกเล็กๆ ซึ่งไม่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่าและยุ่งยากแก่การหาตำแหน่ง แม้จะใช้การเอ็กซ์เรย์ก็ตามรอยแตกนี้ก็จะเริ่มขยายขึ้นเรื่อยๆ และเร็วขึ้นขนาดหน้าตัดก็จะเล็กลงทำให้ค่าความเค้นเพิ่มขึ้น จนกระทั่งหน้าตัดที่เหลือขาดออกจากกันทันทีที่พื้นที่หน้าตัดที่ขาดจะแบ่งออกเป็นสองช่วงช่วงแรกเกิดจากการขยายรอยแตกช่วงที่สองขาดจากกันทันทีโดยช่วงนี้จะมีลักษณะคล้ายการขาดของวัสดุเปราะ เราอาจเรียกการชำรุดเสียหาย หรือแตกหักทำลายเนื่องจากความล้าได้อีกอย่างหนึ่งว่า การแตกหักแบบขยายตัว (Progressive Fracture)

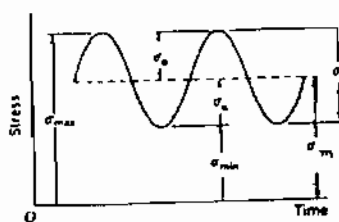
จากที่เขยทราบมาแล้วว่าความล้าทำให้โลหะหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต้องแตกหักขาด ทั้งๆ ที่แรงกระทำมีค่าน้อยกว่าความต้านทานแรงสูงสุด และบ่อยครั้งที่ค่าต่ำกว่าความเค้นคราก เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่า

2.2.1.1 วัสดุหรือโลหะเกิดความเครียดแข็ง ทำให้มีความแข็งแรงสูงขึ้น แต่ความเหนียวลดลง คือกลายสภาพจากวัสดุหรือโลหะเหนียวมาเป็นวัสดุ หรือโลหะเปราะซึ่งเชื่อว่าการชำรุดโดยความล้าเกิดขึ้นง่าย

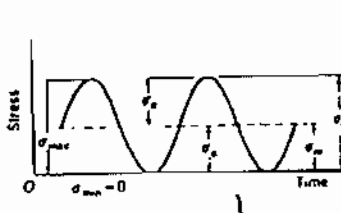
2.2.1.2 บริเวณผิวภายนอก และภายในเนื้อโลหะส่วนมาก จะมีจุดที่ผิดปกติ หรือ ไม่สมบูรณ์อยู่เสมอ เช่นบริเวณผิวอาจมีรอยขีดข่วน รอยตะไคร่ ร่อง บ่า หรือรอยมีดกลึงและภายในเนื้อโลหะเองก็อาจจะมีจุดหรือรอยแตกเล็กๆ ซึ่งอาจเกิดการเรียงตัวเป็นโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบของจุดเหล่านี้ จะมีการรวมกันของความเค้น กล่าวคือความเค้นที่บริเวณนี้จะมีมากกว่าปกติ ซึ่งเชื่อว่าการชำรุด โดยความล้าเกิดขึ้นได้ง่ายเหมือนกัน

2.2.2 ความเค้นเปลี่ยนแปลง (Variable Stress)

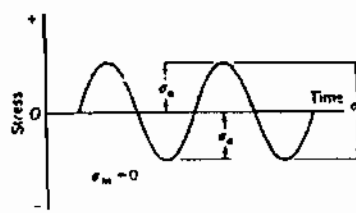
ความเค้นเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลนั้น เนื่องจากมีแรงมากระทำ เป็นจังหวะ (Cyclic Load) ซึ่งอาจจะเป็นเนื่องจากการหมุน หรือเนื่องจากการสั่นของชิ้นส่วนเครื่องจักรเหล่านั้นด้วยเหตุนี้เองจึงเกิดความเค้นเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งมีชนิดต่าง ๆ กัน โดยทั่วไป สมมุติว่าความเค้นเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมาเป็นรูป Sine Curve ดังภาพที่ 2-1



a) ความเค้นขึ้นลง



b) ความเค้นซ้ำ



c) ความเค้นกลับ

ภาพที่ 2-1 แบบต่างๆของความเค้นเปลี่ยนแปลง

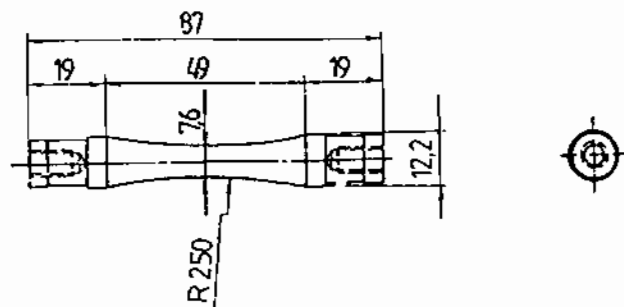
2.2.2.1 ความเค้นขึ้นลง (Fluctuating Stress) เป็นความเค้นขึ้นลงทิศทางเดียว จะมี ความเค้นแอมพลิจูดน้อยกว่าความเค้นเฉลี่ย ความเค้นเปลี่ยนแปลงแบบนี้เหมือนลักษณะความเค้น ที่เกิดในสปริงชนิดแบบกดของลิ้นไฮดรอลิก หรือไฮดรอลิก ซึ่งติดตั้งไว้ด้วยแรงกดเบื้องต้นจำนวนหนึ่ง และ เมื่อลิ้นเปิดก็จะถูกแรงกดไปอีกจำนวนหนึ่ง

2.2.2.2 ความเค้นซ้ำ (Repeated Stress) เป็นความเค้นซ้ำศูนย์ โดยเปลี่ยนแปลงจากศูนย์ ถึงค่าสูงสุดในแต่ละครั้งที่แรงกระทำจะมีความเค้นแอมพลิจูดเท่ากับความเค้นเฉลี่ยความเค้นเปลี่ยนแปลงแบบนี้ เหมือนลักษณะความเค้นที่เกิดขึ้นจากการขบแต่ละครั้งของฟันเฟือง

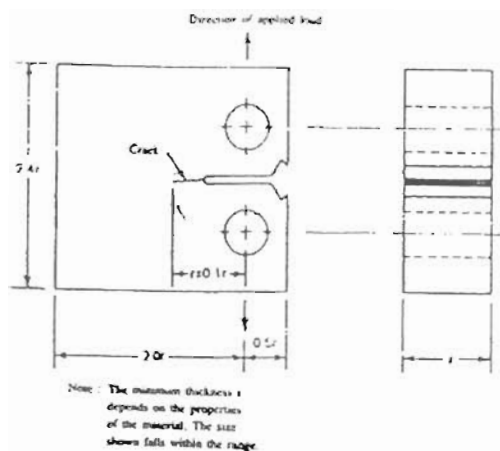
2.2.2.3 ความเค้นกลับ (Reversed Stress) เป็นความเค้นกลับไปกลับมาโดยสมบูรณ์ทำให้ ค่าความเค้นเฉลี่ยที่มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยจะสังเกตเห็นว่าความเค้นดึงมีเครื่องหมายบวก และความเค้นอัดมีเครื่องหมายลบความเค้นเปลี่ยนแปลงแบบนี้เหมือนกับความเค้นที่เกิดขึ้นบนผิวเพลลาหมุน ภายใต้แรงคงที่สำหรับโลหะส่วนมากที่ได้รับ ความเค้นเปลี่ยนแปลงแบบความเค้นอัดอย่างเดียวคือ กดหรืออัดแล้วปล่อยสลับกันโดยไม่มีการดึงก็จะทนแรงอยู่ได้นานตรงกันข้ามถ้าได้รับความเค้นเปลี่ยนแปลงแบบความเค้นอัด และดึงสลับกันโดยมีแรงอัดและแรงดึงเท่าๆกัน โลหะจะเกิดการล้า ได้ง่ายที่สุด เพราะในกรณีนี้ โครงสร้างผลึกของโลหะจะต้องเคลื่อนไหวยาวกว่า การได้รับความเค้นเปลี่ยนแปลงแบบอื่น

2.2.3 ขั้นตอนทดสอบ

เนื่องจากการทดสอบความล้ามีอยู่หลายแบบ แล้วแต่ลักษณะของความเค้นเปลี่ยนแปลงที่ต้องการทดสอบ และวัสดุที่จะทดสอบ ดังนั้นขั้นตอนทดสอบจึงถูกกำหนดให้มีขนาดและลักษณะ ต่างๆกัน นอกจากนั้นผิวของชิ้นทดสอบต้องเรียบไม่มีรอยขีดข่วนหรือร่องปรากฏให้เห็น เพื่อ ป้องกันไม่ให้เกิดการรวมความเค้นขึ้นที่ผิวของชิ้นทดสอบ ซึ่งจะเป็นผลทำให้ได้ผลการทดสอบ ไม่ละเอียดถูกต้องตามความเป็นจริง สำหรับตัวอย่างของขั้นตอนทดสอบความล้าดังภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 ขั้นตอนทดสอบโลหะสำหรับการทดสอบแบบ Rotating-Beam



ภาพที่ 2-3 ชิ้นทดสอบแบบความเค้นเปลี่ยนแปลงคิง

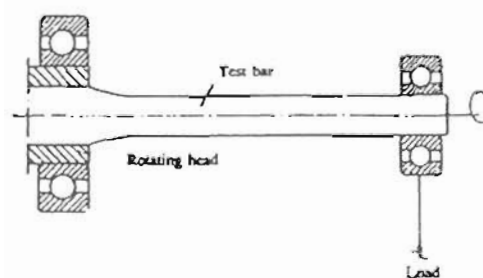
สำหรับชิ้นทดสอบตามภาพที่ 2-3 นี้ โดยทั่วไปจะใช้ทดสอบเพื่อศึกษาการเกิดรอยร้าว หรือ รอยแตกเล็กๆ ที่ร่องบาก ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้เสมอในงานตกแต่งด้วยเครื่องจักร

2.2.4 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบความล้าก็มีหลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะความเค้นเปลี่ยนแปลงที่ทดสอบแต่วิธีที่ทดสอบได้สะดวกและนิยมซึ่งจะกล่าวต่อไปนี้คือวิธีการทดสอบแบบWöhler และวิธีการทดสอบแบบ Four-Point Loading

2.2.4.1 วิธีการทดสอบแบบ Wöhler

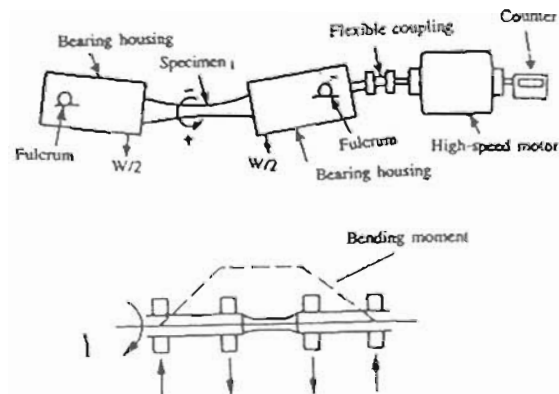
การทดสอบความล้าโดยวิธีของ Wöhler บางที่เรียกว่า Rotating Cantilever Test ซึ่งเรียกตามลักษณะการจับยึดชิ้นทดสอบ คือปลายของชิ้นทดสอบข้างหนึ่งจะถูกจับบนหัวจับที่หมุนส่วนปลายอีกข้างหนึ่งจะมีแรงกด ดังนั้นเมื่อชิ้นทดสอบเปลี่ยนกลับไปกลับมาระหว่างความเค้นดึงกับความเค้นอัดการทดสอบวิธีนี้ใช้ทดสอบกับวัสดุหลายประเภทและที่ระดับความเค้นต่างๆกัน



ภาพที่ 2-4 แผนภาพแสดงการทดสอบความล้าแบบ Wöhler

2.2.4.2 วิธีการทดสอบแบบ Four-Point Loading

การทดสอบความล้าโดยวิธีนี้เป็นที่นิยมมาก เพราะชิ้นทดสอบอยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดล้วนๆ ไม่มีการเฉือนขาดบนชิ้นทดสอบ การทดสอบต้องใช้เครื่องทดสอบความล้าตามภาพที่ 2-6 ซึ่งสร้างโดย R.R Moore และชิ้นทดสอบตามภาพที่ 2-2 จะถูกนำไปจับยึดบนหัวจับให้ได้ศูนย์ตามแนวแกน

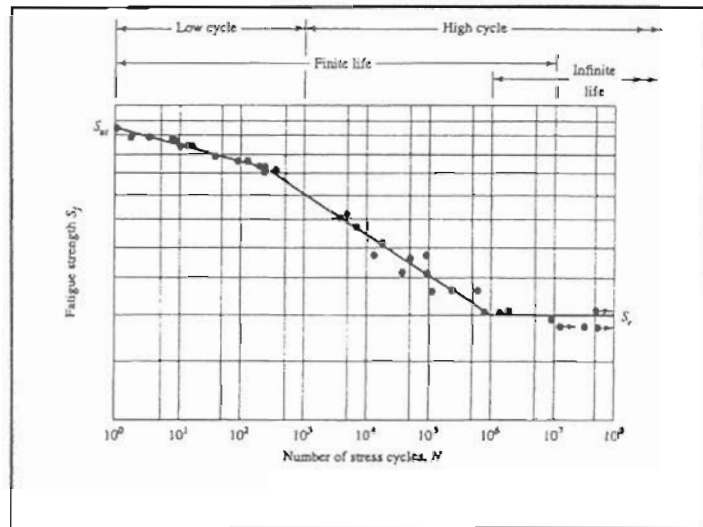


ภาพที่ 2-5 แผนภาพแสดงการทดสอบความล้าแบบ Four-Point Loading Test

ในการทดสอบเมื่อใส่แรงกระทำคงที่แล้วให้มอเตอร์หมุนเฉพาะชิ้นทดสอบรอบตัวเอง โดยแรงหรือน้ำหนักที่กระทำไม่หมุนก็จะทำให้ผิวด้านบนของชิ้นทดสอบได้รับความเค้นอัด และส่วนผิวด้านล่างจะได้รับความเค้นดึงกลับไปกลับมาหุ้รอบที่ชิ้นทดสอบหมุนต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนออกจากกัน

2.2.5 ผลการทดสอบ

การทดสอบความล้าทั้งสองวิธีที่กล่าวมาแล้ว ทำให้ได้ผลการทดสอบที่เป็นประโยชน์มากในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ภายใต้ความเค้นเปลี่ยนแปลง นอกจากนั้นยังทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของวัสดุในด้านความต้านทานการล้า และพิกัดความทนทาน (Fatigue Strength and Endurance Limit) อีกด้วยเพราะในการทดสอบความล้าจะมีการบันทึกจำนวนรอบที่ชิ้นทดสอบขาดขณะที่ได้รับค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นทดสอบก็ลดลงด้วย แล้วทำเช่นนี้หลายๆ ครั้งนำผลที่บันทึกไว้ไปพล็อตลงในกระดาษกราฟแบบล็อก โดยให้แกน x แทนจำนวนรอบ แกน y เป็นค่าความเค้นที่วัสดุเกิดการการชำรุดแตกหักเสียหายเนื่องจากความล้า กราฟนี้เรียกว่า แผนภาพ S-N ดังภาพที่ 2-6



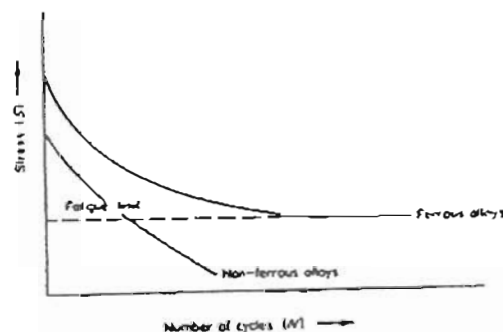
ภาพที่ 2-6 แผนภาพ S-N ของโลหะ

2.2.6 ข้อสังเกต

ข้อสังเกตในการทดสอบความล้า ส่วนมากจะพิจารณาจากผลการทดสอบเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีอยู่ด้วยกันดังนี้

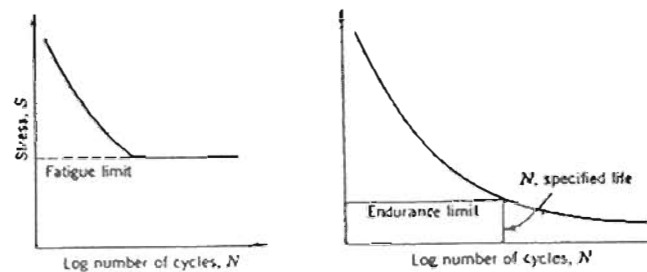
2.2.6.1 พิกัดความล้า และพิกัดความทนทาน

จากแผนภาพ S-N Curve ที่ได้กล่าวมาแล้วจะสังเกตเห็นว่าวัสดุบางชนิดซึ่งส่วนใหญ่เป็นโลหะจำพวกเหล็กเมื่อให้ได้รับความเค้นระดับหนึ่ง การแตกหักชำรุดเสียหายเนื่องจากความล้าจะไม่เกิดขึ้นแม้ว่าขึ้นทดสอบจะถูกหมุนไปกี่รอบก็ตามที่ระดับความเค้นนี้เรียกว่า พิกัดความล้า (Fatigue Limit) แต่สำหรับโลหะที่ไม่ใช่เหล็กเช่น อลูมิเนียม และทองแดงจะไม่เกิดพิกัดความล้า แสดงให้เห็นในการทดสอบ ดังภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 แผนภาพ S-N สำหรับโลหะเหล็กและโลหะไม่ใช่เหล็ก

ดังนั้นเมื่อทดสอบความล้ากับโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก จึงไม่สามารถระบุค่า ความต้านทานการล้า (Fatigue Strength) ได้ อย่างไรก็ตามถ้าจะใช้ ก็สามารถกำหนดได้จากพิกัดความทนทาน (Endurance Limit) ของวัสดุนั้น ดังภาพที่ 2-8

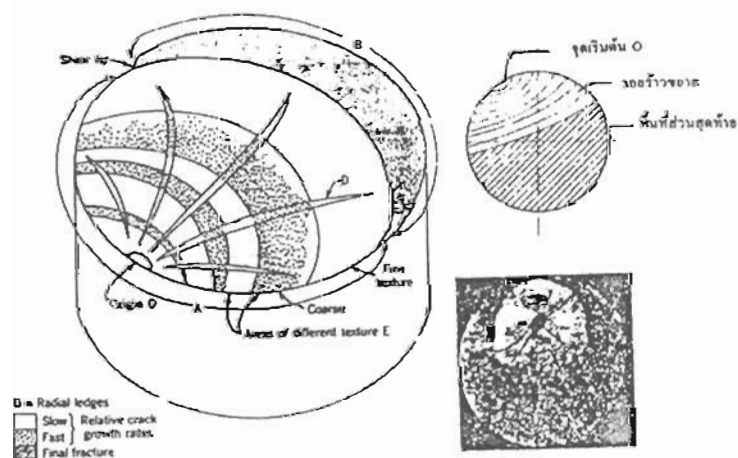


ภาพที่ 2-8 แผนภาพแสดงพิกัดความล้าและพิกัดความทนทาน

จากภาพที่ 2-8 จะเห็นว่าถ้าได้รับความเค้นสูงสุดระดับหนึ่งที่ความเร็วรอบหมุนกำหนดแล้ว ไม่ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการชำรุดแตกหักเสียหายเนื่องจากความล้าที่ระดับความเค้นสูงสุดนี้เรียกว่า พิกัดความทนทาน (Endurance Limit or Endurance Fatigue) ดังนั้นการระบุค่าความต้านทานการล้า ของโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก มักจะมีตัวเลขแสดงจำนวนรอบ (N) ประกอบอยู่ด้วยเสมอ

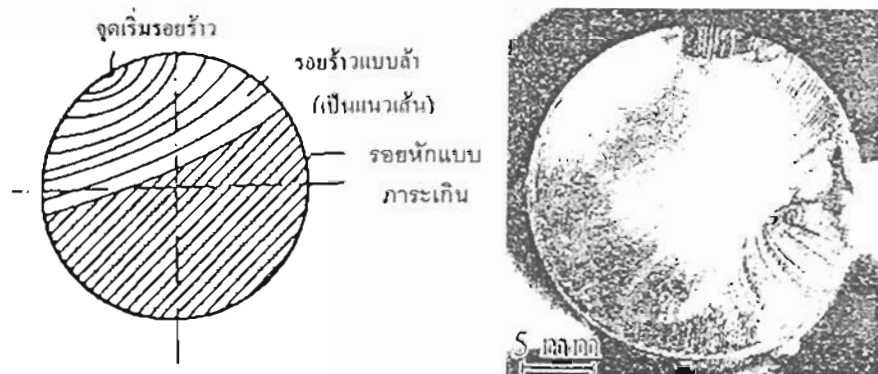
2.2.6.2 การแตกหักเนื่องจากความล้า

ตามที่ได้ทราบมาแล้วชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลหรือชิ้นทดสอบที่ชำรุดเสียหายและแตกหัก เนื่องจากความล้า นั้นจะเกิดขึ้นทันทีทันใด โดยไม่มีการเตือนให้รู้ล่วงหน้าและถ้าพิจารณาลักษณะ รอยแตกหักเนื่องจากความล้า นั้น สามารถอธิบายด้วยแผนภาพ ดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 ลักษณะของรอยแตกหักเนื่องจากความล้า

จากภาพที่ 2-9 จะเห็นว่า การแตกหักเนื่องจากความล้าจะเริ่มที่รอยแตกร้าเล็ก ๆ บนผิวที่จุดเริ่มต้นแล้วแผ่ขยายออกไปเรื่อยๆ จนถึงขอบเขตพื้นที่ A ลักษณะรอยแตกร้าส่วนนี้จะมีผิวเรียบและผิวมันมากกว่าขอบเขตพื้นที่ B ซึ่งพื้นที่แตกร้านี้จะมีผิวหยาบกว่าและเป็นพื้นที่ส่วนสุดท้ายที่ขาดจากกันทันที คล้ายกับการขาดของวัสดุเปราะ



ภาพที่ 2-10 รอยแตกหักที่เกิดจากการล้า

จากการศึกษาลักษณะของรอยแตกหักเนื่องจากความล้า เมื่อได้รับความเค้นเปลี่ยนแปลงแบบต่างๆ จะทำให้สามารถระบุขอบเขตของพื้นที่ซึ่งได้รับแรงกระทำและปริมาณความเค้นรวมที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นทดสอบได้อีกด้วย ดังตัวอย่างการทดสอบที่แสดง ดังภาพที่ 2-11

Type of fatigue stress Stress category	No stress concentration		Low stress concentration		High stress concentration	
	Light over-loading	Heavy over-loading	Light over-loading	Heavy over-loading	Light over-loading	Heavy over-loading
1) Pulsating flexural stress						
2) Alternating flexural stress						
3) Rotating bending stress						

Illustrations of different fatigue fractures caused by various types of flexural fatigue

ภาพที่ 2-11 การแตกหักของชิ้นทดสอบภายใต้ความเค้นเปลี่ยนแปลงต่างๆ

จากภาพที่ 2-11 จะเห็นว่า ถ้าไม่มีจุดรวมกันของความเค้นบริเวณความล้าจะมีรูปร่างโค้งนูน แต่ถ้ามีจุดรวมกันของความเค้นเพิ่มมากขึ้น บริเวณของความล้ากลับจะมีรูปร่างโค้งเว้าและขนาดของพื้นที่ส่วนสุดท้ายซึ่งขาดจากกันทันทีโดยพื้นที่นี้จะมีลักษณะคล้ายการขาดของวัสดุเปราะ ก็คือบริเวณที่แรงเอาไว้จะมีขนาดเพิ่มขึ้น ถ้ายังเพิ่มแรงกระทำนอกจากนั้นถ้าให้ชิ้นทดสอบได้รับความเค้นขึ้นลงและความเค้นกลับ จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวเล็กๆบนผิวชิ้นทดสอบทั้งสองด้านพร้อมกันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าบริเวณผิวส่วนใดของชิ้นทดสอบมีความเค้นสูงกว่าธรรมดา ก็จะทำให้บริเวณนั้นเริ่มต้นเกิดความล้าขึ้นดังกล่าวมาแล้ว

2.2.7 ความเร็วรอบหมุน

จากการทดสอบความล้าพบว่าความเร็วรอบในการหมุนชิ้นทดสอบ เพื่อทำให้เกิดแรงกระทำเป็นจังหวะนี้ไม่มีผลต่อค่าพิชิตความทนทานมากนัก โดยทั่วไปแล้วค่าพิชิตความทนทานจะสูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นแต่อัตราที่เพิ่มขึ้นเป็นส่วนเล็กน้อยมากปกติในการสอบจะใช้ความเร็วรอบระหว่าง 300-30,000 รอบต่อนาที

2.3 ผลกระทบอื่นที่มีต่อการทดสอบ

ในการทดสอบความล้าอาจมีความแปรปรวนในระหว่างการทดสอบ เนื่องจากสาเหตุหลายประการ แต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะชิ้นทดสอบเนื่องจากทำด้วยโลหะ คือถ้าเปลี่ยนแปลงส่วนผสมโครงสร้างเกรน , กรรมวิธีอบชุบ และขบวนการทำงานทางกลก็จะทำให้พิชิตความล้าเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.3.1 ธาตุผสม

ธาตุผสมในเหล็กกล้าเกือบทุกชนิดสามารถเพิ่มความแข็งแรงและพิชิตความล้าให้กับเหล็กกล้า ซึ่งไม่มีธาตุผสมใดที่เพิ่มพิชิตความล้าแล้วไม่เพิ่มความแข็งแรงโดยทั่วไปแล้วธาตุผสมต่างๆนอกจากคาร์บอนจะไม่มีผลกระทบต่อพิชิตความล้ามากเท่ากับโครงสร้างของเหล็กกล้านั้น

2.3.2 กรรมวิธีอบชุบ

กรรมวิธีอบชุบ หมายถึง กรรมวิธีทางความร้อนได้แก่ การชุบแข็ง การอบอ่อน การอบคืนไฟ และการอบคืนตัว กรรมวิธีอบชุบดังกล่าวนี้ ถ้าถูกนำมาเลือกใช้อย่างเหมาะสมก็ทำให้เพิ่มพิชิตความล้าได้ เช่น การอบคืนไฟชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งในสารชุบที่มีอุณหภูมิต่ำมาก (Refrigeration) จะทำให้พิชิตความล้า เพิ่มขึ้นมากกว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ได้ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าการชุบแข็งในสารชุบที่มีอุณหภูมิต่ำมากจะช่วยลดปริมาณออสเทนไนต์หลงเหลือได้ และในบางครั้งการชุบแข็งอาจจะทำให้เพิ่มแข็งแรงที่จุดครากแต่ไม่เพิ่มพิชิตความล้า เพราะว่าภายหลังการชุบแข็งอาจเกิดรอยร้าวเล็กๆหรือการลดปริมาณคาร์บอนในผิวเหล็กได้

นอกจากกรรมวิธีอบชุบแล้ว การทำผิวแข็งโดยวิธีคาร์บอนไรซ์ซึ่งไซยาไนด์ดิ่งใน ไตรคลิ่งและการชุบผิวแข็งด้วยเปลวไฟหรือกระแสเหนี่ยวนำ ล้วนแต่เพิ่มพิกัดความล้าหรือพิกัดความทนทานทั้งนั้น

2.3.3 การทำผิวให้มีความเค้นอัดตกค้าง

การทำผิวโลหะให้มีความเค้นอัดตกค้าง เมื่อนำโลหะส่วนนี้ไปใช้งานที่ต้องรับแรงกระทำเป็นจังหวะ เมื่อเกิดแรงกระทำเป็นแรงดึง แรงดึงที่เกิดขึ้นจะต้องเอาชนะความเค้นอัดที่ตกค้างตามผิวโลหะอยู่ก่อน ฉะนั้นแรงดึงที่กระทำบนผิวของโลหะนั้นจริงๆก็จะลดน้อยลงไป ซึ่งทำให้เกิดการล้าช้าลงไปด้วย ในทางตรงกันข้าม ถ้าแรงกระทำเป็นแรงอัด โลหะก็จะได้รับความเค้นอัดที่ผิวมากกว่าเดิม แต่โดยทั่วไปแล้วความเค้นอัดจะไม่ทำให้เกิดการล้าเนื่องจากความล้าได้ง่ายๆเหมือนกับความเค้นดึง ฉะนั้นชิ้นส่วนนั้นจะทนอยู่ได้นาน และสรุปได้ว่า การทำผิวให้มีความเค้นอัดตกค้างนั้นคือการทำ Shot Peening การรีดผิว และการชุบผิวแข็งตามที่ได้กล่าวมาแล้ว

การทำ Short Peening ทำได้โดยพ่นเหล็กหล่อสีขาวที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆกลมๆพ่นไปยังผิวชิ้นงาน ทำให้เกิดชั้นบางๆของความเค้นอัดตกค้าง พิกัดความล้าหรือพิกัดความทนทานจะสูงขึ้น สำหรับโลหะที่มีโซ่เหล็ก การรีดผิวบางครั้งจะทำให้เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้นของพิกัดความล้า น้อยกว่าเปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้นของความแข็งแรงดึง

2.3.4 ความเรียบผิว

ความเรียบผิวของชิ้นทดสอบจะมีผลกระทบโดยตรงต่อพิกัดความล้า หรือพิกัดความทนทาน กล่าวคือ ถ้าชิ้นทดสอบมีผิวหยาบ หรือมีผิวขรุขระ หรือมีรอยขีดข่วนเนื่องจากตะไคร่ หรือจากการตกแต่งด้วยเครื่องจักรความผิดปกติเหล่านี้จะมีผลทำให้พิกัดความล้าอาจลดลงประมาณ 15-20%

2.3.5 การกัดกร่อน

ถ้าผิวชิ้นทดสอบอยู่ในสิ่งแวดล้อม ที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน จะทำให้เกิดพิกัดความล้าหรือพิกัดความทนทานลดลง เนื่องจากความหยาบของผิว และสำหรับวิธีป้องกันหรือลดการกัดกร่อนทำได้หลายวิธีเช่นการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมแทนการใช้สารอินทรีย์เคลือบผิวซึ่งทำได้โดยใช้สีน้ำมัน วาร์นิช จาระบี แลคเกอร์ ทาเคลือบผิวไว้ นอกจากนั้นการใช้โลหะเคลือบผิว ก็เป็นวิธีที่นิยมเหมือนกัน การใช้โลหะเคลือบผิวเป็นวิธีการเคลือบผิวที่เกี่ยวข้องกับการใช้กระแสไฟฟ้า และสารละลายเคมีที่เป็นตัวนำไฟฟ้า โลหะเคลือบผิวนั้นอาจจะเป็น นิเกิล โครเมียม ทองแดง ดีบุก หรือสังกะสี เป็นต้น การเคลือบผิวด้วยวิธีนี้ ส่วนมากจะลดพิกัดความล้าหรือพิกัดความทนทานอาจลดลงประมาณ 40-50% แต่การลดลงเนื่องจากการเคลือบผิวอาจน้อยกว่าเนื่องจากการกัดกร่อน

2.3.6 ขนาดชิ้นทดสอบ

ขนาดของชิ้นทดสอบมีผลกระทบต่อพิถักความล้าหรือพิถักความทนทานมากจากการทดสอบปรากฏว่า ชิ้นทดสอบเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.5 มิลลิเมตร จะมีค่าพิถักความล้าต่ำกว่าชิ้นทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร ถึง 20% ดังนั้นชิ้นทดสอบยิ่งโตขึ้น โอกาสที่จะมีจุดบกพร่องบนผิวได้มากกว่าชิ้นทดสอบที่มีขนาดเล็ก

2.3.7 ค่าแฟกเตอร์แก้ไขตัวประกอบขีดจำกัดความทนทาน

ค่าเฉลี่ยความเค้นล้าของชิ้นงานจริง S_n สามารถประมาณค่าได้จากค่าขีดจำกัดความทนทาน S'_n ของตัวอย่างจากห้องปฏิบัติการดังนี้

$$S_n = S'_n \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5 \quad (2-1)$$

โดยที่

- K_1 = ตัวประกอบประเภทของภาระ
- K_2 = ตัวประกอบขนาดของชิ้นงาน
- K_3 = ตัวประกอบการปรับแต่งผิว
- K_4 = ตัวประกอบการปรับปรุงผิว
- K_5 = ตัวประกอบระดับความเชื่อมั่น

2.3.7.1 ค่าขีดจำกัดความทนทาน(Endurance Limit) , S'_n

ค่าขีดจำกัดความทนทาน S'_n ของวัสดุคือ ค่าความเค้นที่มากที่สุดที่กระทำต่อชิ้นงานโดยทำให้ชิ้นงานสามารถคืนรูปได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งอาจกระทำต่อชิ้นงานได้ซ้ำๆ โดยไม่จำกัดถ้าหากตัวอย่างมาตรฐานที่นำมาทดสอบมีการขัดผิวมาแล้ว โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อตัวอย่างจากการทดลองพบว่ามีความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกันในส่วน Static Properties ระหว่างค่าขีดจำกัดความทนทานและค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) สำหรับเหล็กกล้ามีค่าแรงดึงสูงได้ถึง 200,000 psi อัตราส่วนความล้า (Fatigue Ratio) ของค่าขีดจำกัดความทนทานต่อค่าแรงดึงสูงสุดมีค่าประมาณ 0.50 ในรูปแบบสมการต่อไปนี้

$$S'_n = 0.50S_u \quad (2-2)$$

สำหรับเหล็กหล่อค่าขีดจำกัดความทนทานมีค่าอยู่ระหว่าง 35 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของค่าแรงดึง แต่สำหรับอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมค่าขีดจำกัดความทนทานมีค่าประมาณ 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์

ของค่าแรงดึง ในกรณีที่ไม่สามารถหาค่าขีดจำกัดความคงทนจากการทดลองได้ สามารถนำความสัมพันธ์เหล่านี้มาใช้ในการหาค่าขีดจำกัดความคงทนได้เนื่องจากวัสดุที่ไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบนั้นไม่สามารถหาค่าขีดจำกัดความคงทนที่แท้จริงได้ โดยทั่วไปจะใช้จำนวนรอบกระทำที่ 10^8 หรือ 5×10^8

2.3.7.2 ตัวประกอบประเภทของภาระ, K_f

มีภาระที่เปลี่ยนแปลงได้อยู่ 3 ชนิดซึ่งส่งผลต่อการออกแบบชิ้นงาน คือ ภาระตามแนวแกน ภาระแบบดัดโค้ง และภาระแบบบิด โดยทั่วไปนั้นค่าขีดจำกัดความคงทนที่หาได้ถูกกำหนดมาจากตัวอย่างที่ถูกกระทำโดยภาระแบบดัดโค้ง ดังนั้นค่า Correction Factor จึงไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาสำหรับภาระประเภทนี้ เพราะฉะนั้น K_f (การดัดโค้งคืนรูป) = 1

อย่างไรก็ตามพบว่า ค่าขีดจำกัดความคงทนของตัวอย่างที่ทำการขัดผิวและถูกกระทำโดยภาระตามแนวแกนนั้นจะมีค่าน้อยกว่าค่าขีดจำกัดความคงทนของตัวอย่างที่ถูกกระทำโดยภาระแบบดัดโค้ง แม้ว่าจะมีการกระจายของข้อมูลที่ได้มาในช่วงกว้าง เพื่อให้เป็นไปตามสมมุติฐานที่เหมาะสมพบว่า ค่าขีดจำกัดความคงทนของภาระตามแนวแกนคืนรูป (Reversed Axial) มีค่าน้อยกว่าค่าขีดจำกัดความคงทนของภาระแบบดัดโค้งคืนรูป (Reversed Bending) อยู่ 15 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น K_f (ภาระตามแนวแกนคืนรูป) = 0.85

การทดสอบความล้าในการบิดของเหล็กกล้าแสดงค่าขีดจำกัดความคงทนต่อการบิดของตัวอย่างที่ผ่านการขัดผิวโดยประมาณที่ 58 เปอร์เซ็นต์ของค่าขีดจำกัดความคงทนแบบดัดโค้ง K_f (การโหลดแบบบิดคืนรูป) = 0.58

เส้นโค้ง S-N แสดงข้อมูลของความเค้นล้า (Fatigue Strength) ทั้งส่วนที่มีการจำกัดและไม่จำกัดรอบกระทำ โดยเป็นไปตามความสัมพันธ์เชิงเส้นของกราฟ log-log ที่ 10^3 - 10^6 รอบ

ค่า Factor ของภาระที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้นเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบที่ 10^6 รอบ ส่วนผลของภาระที่ 10^3 รอบ มีดังนี้

1. สำหรับการดัดโค้งคืนรูปใช้ค่า $0.9S_u$
2. สำหรับภาระตามแนวแกนคืนรูปใช้ค่า $0.9S_u$
3. สำหรับภาระแบบบิดคืนรูปใช้ค่า $0.9S_u$

S_u คือ ค่าแรงเค้นสูงสุด หากข้อมูลเฉพาะของ S_u ไม่สามารถหาได้ ค่า S_u ที่ใช้จะมีค่า $0.82S_u$ สำหรับโลหะที่ไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบข้อมูลที่มีอยู่ค่อนข้างที่จะไม่สมบูรณ์แต่มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.75 โดยค่าที่ใช้จะอยู่ในช่วง 0.66 ถึง 0.88

2.3.7.3 ตัวประกอบขนาดของชิ้นงาน, K_2

สำหรับภาระแบบดัดโค้งและแบบบิดค่าความเค้นล้ามีแนวโน้มที่ลดลงตามขนาดของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นเส้นลวดมีขีดจำกัดความทนสูงกว่าตัวอย่างที่นำมาทดสอบสำหรับตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่มากกว่าตัวอย่างมาตรฐานค่าความเค้นล้าลดลงประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 0.5 นิ้ว จนกระทั่งเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเพิ่มขึ้นถึง 2 นิ้ว ค่าของมันจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในกรณีที่เป็นภาระตามแนวแกนขนาดของชิ้นงานจะไม่มีผลต่อค่าความเค้นล้า เนื่องจากค่าเกรเดียนท์ของความเค้นมีค่าเป็นศูนย์สำหรับชิ้นงานทุกขนาด ดังนั้น $K_2 = 0.85$ (ภาระแบบดัดโค้ง และแบบบิด) สำหรับ $0.4 \text{ นิ้ว} < \text{เส้นผ่านศูนย์กลาง} \leq 2.0 \text{ นิ้ว} = 1.0$ (ภาระตามแนวแกน)

ตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่จะมีค่าความเค้นล้าที่ต่ำมากๆ แต่เนื่องจากการทดสอบตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่มีค่าใช้จ่ายที่สูงจึงไม่มีข้อมูลเพียงพอที่จะยืนยันได้อย่างแม่นยำสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่มากๆ ค่าความเค้นล้าอาจลดลงถึง 25 เปอร์เซ็นต์หรือต่ำกว่าค่าขีดจำกัดความทนของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

ผลของค่าความเค้นที่ 10^3 รอบ ซึ่งแสดงในกราฟ S-N มีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นที่ 10^6 รอบมากและสามารถตัดทิ้งได้ โดยทั่วไปแล้วค่า S_u หรือ S_{us} ควรจะหาได้จากการทดสอบตัวอย่างที่มีขนาดโดยประมาณอยู่ในช่วงที่กำหนด แม้ว่า ค่า Correction Factor ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถประยุกต์ใช้ได้เฉพาะกับเหล็กกล้า แต่ข้อมูลที่ดีที่สุดที่มีอยู่บ่งชี้ว่ามันอาจจะประยุกต์ใช้กับโลหะชนิดอื่นๆ ได้เช่นกัน

2.3.7.4 ตัวประกอบการปรับแต่งผิว, K_3

การปรับแต่งผิวอาจกระทบอย่างมากต่อค่าความเค้นล้า ด้วยเหตุนี้การปรับแต่งผิวจึงถูกแบ่งออกเป็น 5 ประเภทกว้างๆ ได้ดังนี้ Polished, Ground, Machined, Hot-Rolled และ As-Forged เหตุผลในการแยกประเภทก็คือ อย่างน้อยที่สุดแล้วในกรณีของเหล็กกล้า ค่าความเค้นล้าขึ้นอยู่กับ การปรับแต่งผิวเป็นอย่างมาก โดยค่าความเค้นล้าของผิวเรียบจะมีค่ามากกว่าผิวขรุขระ ตัวอย่างเช่น ในขณะที่ค่าขีดจำกัดความทนของชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิวอย่างดีมีค่าประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของค่าขีดจำกัดความทนสูงสุด แต่ในกรณีของผิวที่ถูก As-Forged ค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าขีดจำกัดความทนสูงสุด สำหรับ Intermediate Surfaces ตัวอย่างเช่น Hot-Rolled, Turned และ Machined มีค่าขีดจำกัดความทนอยู่ระหว่าง 10 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของค่าขีดจำกัดความทนสูงสุด ภาพที่ 9-17 แสดงผลของผิวทั้ง 5 ประเภทที่มีต่อค่าขีดจำกัดความทนของเหล็กกล้าที่ค่าแรงดึงต่างๆ ค่าแรงดึงที่ 10^3 รอบไม่มีผลต่อผิวที่มีการปรับแต่งอย่างมีนัยสำคัญ

2.3.7.5 ตัวประกอบการปรับปรุงผิว , K_s

เนื่องจากความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้าโดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน ดังนั้นสภาพของผิวชิ้นงานจึงเป็นส่วนที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งความเค้นล้ามีผลกระทบอย่างมากต่อชิ้นงานโดยมีสาเหตุมาจากกระบวนการปรับปรุงผิวเช่น กรรมวิธีเย็น (Shot Peening, Cold Rolling, Stretching) , การชุบแข็งเฉพาะผิว (Carburizing, Nitriding, Cyaniding) , การเคลือบผิวด้วยโลหะ (Chromium, Zinc, Cadmium) ผลกระทบของกระบวนการเหล่านี้ต่อค่าความเค้นล้า

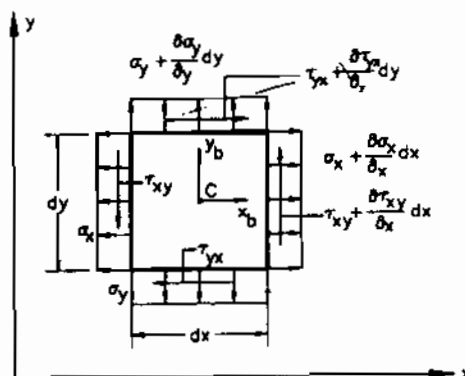
2.3.7.6 ตัวประกอบระดับความเชื่อมั่น , K_z

ค่าตัวประกอบ K_1 ถึง K_4 ที่อธิบายในส่วนก่อนหน้านี้อธิบายถึงค่าแรงล้าเฉลี่ยของตัวอย่างในห้องปฏิบัติการเทียบกับชิ้นส่วนที่ถูกผลิตขึ้นเพื่อใช้งานจริงในทางปฏิบัติงานทางวิศวกรรมจะให้ความสนใจเรื่องประสิทธิภาพของชิ้นงาน ซึ่งไม่สามารถทำนายค่าแรงล้าเฉลี่ยได้ (ที่ระดับความเชื่อมั่น 50%) ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องสร้างความสัมพันธ์ของแรงล้าที่ระดับความเชื่อมั่น 50% กับแรงล้าที่ระดับความเชื่อมั่นที่เป็นไปได้ที่สูงกว่าเช่นที่ระดับความเชื่อมั่น 99% โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นสามเท่าของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย จากข้อมูลการทดสอบที่มีอยู่อย่างจำกัดสามารถกล่าวได้ว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงล้ามีค่าอยู่ที่ประมาณ 8% ของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย 99% ของวัสดุทั้งหมดมีความแข็งแรงน้อยที่สุดเท่ากับ $(\mu - 2.32\sigma)$ ดังนั้น $2.32 \times 0.08 = 0.186 \approx 0.2$ เป็นค่าที่จะถูกนำไปลบออกจากค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเพื่อที่จะได้ค่าความแข็งแรงที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ดังนั้นค่า Correction Factor K_z ที่ระดับความเชื่อมั่น 99% คือ 0.8 ตัวอย่างที่แสดงต่อไปเป็นการหาค่าแรงล้าของชิ้นงานที่ถูกผลิตขึ้นใช้งานจริงจากตัวอย่างที่ได้จากห้องปฏิบัติการ

2.4 สมการพื้นฐานของทฤษฎียืดหยุ่นของวัสดุ [7]

2.4.1 สมการสมดุลเชิงอนุพันธ์

เพื่อสะดวกในการหาสมการสมดุลเชิงอนุพันธ์จะพิจารณาเอลิเมนต์ระนาบที่มีความเค้น ดังจาก σ_x, σ_y และ ความเค้นเฉือน τ_{xy} ซึ่งมีหน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่และมีแรงเนื่องจากมวล X_0 และ Y_0 ซึ่งมีหน่วยเป็นแรงต่อปริมาตร เช่นในภาพที่ 2-17 โดยทั่วไปจะสมมติให้ความเค้นมีค่าคงที่ตลอดพื้นที่หน้าตัดสัมผัส แต่ความเค้นแปรเปลี่ยนไปจากหน้าตัดหนึ่งไปยังอีกหน้าตัดหนึ่ง อาทิเช่น σ_x กระทำที่ด้านหน้าตัดซ้ายมือ ส่วนด้านหน้าตัดขวามือจะมีความเค้น $\sigma_x + (\partial\sigma_x/\partial x)dx$ ถ้าเป็นเอลิเมนต์มีความหนาเท่ากับหนึ่งหน่วย เราสามารถหาแรงรวมในทิศทาง x ได้ดังนี้



ภาพที่ 2-12 เอลิเมนต์ระนาบที่มีความเค้นกระทำ

$$\begin{aligned} \sum F_x = 0 = & \left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx \right) dy(1) - \sigma_x dy(1) + X_b dx dy(1) \\ & + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) dx(1) - \tau_{yx} dx(1) = 0 \end{aligned} \quad (2-3)$$

หรือ

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + X_b = 0 \quad (2-4)$$

ในทำนองเดียวกัน ผลรวมของแรงในทิศทางแกน y ข้อมเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + Y_b = 0 \quad (2-5)$$

เนื่องจากเอลิเมนต์อยู่ในระนาบ สมการสมดุลของโมเมนต์ในแกนที่ตั้งฉากกับระนาบ x-y จะเท่ากับศูนย์ เช่น โมเมนต์ M_z รอบจุด C ตามภาพที่ 2-12

$$\begin{aligned} \sum M_z = 0 = & \tau_{xy} dy(1) \frac{dx}{2} + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) \frac{dx}{2} \\ & - \tau_{yx} dx(1) \frac{dy}{2} - \left(\tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dx \right) \frac{dy}{2} = 0 \end{aligned} \quad (2-6)$$

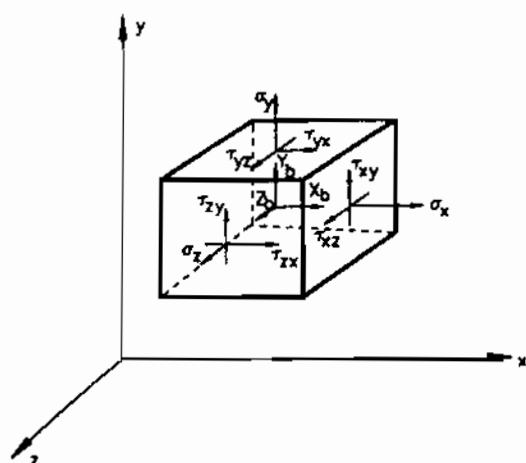
จากสมการ (2-6) ถ้าตัดเทอมที่มีค่าน้อย ๆ ออก และเนื่องจากวัสดุเป็นชนิดมีเนื้อเดียวกันตลอดและสม่ำเสมอ

ดังนั้น

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad (2-7)$$

ซึ่งหมายความว่า ความเค้นเฉือนในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทาง x ซึ่งไปทิศทาง y จะมีขนาดเท่ากับความเค้นเฉือนในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทาง y ซึ่งไปทิศทาง x (ภาพที่ 2-13)

สำหรับในกรณีของปัญหาสามมิติ ภายได้สภาวะของความเค้นในภาพที่ 2-13 ซึ่งจะมี σ_x , τ_{xy} และ τ_{yz} เพิ่มขึ้นมาจากเอลิเมนต์ที่อยู่ในระนาบหรือปัญหาสองมิติ โดยอาศัยหลักของสมดุล เช่นเดียวกับปัญหาสองมิติ สมการ (2-4), (2-5), และ (2-6) สมการสมดุลเชิงอนุพันธ์ของเอลิเมนต์สามมิติคือ



ภาพที่ 2-13 เอลิเมนต์สามมิติภายใต้สภาวะความเค้น

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X_b &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y_b &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z_b &= 0 \end{aligned} \quad (2-8)$$

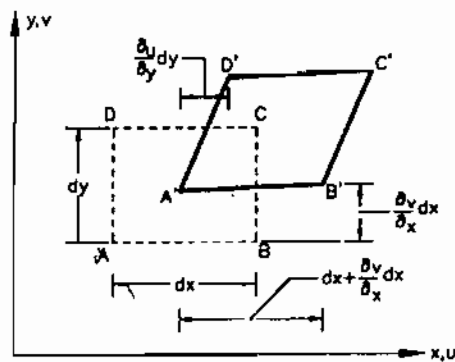
และ

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (2-9)$$

2.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด-การกระจัดและสมการต่อเนื่อง

ในกรณีของเอลิเมนต์ 2 มิติตาม ภาพที่ 2-19 ถ้าให้เอลิเมนต์ $A'B'C'D'$ เปลี่ยนภาพจากเอลิเมนต์เดิม $ABCD$ หลังจากมีความเครียดเกิดขึ้นในเอลิเมนต์ ความยาวเดิมของเอลิเมนต์ในทิศทาง x เท่ากับ $A'B'$ เปลี่ยนเป็นความยาว AB ถ้าให้ u และ v เป็นการกระจัดเกิดขึ้นในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ดังนั้นความเครียดในทิศทาง x

$$\varepsilon_x = \frac{A'B' - AB}{AB} \quad (2-10)$$



ภาพที่ 2-14 การเปลี่ยนรูปของเอลิเมนต์

เนื่องจาก $AB = dx$ (2-11)

และ $(A'B')^2 = \left(dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} dx \right)^2$ (2-12)

จากทฤษฎีไบนิเมียล ถ้าตัดเทอมที่มีอันดับสูงเช่น $(\partial u / \partial x)^2$ และ $(\partial v / \partial x)^2$ ออก(เนื่องจากความเครียด $\partial u / \partial x$ และ $\partial v / \partial x$ มีค่าน้อย) ดังนั้น

$$A'B' = dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx \quad (2-13)$$

แทนค่า AB จากสมการ(2-11) และ $A'B'$ จากสมการ(2-12) ลงในสมการ(2-10) ผลที่ได้รับคือ

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2-14)$$

ในทำนองเดียวกันความยาวเดิมของเอลิเมนต์ในทิศทาง y เท่ากับ AC เราสามารถจะแสดงให้เห็นว่า

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2-15)$$

สำหรับความเครียดเฉือน γ_{xy} นั่นก็คือการเปลี่ยนแปลงของมุมระหว่างด้านเช่น AB และ AD จากเดิม 90 องศา จากภาพ 3 จะเห็นว่า γ_{xy} ก็คือผลรวมของมุม 2 มุมคือ

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2-16)$$

สมการ (2-13), (2-14) และ(2-15) คือสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการจัดของเอลิเมนต์ระนาบหรือเอลิเมนต์สองมิติ

ในกรณีของเอลิเมนต์สามมิติ เราจะกำหนดให้การกระจัดในทิศทาง z เท่ากับ w ดังนั้นในกรณีนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการกระจัดที่เพิ่มขึ้นมาคือ

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2-17)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2-18)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad (2-19)$$

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดการกระจัดดังกล่าวเพื่อให้มั่นใจที่จุดใดจุดหนึ่ง ส่วนประกอบของการกระจัด u , v และ w จะมีค่าเพียงค่าเดียว และเป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่องไม่ขาดตอนหรือทับซ้อนกัน จึงจำเป็นต้องมีสมการต่อเนื่อง (Compatibility) เป็นตัวกำกับ

ในกรณีของปัญหาสองมิติสมการต่อเนื่องอาจหาได้โดยอนุพันธ์ค่า γ_{xy} ต่อ x และ y แทนค่า $\partial w / \partial x$ ด้วย ε_x และ $\partial v / \partial y$ ด้วย ε_y นั่นคือ

$$\frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} \quad (2-20)$$

เราเรียก สมการ (2-19) ว่าสมการเงื่อนไขของการต่อเนื่อง (Condition of Compability) ที่จะทำให้ส่วนประกอบของความเครียดในเทอมของ u และ v ในสมการ (2-13) , (2-14), (2-15) และ (2-19) จะให้ค่าเดียวของการกระจัดที่ต่อเนื่องในกรณีของเอลิเมนต์สามมิติ เราสามารถจะหาสมการต่อเนื่องได้โดยอนุพันธ์ γ_{xz} และ γ_{yz} เช่นเดียวกับ γ_{xy} สมการต่อเนื่องดังกล่าวคือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{zx}}{\partial z \partial x} \end{aligned} \quad (2-21)$$

และสามารถหาความเครียดเชิงตั้งฉากได้จากความเครียดเฉือนดังนี้

$$\begin{aligned} 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y \partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{yx}}{\partial z} \right) \\ 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z \partial x} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \\ 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial x \partial y} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{yx}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2-22)$$

สมการ (2-21) ทั้งสองเรียกว่า สมการต่อเนื่อง (Compability Equation) สำหรับความเครียด ซึ่งเป็นสมการที่จะทำให้ค่า u , v และ w เป็นค่าเดียว และเป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง

2.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

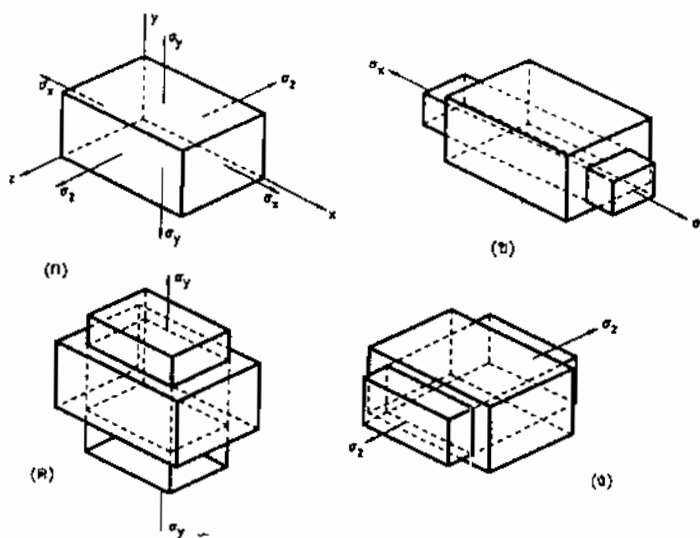
ในกรณีของเอลิเมนต์สามมิติ ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุที่มีเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอสามารถหาได้โดยอาศัยภาพที่ 2-15 ซึ่งมีความเค้นที่เป็นอิสระต่อกัน σ_x , σ_y และ σ_z กระทำ ขั้นแรกจะพิจารณาการเปลี่ยนความยาวของเอลิเมนต์ในทิศทาง x โดยสมมติให้ σ_y และ σ_z เท่ากับศูนย์เช่นในภาพที่ 2-15 (ข) ดังนั้นความเครียดในทิศทาง x คือ

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad (2-23)$$

ซึ่ง E คือโมดูลัสยืดหยุ่น จากภาพที่ 2-15 (ค) ซึ่งมีเฉพาะ σ_y กระทำในทิศทาง y (σ_y) จะทำให้เกิดความเครียดมีค่าเป็นลบ ในทิศทาง x ดังนั้นความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทาง x คือ

$$\varepsilon_x = -\frac{\nu \sigma_y}{E} \quad (2-24)$$

ซึ่ง ν คือ Poisson ratio



ภาพที่ 2-15 เอลิเมนต์สามมิติที่ความเค้นตั้งฉากกระทำ

ในทำนองเดียวกันถ้ามีเฉพาะ σ_z กระทำในทิศทาง z เช่นในภาพที่ 2-15 (ค) ความเครียดในทิศทาง x ก็คือ

$$\varepsilon_x = \frac{\nu \sigma_z}{E} \quad (2-25)$$

ดังนั้นในกรณีที่เอลิเมนต์สามมิติภายใต้ σ_x, σ_y และ σ_z เราสามารถหาความเครียดในทิศทาง x ได้โดยรวมสมการ (2-22) , (2-23) และ (2-24) เข้าด้วยกัน จะนั้น

$$\varepsilon_x = \varepsilon'_x + \varepsilon'' + \varepsilon''' = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y - \nu\sigma_z) \quad (2-26)$$

ส่วนความเครียดในทิศทาง y และ z ภายใต้ความเค้นเดียวกันกับที่กล่าวมาแล้วคือ

$$\begin{aligned} \varepsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x - \nu\sigma_z) \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu\sigma_x - \nu\sigma_y) \end{aligned} \quad (2-27)$$

จากสมการ (2-26) และ (2-27) ถ้าทราบค่าความเครียด $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ และ ε_z ก็สามารถหาความเค้น σ_x, σ_y และ σ_z ได้คือ

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[\varepsilon_x(1-\nu) + \nu\varepsilon_y + \nu\varepsilon_z] \\ \sigma_y &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[\nu\varepsilon_x(1-\nu) + \varepsilon_y + \nu\varepsilon_z] \\ \sigma_z &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[\nu\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y + (1-\nu)\varepsilon_z] \end{aligned} \quad (2-28)$$

จากกฎของฮุก $\sigma = E\varepsilon$ ซึ่ง σ คือ ความเค้นตั้งฉาก ในทำนองเดียวกันความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือน τ และความเครียดเฉือน γ ก็คือ

$$\tau = G\gamma \quad (2-29)$$

ซึ่ง G คือ โมดูลัสเฉือน ดังนั้นความเครียดเฉือนที่ด้านทั้งสามของเอลิเมนต์ของเอลิเมนต์คือ

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \quad (2-30)$$

ส่วนความเครียดเฉือนอีกสามด้านตรงข้ามจะมีขนาดเท่ากันแต่ทิศทางตรงกันข้าม (ภาพที่ 2-18)

ถ้าทราบค่าความเครียดเฉือนทั้งสามก็สามารถหาความเค้นเฉือนได้คือ

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy}, \quad \tau_{yz} = G\gamma_{yz}, \quad \tau_{zx} = G\gamma_{zx} \quad (2-31)$$

เนื่องจาก $G = E/2(1+\nu)$ ดังนั้นความเค้นในสมการ (2-28) และ(2-31) สามารถจะเขียนในรูปของสมการเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1-\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2-32)$$

หรือเขียน $\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (2-33)$

เมทริกซ์ [D] จะเป็นเมทริกซ์กำลังสอง ซึ่งเรียกว่าเมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น - ความเครียด

2.5 ทฤษฎีความเสียหายเนื่องจากการล้า (Fatigue Failure Theory)

ในการออกแบบที่จะไม่ทำให้เกิดความเสียหายนั้น โดยปกติแล้วความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชิ้นส่วนจะไม่เกินค่าความแข็งแรงของวัสดุถ้าเป็นวัสดุประเภทเหนียวเราจะสนใจค่าความต้านทานแรงดึงคลาก (Yield Strength) เพราะที่ค่านี้โลหะจะเริ่มดัดแปลงรูปร่างถาวรอันจะทำให้ชิ้นส่วนเกิดการเสียหายแต่สำหรับการออกแบบวัสดุเนื่องจากการล้าที่อยู่ในกรณีของความเค้นเฉลี่ย

ไม่เท่ากับศูนย์ของวัสดุเหนียวซึ่งสามารถนำทฤษฎีความเสียหายของกู๊ดแมน (Goodman) มาวิเคราะห์ความล้าเนื่องจากเป็นสมการที่นิยามใช้กันแพร่หลายดังนี้

$$\frac{\sigma_a}{S_f} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \quad (2-34)$$

โดยที่

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2-35)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

เมื่อ	σ_a	=	ความเค้นแอมปริจูด
	σ_m	=	ความเค้นเฉลี่ย
	S_f	=	ความต้านทานการล้าตัว
	σ_u	=	σ_{ut} = ความต้านทานแรงดึงสูงสุด
	$\sigma_{\max}$	=	ความเค้นสูงสุด
	$\sigma_{\min}$	=	ความเค้นต่ำสุด

จากสมการ (2-34) จะสามารถหาค่าขีดจำกัดการทนทานได้คือ

$$S_f = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_a}{\sigma_{ut}}} \quad (2-36)$$

จากการทดสอบการล้าของวัสดุโลหะที่มีรอบอายุการใช้งานต่ำกว่า 10^6 รอบ สามารถประเมินอายุการใช้งานได้จาก สมการทั่วไปของความล้าคือ

$$S_f = a \cdot N_f^b$$

$$N_f = \left(\frac{S_f}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (2-37)$$

เมื่อ	a,b	=	ค่าคงที่เนื่องจากการล้า
	S_f	=	ความต้านทานการล้า
	N_f	=	จำนวนรอบการล้า

2.6 พื้นฐานไฟไนต์เอลิเมนต์

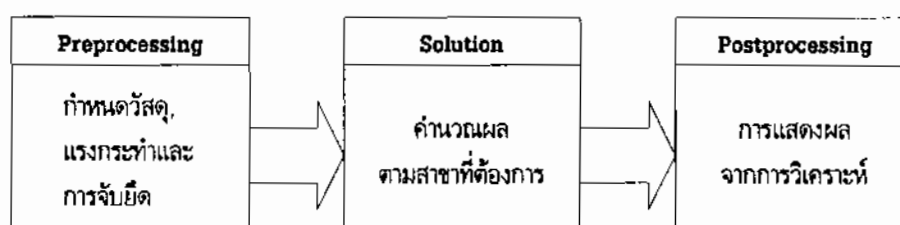
การวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEA) จะถูกใช้เพื่อแก้ปัญหา ตั้งแต่ปัญหาง่ายๆ จนถึงปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก วิศวกรออกแบบจะใช้ FEA ในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ด้วยการเพิ่มขั้นตอนการวิเคราะห์เข้าไปในกระบวนการออกแบบ เพิ่มเครื่องมือช่วยในการกำหนดคุณสมบัติของชิ้นส่วนที่ใช้ในการคำนวณ ส่วนการวิเคราะห์ชิ้นส่วนที่มีความยุ่งยากอาจจะต้องคำนวณขั้นสูง ตัวอย่างเช่น รอยแตกร้าวจากการเคลื่อนที่ของรถยนต์, งานขึ้นรูปโลหะ งานการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของขนาดที่ส่งผลต่อความแข็งแรง เป็นต้น

ขบวนการในการวิเคราะห์เริ่มจากการสร้างชิ้นงาน แล้วแบ่งชิ้นงานออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ (Meshing) โดยมีรูปทรงง่ายๆ (สามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยม) เราเรียกว่า “เอลิเมนต์ (Elements)” และชิ้นส่วนเล็กๆ จะต่อเชื่อมโยงกันทั้งชิ้นเมื่อการทำงานด้วยการแบ่งเอลิเมนต์ FEA จะแก้สมการด้วยการประมาณค่าในแต่ละเอลิเมนต์ จนกว่าจะครบทุกชิ้นส่วน แต่ถ้าเป็นชิ้นงานประกอบ จะแยกคำนวณในแต่ละชิ้นส่วน แล้วนำมาประมวลผลรวมกัน ขั้นตอนการคำนวณจะแยกตามส่วนของโปรแกรม ซึ่งจะมี 3 ขั้นตอน :

2.6.1 การเตรียมข้อมูลเพื่อการคำนวณ (Preprocessing) โดยข้อมูลมาตรฐานจะมีทั้งคุณสมบัติวัสดุ, แรงกระทำ (Loads) และการจับยึด (Restraints) เป็นต้น

2.6.2 การคำนวณหาผลเฉลยหรือหาคำตอบ (Solution)

2.6.3 การแสดงผลลัพธ์จากการคำนวณในรูปแบบชิ้นงานหรือกราฟ (Postprocessing)



ภาพที่ 2-16 ขั้นตอนการคำนวณ

2.7 ขั้นตอนการคำนวณจะแยกตามวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ได้ดังนี้

2.7.1 การสร้างรูปแบบคณิตศาสตร์ (Building The Mathematical Model)

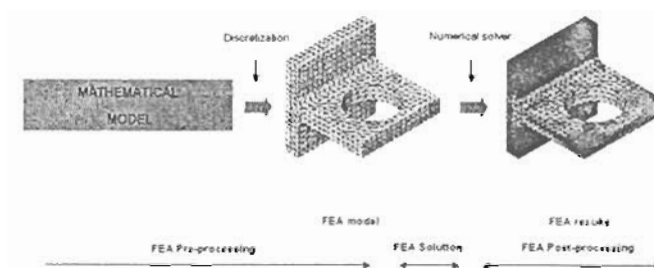
2.7.2 การสร้างรูปแบบชิ้นส่วนย่อย (Building The Finite Element Model)

2.7.3 การสร้างรูปแบบการแก้ปัญหา (Solving The Finite Element Model)

2.7.4 การวิเคราะห์ผลเฉลย (Analyzing The Results)

2.9 การสร้างชิ้นส่วนแบบแบ่งเอลิเมนต์

การสร้างรูปแบบคณิต (Mathematical Model) เป็นการเตรียมชิ้นงานเพื่อการแบ่งเอลิเมนต์ (Meshing) โดยเวกเตอร์ของแรงกระทำ (Load) และเงื่อนไขการจับยึด (Supports) จะกระทำลงบน โหนด (Nodes) ของชิ้นส่วนแบบแบ่งเอลิเมนต์ (Finite Element Mesh)



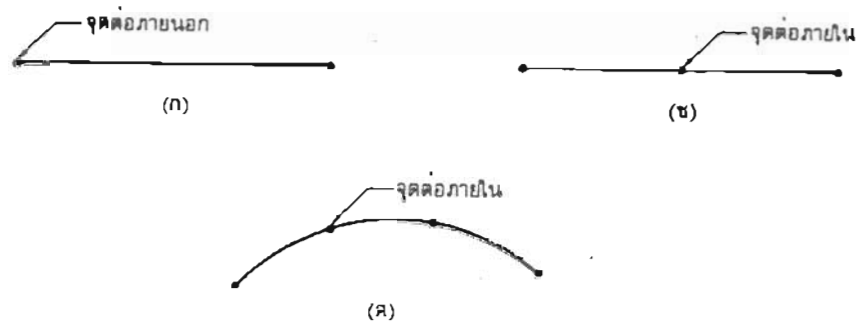
ภาพที่ 2-18 ชิ้นส่วนแบบแบ่งเอลิเมนต์

2.10 เอลิเมนต์

การวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องแบ่งโครงสร้างหรือชิ้นส่วนออกเป็นส่วนใหญ่ๆ และเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับรูปร่างลักษณะของงานและการกระทำของโหลด ชนิดของเอลิเมนต์อาจจะแบ่งออกได้ 3 ประเภทตามมิติ คือ เอลิเมนต์สำหรับปัญหามิติเดียว สองมิติ และสามมิติ

2.10.1 เอลิเมนต์มิติเดียว

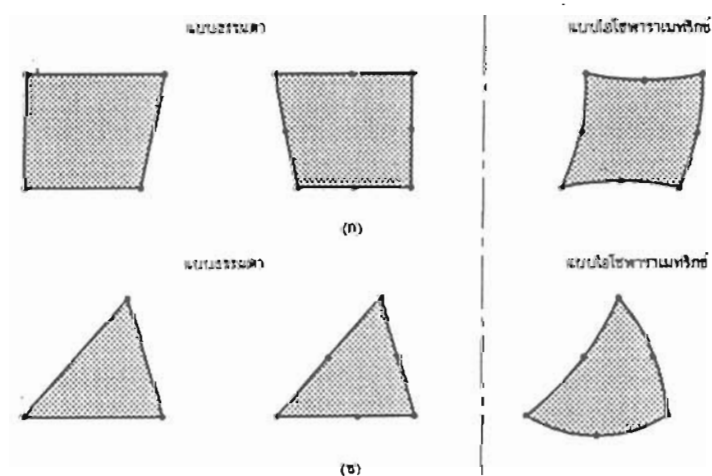
เอลิเมนต์มิติเดียวเป็นเอลิเมนต์ที่นิยมนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหามิติเดียวเช่นชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน, ชิ้นส่วนที่รับแรงบิด, การโค้งงอของคาน, การนำความร้อนในทิศทางเดียว เป็นต้น ภาพที่ 2-19 (ก) เป็นเอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยจุดต่อที่ปลายทั้งสองด้านของแต่ละเอลิเมนต์ เรียกว่าจุดต่อภายนอกส่วนภาพที่ 2-19 (ข) เป็นเอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยสามจุดต่อ คือจุดต่อภายนอกสองจุดต่อและจุดต่อภายในหนึ่งจุดต่อ ภาพที่ 2-19 (ค) คือเอลิเมนต์มิติเดียวที่เป็นส่วนโค้งประกอบด้วยสี่จุดต่อ คือ สองจุดต่อภายนอก และสองจุดต่อภายใน ซึ่งเหมาะสำหรับใช้วิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้าง หรือชิ้นงานที่มีการบิดตัวไม่เป็นเส้นตรง เช่นการบิดตัวของท่อนโลหะอันเนื่องมาจากมวลของท่อนโลหะเอง เป็นต้น



ภาพที่ 2-19 เอลิเมนต์มีติเดียว

2.10.2 เอลิเมนต์สองมิติ

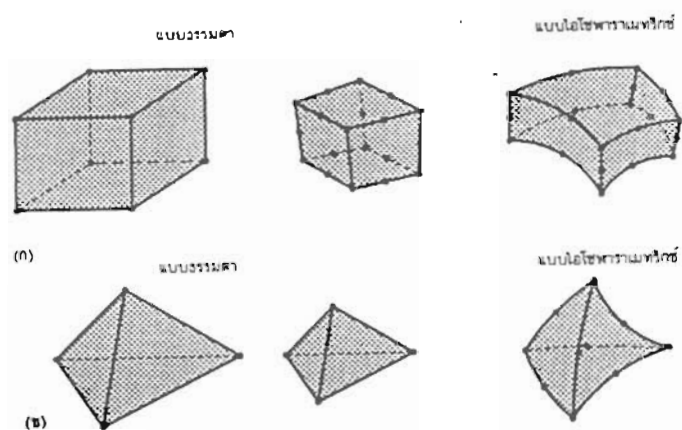
เอลิเมนต์สองมิติมักใช้กับการวิเคราะห์ความเค้น-ความเครียดระนาบ โดยทั่วไปเอลิเมนต์สองมิติจะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยด้านที่เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง เช่น ในภาพที่ 2-20 (ก) เป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยสี่จุดต่อและแปดจุดต่อ ชนิดด้านตรง และด้านโค้งแบบไอโซพารามетริกส์ ส่วนภาพที่ 2-20 (ข) เป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ประกอบด้วยสามจุดต่อ และหกจุดต่อด้านตรงและด้านโค้งแบบไอโซพารามетริกส์ โดยทั่วไปขั้นความเร็วเท่ากันเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมให้ผลเฉลยที่ถูกต้องแม่นยำกว่าส่วนจะเลือกใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมด้านตรงหรือด้านโค้งขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของชิ้นงานจริง และโดยทั่วไปจะสมมติให้ความหนาของเอลิเมนต์มีค่าคงตัว แต่อาจจะกำหนดให้ความหนาเป็นฟังก์ชันกับพิกัดก็ได้



ภาพที่ 2-20 เอลิเมนต์ (ก) เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม (ข) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม

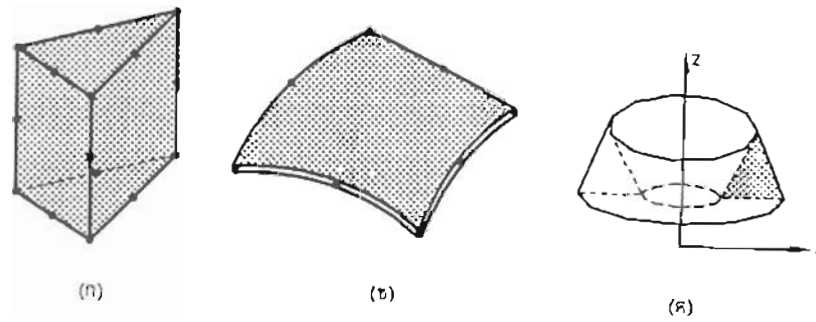
2.10.3 เอลิเมนต์สามมิติ

เอลิเมนต์สามมิติจะใช้กับการวิเคราะห์ปัญหาสามมิติต่างๆ ไป ลักษณะของเอลิเมนต์จะเป็นสี่เหลี่ยมปริซึมและรูปกรวยสามเหลี่ยม เช่นในภาพที่ 2-21 (ก) และภาพที่ 2-21 (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 2-21 เอลิเมนต์ (ก) ชนิดปริซึม หรือชนิดทรงหกหน้า (ข) ชนิดกรวยสามเหลี่ยมหรือชนิดทรงสี่หน้า

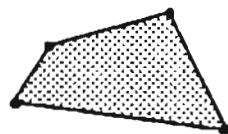
ภาพที่ 2-21 (ก) เป็นเอลิเมนต์สามมิติทรงหกหน้า (Hexahedron) ชนิดหน้าตรง (Linear) แปดจุดต่อ, ชนิดเส้นตรงกำลังสอง (Straight-Line Quadratic) ยี่สิบจุดต่อ และชนิดเส้นโค้งกำลังสอง (Quadratic With Curved Faces) ยี่สิบจุดต่อ ส่วนภาพที่ 2-21 (ข) เป็นเอลิเมนต์สามมิติ ทรงสี่หน้า (Tetrahedra) ชนิดด้านตรงสี่จุดต่อ ชนิดเส้นตรงกำลังสองสิบจุดต่อ, และชนิดเส้นโค้งกำลังสองสิบจุดต่อตามลำดับ นอกจากเอลิเมนต์สามมิติที่กล่าวมาแล้ว ยังมีเอลิเมนต์อีกกลุ่มหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาในลักษณะรูปทรงกระบอก เช่นในภาพที่ 2-22 (ก) ปัญหาในลักษณะแผ่นโค้ง (Shell) เช่นในภาพที่ 2-22 (ข) และเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหารูปกรวยสมมาตร ซึ่งอาจจะเป็นเอลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมหมุนรอบแกนสมมาตร เช่นภาพที่ 2-22 (ค) โดยทั่วไป เอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยจำนวนจุดต่อมากๆ จะให้ผลเฉลยใกล้เคียงกับค่าแม่นยำมากกว่าเอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยจำนวนจุดต่อน้อย แต่ละเพิ่มความยุ่งยากในการแก้สมการและใช้เวลาในการคำนวณมาก ตัวอย่างเช่น เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมสองมิติ ภาพที่ 2-23 ประกอบด้วยจุดต่อสี่จุดต่อจะให้ผลเฉลยคลาดเคลื่อนมากกว่าเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยแปด และสิบหกจุดต่อเป็นต้น



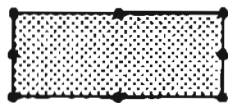
ภาพที่ 2-22 (ก) เอลิเมนต์ทรงกระบอกร (ข) เอลิเมนต์แผ่นโลหะโค้ง (สองมิติ)
(ค) เอลิเมนต์กรวยสมมาตร (สองมิติ)



มุมฉาก 4 จุดต่อ



มุมใดๆ 4 จุดต่อ



มุมฉาก 8 จุดต่อ



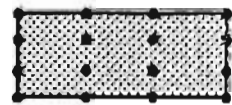
มุมโค้ง 8 จุดต่อ



มุมฉาก 9 จุดต่อ



ด้านโค้ง 9 จุดต่อ



มุมฉาก 16 จุดต่อ



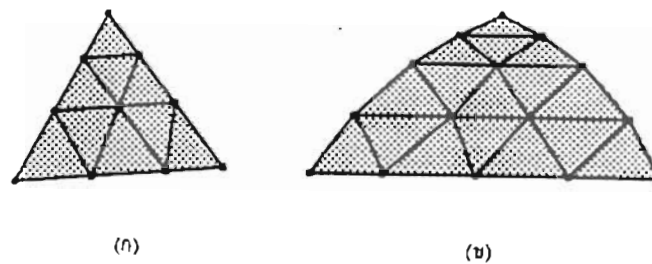
ด้านโค้ง 16 จุดต่อ

ภาพที่ 2-23 เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมสองมิติที่ประกอบด้วยจุดต่อต่างๆ

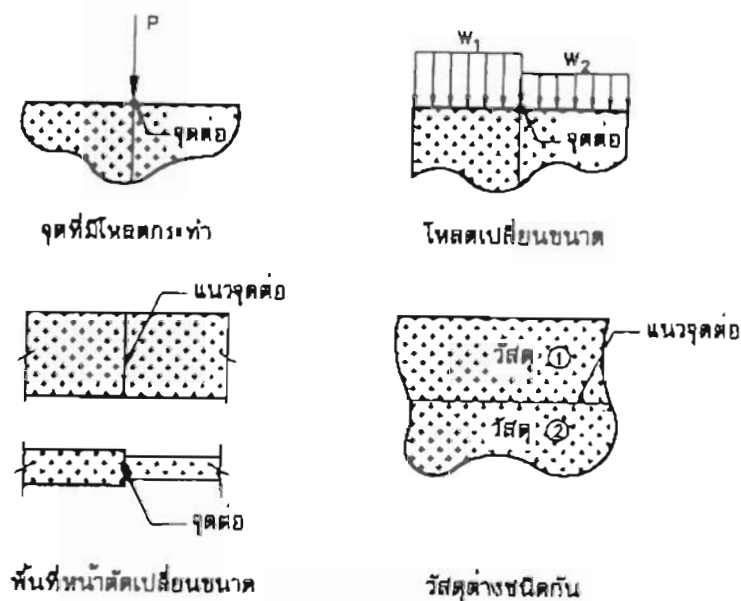
2.10.4 การแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย

การวิเคราะห์ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยที่เกี่ยวข้องกันด้วยจุดต่อ เพื่อความสะดวกจะพิจารณาปัญหาสองมิติโดยเลือกใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้านตรงที่ประกอบสามจุดต่อ เช่น ในภาพที่ 2-24 (ก) ส่วนปัญหาสามมิติก็ใช้หลักการเดียวกัน

การแบ่งชิ้นส่วนอาจจะเริ่มแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยมที่มีขนาดใหญ่ ๆ ก่อนแล้วจึงแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมย่อยอีกครั้งหนึ่ง ตำแหน่งของจุดต่อ (Node) ภายนอกของเอลิเมนต์ย่อยควรจะอยู่ในตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นส่วน หรือตำแหน่งที่มีโหลดกระทำ หรือตำแหน่งที่มีการใช้วัสดุต่างกัน ตำแหน่งจุดต่อเหล่านั้นดูได้จากภาพที่ 2-25

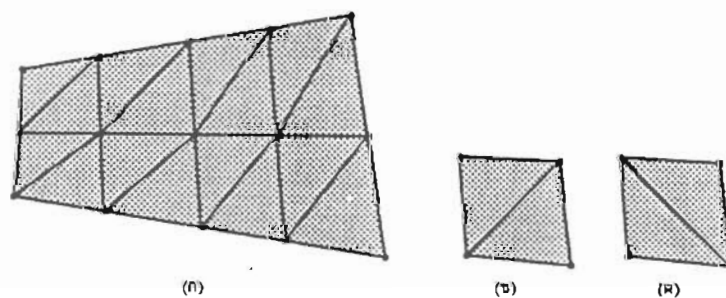


ภาพที่ 2-24 การแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม



ภาพที่ 2-25 ตำแหน่งของจุดต่อที่สำคัญ

ชั้นส่วนรูปสามเหลี่ยมในภาพที่ 2-24 (ก) ก่อนข้างจะแบ่งเป็นเอลิเมนต์ย่อยได้ง่ายคือ กำหนดจุดต่อในแต่ละด้านของสามเหลี่ยมให้มีจำนวนเท่ากัน ลากเส้นโยงระหว่างจุดต่อจะได้จุดต่อตรงที่เส้นตัดกันเพิ่มขึ้น ตามภาพที่ 2-24 (ก) ชั้นส่วนจะถูกแบ่งออกเป็น 9 เอลิเมนต์แต่ละด้านจะมีสี่จุดต่อระยะระหว่างจุดต่อของแต่ละด้านของสามเหลี่ยมไม่จำเป็นต้องเท่ากันขนาดของเอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์จึงมีขนาดแตกต่างกันตามที่ต้องการ ถ้าเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้วยกัน เอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้านเท่าให้ผลเฉลยที่ดีที่สุด แต่ถ้าจำเป็นต้องใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมใด ๆ มุมภายในของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมควรอยู่ระหว่าง 30° ถึง 120° ในกรณีของชั้นส่วนเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านโค้งเราอาจใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้านตรงแทน เช่นในภาพที่ 2-24 (ข) ซึ่งทำให้ขนาดของแบบจำลองคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อยตามเส้นไขว้ปลาส่วนจำนวนของเอลิเมนต์ทั้งหมดในชั้นส่วนจะเป็น $(N-1)^2$, เมื่อ n คือจำนวนจุดต่อของแต่ละด้านของชั้นส่วนสามเหลี่ยมที่ต้องการจะแบ่งเป็นเอลิเมนต์ย่อย สำหรับชั้นส่วนรูปสี่เหลี่ยมในภาพที่ 2-26 (ก) การแบ่งเอลิเมนต์ย่อย ๆ นั้น ทำได้สะดวกคือ กำหนดจุดต่อในแต่ละด้านของสี่เหลี่ยมลากเส้นระหว่างจุดต่อที่อยู่ตรงข้ามจุดตัดของแต่ละเส้นจะเป็นจุดต่อภายในของชั้นส่วน และถ้าประสงค์จะแบ่งเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมย่อยก็ทำได้ โดยลากทะแยงมุมของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม การลากเส้นทะแยงมุมนั้นควรเลือกเส้นทะแยงมุมที่สั้นที่สุด เพราะจะทำให้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมมีสัดส่วนใกล้เคียงสามเหลี่ยมด้านเท่ามากขึ้น ดูตัวอย่างในภาพที่ 2-26 (ข) และ (ค) ในกรณีที่เลือกใช้อิเลเมนต์สี่เหลี่ยมสัดส่วนด้านยาวสุดต่อด้านสั้นสุดของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมควรเท่ากับ 1 จึงจะทำให้ผลเฉลยใกล้เคียงกับค่าแม่นยำมากขึ้น

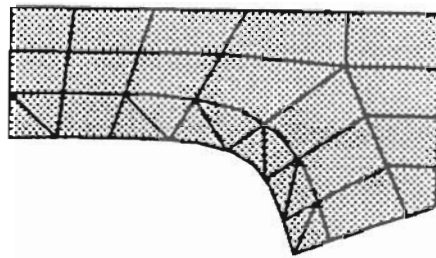


ภาพที่ 2-26 การแบ่งชั้นส่วนสี่เหลี่ยมออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม

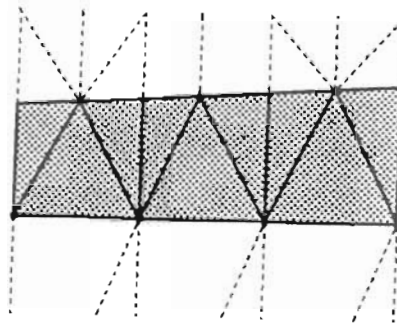
จำนวนจุดต่อด้านที่ใกล้กันของชั้นส่วนที่สี่เหลี่ยมอาจจะแตกต่างกันแต่จำนวนจุดต่อที่ด้านตรงข้ามจะต้องต่ออาจจะแตกต่างกันซึ่งทำให้เอลิเมนต์มีขนาดใหญ่ตามต้องการจำนวนจุดต่อขอบด้านบนประกอบมุมของชั้นส่วนสี่เหลี่ยมที่ต้องการแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยในภาพที่ 2-27

จำนวนจุดต่อด้านที่ใกล้กันของชิ้นส่วนที่สี่เหลี่ยมอาจจะแตกต่างกันแต่จำนวนจุดต่อที่ด้านตรงข้ามจะต้องต่ออาจจะแตกต่างกันซึ่งทำให้เอลิเมนต์มีขนาดใหญ่ตามต้องการจำนวนจุดต่อบนด้านบนประกอบมุมของชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมที่ต้องการแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยในภาพที่ 2-27

ระยะระหว่างจุดต่อของชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมจะมีขนาดต่างกัน ทั้งนี้เพื่อให้เอลิเมนต์ในบริเวณขอบที่เป็นส่วนโค้งมีขนาดเล็ก คือพยายามทำให้แบบจำลองมีขนาดใกล้เคียงกันขนาดของชิ้นส่วนจริงมากที่สุด ปกติไม่นิยมแบ่งเอลิเมนต์ให้มีขนาดเท่ากัน และมีรูปร่างเหมือนกันตลอดชิ้นส่วน เพราะบริเวณที่มีความเค้นสูงหรือบริเวณที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ ควรจะแบ่งให้มีเอลิเมนต์ขนาดเล็ก ๆ ส่วนบริเวณที่ไกลออกไปจะแบ่งให้มีขนาดโตขึ้น



ภาพที่ 2-27 การแบ่งชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมโค้งออกเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมย่อย



ภาพที่ 2-28 การขยายขนาดของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม

การเปลี่ยนขนาดของเอลิเมนต์มีประโยชน์มากสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อน วิธีที่ง่ายที่สุดของการเปลี่ยนแปลงขนาดของเอลิเมนต์คือกำหนดให้จำนวนต่อจุดบนด้านตรงข้ามของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมให้แตกต่างกันเช่นในภาพที่ 2-28 เป็นต้น

การวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็ง จำเป็นต้องกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ของจุดต่อต่าง ๆ ด้วย โดยทั่วไปจุดต่อที่ไม่มีการเคลื่อนที่จะแทนด้วยการยึดแบบสลัก (Pin Connection) แต่ถ้าจุดต่อเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวจะแทนด้วยการยึดแบบล้อย่น ซึ่งส่วนสามารถจะเคลื่อนที่

ในแนวตั้งได้ แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ในแนวระดับ ส่วนการที่จะกำหนดให้จุดต่อเคลื่อนที่อย่างไร นั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา ปัญหาบางปัญหาไม่สามารถจะกำหนดเงื่อนไขขอบเขตได้โดยง่าย เช่นการถ่ายเทความร้อน การหมุนตัวของดิน อย่างไรก็ตามวิศวกรได้พยายามจำลองปัญหาดังกล่าว เพื่อคำนวณหาค่าต่าง ๆ ที่ต้องการให้สอดคล้องกับธรรมชาติของปัญหา

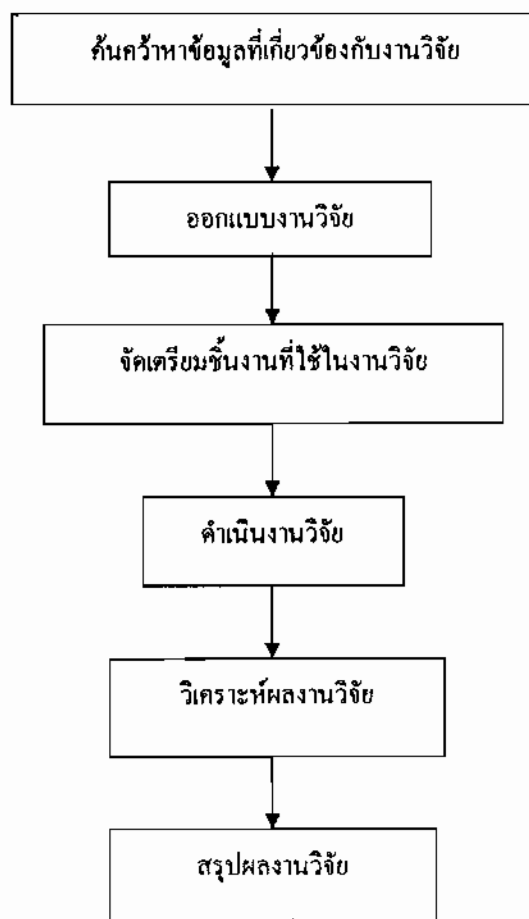
2.11 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลลัพธ์ที่แสดงบนชิ้นส่วนเอลิเมนต์ (FEA Model) จะมีขั้นตอนการวิเคราะห์ที่มีขั้นตอนที่ยุ่งยากซับซ้อนแต่คอมพิวเตอร์ปัจจุบันมีขีดความสามารถเพียงพอ จากนั้นโปรแกรมจะพิมพ์ผลและรายงานผลในรูปแบบไฟล์ที่สามารถแก้ไขได้ (Interpretation) ซึ่งทำให้เราสามารถพิมพ์ข้อความ, หมายเหตุ และข้อผิดพลาดเบื้องต้นได้โดยจะมีขั้นตอนในช่วงต้น 3 ช่วง คือ การสร้างโมเดลคณิตศาสตร์ (Mathematical Model), การแบ่งเอลิเมนต์โมเดล (Finite Element Model) และการหาผลเฉลยของโมเดล (Solving Model)

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ ต้องการศึกษาลักษณะความต้านความล้าของเหล็กกล้าแรงรถไฟชนิด 70A และ 80 A เปรียบเทียบกับเหล็กที่จำหน่ายในประเทศไทยที่มีคุณสมบัติวัสดุใกล้เคียงกันกับเหล็กแรงรถไฟคือเหล็กกล้าเกรด AIS S45C ดังนั้น ในการดำเนินงานวิจัยนี้ ได้แบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ คือ ส่วนแรก เป็นการทดสอบค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ และส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาความเค้นสำหรับนำไปคำนวณหาอายุการใช้งานของเหล็กแรงรถไฟโดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในภาพที่ 3-1 ดังนี้



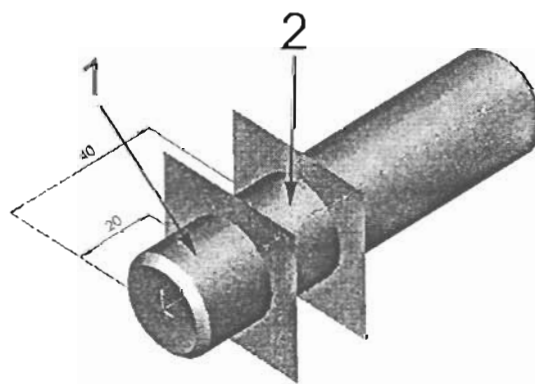
ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการตรวจวัดความลึกผิวแข็ง (Case Depth Measurement) [8,9]

การวัดความลึกของผิวแข็งทั่วไป จะทำการทดสอบความแข็งทางด้านพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ด้วยการตัดชิ้นงานทางด้านขวาง และให้ได้ฉากกับผิวที่จะวัดความลึก ทดสอบความแข็งโดยใช้น้ำหนักน้อยค่อย ๆ กดลงบนผิวของชิ้นงานการทดสอบแบบนี้ต้องการผิวหน้าของชิ้นงานที่มีความเรียบและมันเป็นพิเศษ เพราะถ้าหากผิวไม่เรียบและไม่มีความมันแล้วจะทำให้ยุ่งยากในการวัดขนาดของรอยกดซึ่งจะทำให้ค่าของความแข็งที่ได้ไม่ตรงกับความเป็นจริง การวัดค่าความแข็งในระบบไมโครวิกเกอร์ (Hv) เพื่อวัดความลึกของผิวแข็งจะกำหนดค่าความลึก (Case Depth) ที่ 550 Hv โดยระยะห่างจากขอบถึงรอยกดรอยแรกไม่น้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร แต่ถ้าเป็นความลึกของผิวที่บางมาก ๆ อาจจะใช้ 0.03 มิลลิเมตร ก็ได้ปกติจะใช้น้ำหนักที่กดอยู่ในระหว่าง 300 – 500 กรัม แต่ถ้าระยะห่างจากขอบถึงรอยกดรอยแรกเป็น 0.03 มิลลิเมตร จะใช้น้ำหนักที่กด 100 – 300 กรัม ไมโครวิกเกอร์ (Hv) ใช้กับงานราบเท่านั้น เพราะถ้าผิวของชิ้นงานโค้งหรือเว้าจะได้ค่าที่ไม่แน่นอน เมื่อได้ค่าความแข็งของรอยกดรอยแรกแล้วให้เลื่อนตำแหน่งของการกดไปเรื่อย ๆ ในทิศทางที่เข้าไปยังแกนของชิ้นงาน ความแข็งจะลดลงเรื่อย ๆ เช่นกันจนกระทั่งถึงระดับ 550 Hv จากจุดนี้ทำการวัดระยะถึงขอบของชิ้นงานค่าที่ได้คือ ค่าความลึกของผิวแข็งที่ต้องการ

3.1.1 การเตรียมชิ้นทดสอบและตำแหน่งในการวัดผล

นำชิ้นงานทุกชิ้นจากการทดลองไปตัดแบ่งตามภาพที่ 3-2



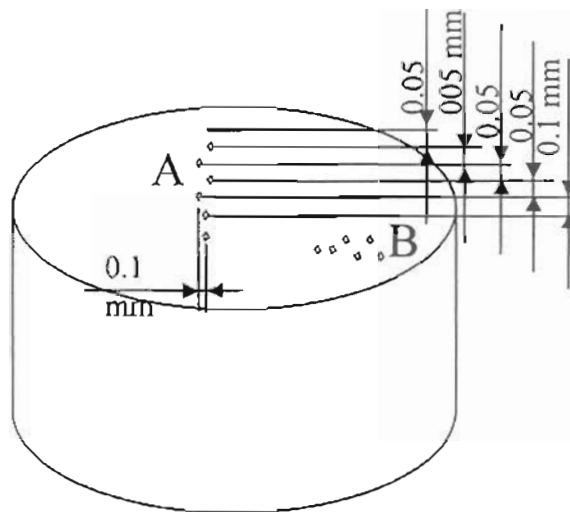
ภาพที่ 3-2 แสดงตำแหน่งหน้าตัดชิ้นทดสอบ

ส่วนที่ 1 ได้นำไปถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค (ด้านที่เป็นรอยตัด) ได้นำไปขัดและกัดกรดเพื่อถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค ดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 แสดงตำแหน่งทดสอบของส่วนที่ 1

ส่วนที่ 2 นำไปวัดค่าความแข็งลึก การวัดค่าความแข็งลึกใช้ด้านที่สัมผัสกับส่วนที่ 1 โดยทำการวัดทั้งหมด 20 จุดต่อหนึ่งชั้น และแรงกด 1 กิโลกรัม โดยแต่ละจุดห่างกัน 0.05 มิลลิเมตร จนถึง 0.2 มิลลิเมตร หลังจากนั้นห่าง 0.1 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3-4 จากนั้นจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยแล้วบันทึกผลค่าความแข็งลึกกำหนดที่ความแข็ง 550 Hv เป็นจุดสิ้นสุดความแข็งลึก แต่จะทำการวัดต่อไปจนถึง 300 Hv จึงหยุดทำการวัด ณ จุด

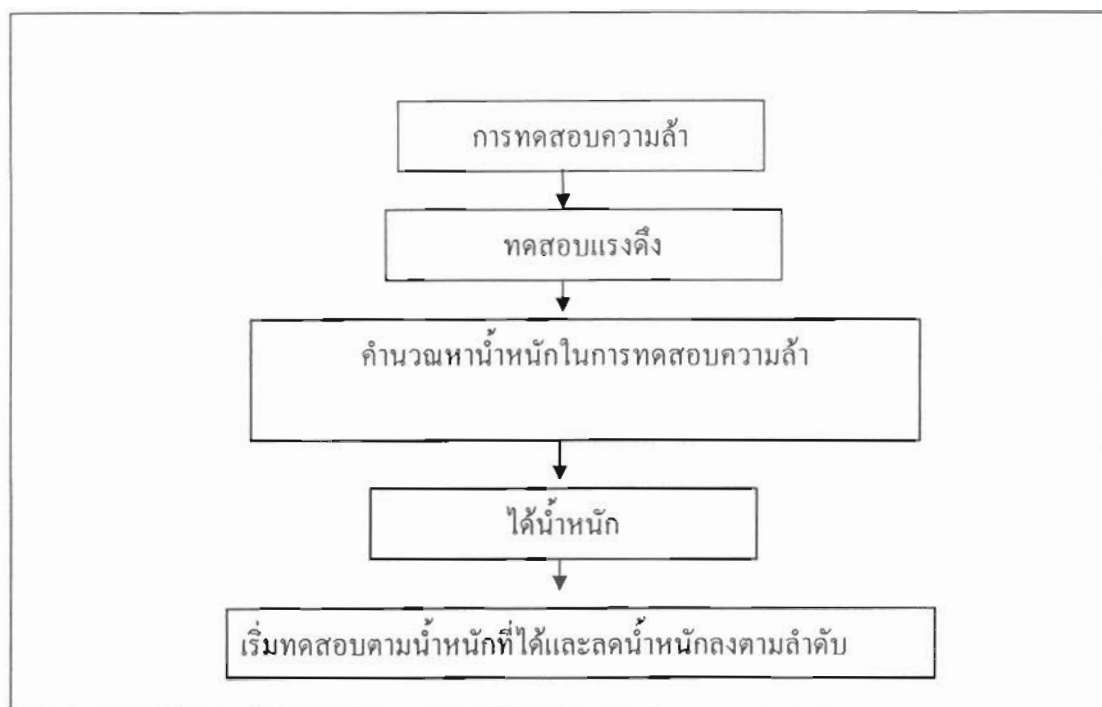


ภาพที่ 3-4 แสดงตำแหน่งในการวัดความแข็งลึก

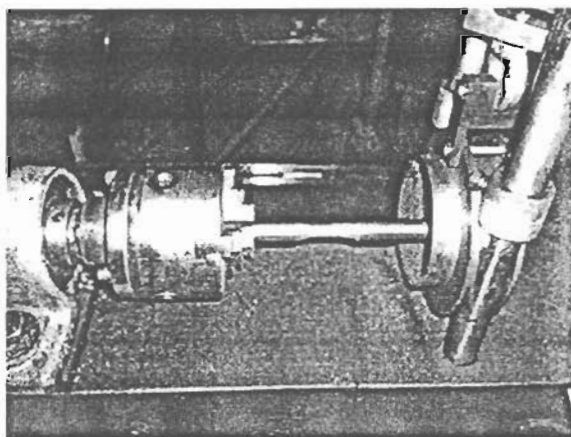
3.2 ขั้นตอนการทดสอบความล้า

ชิ้นงานที่นำมาทดสอบนี้โดยการทดลองความล้านี้ กำหนดให้ความเร็วรอบคงที่ 2500 รอบต่อนาที และกำหนดภาระที่กระทำ โดยหาได้จากการนำเอาชิ้นงานที่มาทดสอบแรงดึง เพื่อหาค่า

Yield Strength โดยทดสอบแรงดึง เพื่อใช้ในการคำนวณน้ำหนัก ภาระสูงสุดที่ทดสอบความล้า แล้วปรับเปลี่ยนภาระที่กระทำที่ปลายคานในภาพที่ 3-6 เพื่อไปหา S-N Curve



ภาพที่ 3-5 ขั้นตอนการทดสอบความล้า



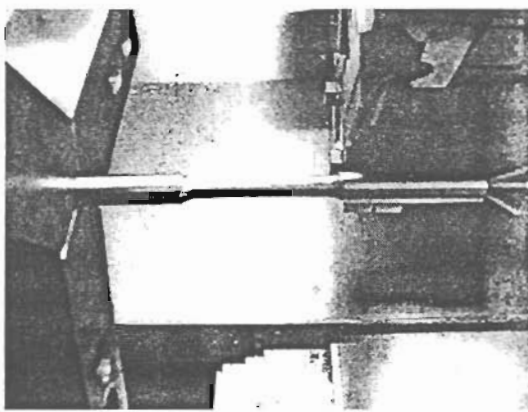
ภาพที่ 3-6 หลักการเครื่องทดสอบความล้าแบบ โมเมนต์ค้ำคงคงที่ (Constant Bending Moment)

3.2.1 การจัดทำขึ้นทดสอบการทดสอบแรงดึง

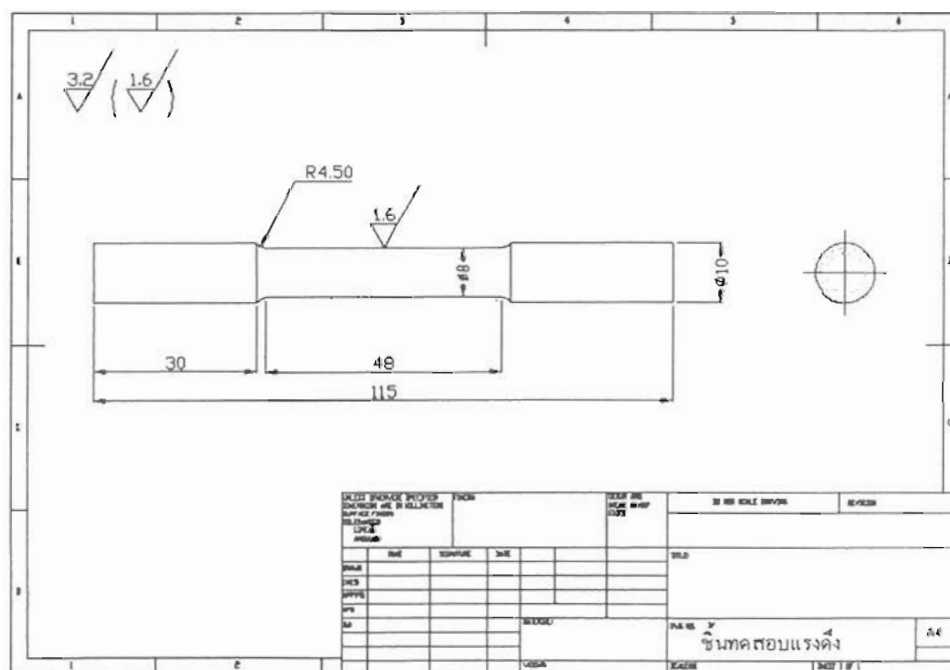
3.2.1.1 ขึ้นทดสอบวัสดุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และมีความยาว 115 มิลลิเมตร ทำการกลึงลดขนาดตามมาตรฐาน DIN 50125 โดยมีขนาด d เท่ากับ 8 มิลลิเมตร ภาพที่ 3-7 แสดงขึ้นทดสอบ และรายละเอียดของแบบขึ้นงานแสดงใน ภาพที่ 3-8

3.2.1.2 นำขึ้นทดสอบมาขัดกระดาษทราย เบอร์ 1500 , 2000

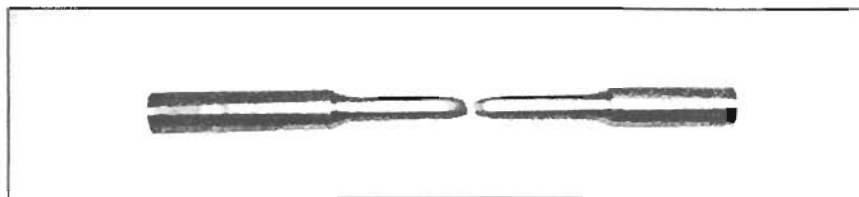
3.2.1.3 นำไปทดสอบแรงดึง ภาพที่ 3-9 แสดงขึ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึง



ภาพที่ 3-7 ขึ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน DIN 50125



ภาพที่ 3-8 แบบขึ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน DIN 50125 (หน่วยมิลลิเมตร)



ภาพที่ 3-9 ชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน DIN 50125

3.2.2 การจัดทำชิ้นทดสอบความล้าแบบ Rotating Bending

3.2.2.1 ชิ้นทดสอบเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 115 มิลลิเมตร

3.2.2.2 กลึงลดขนาดตามมาตรฐาน DIN 50125 โดยมีขนาด d_0 เท่ากับ 8 มิลลิเมตรมีค่ารัศมีส่วนโค้ง (R) เท่ากับ 4.5 มิลลิเมตรดังภาพที่ 3-6 และแบบชิ้นงานแสดงดังภาพที่ 3-8

3.2.2.3 นำชิ้นทดสอบมาขัดกระดาษทราย เบอร์ 1500 , 2000

3.3 การตั้งสมมุติฐานการวิเคราะห์ของรางรถไฟ

การตั้งสมมุติฐานการวิเคราะห์ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์เพื่อความสะดวกและความเข้าใจของปัญหาเพราะในความจริงแล้วพฤติกรรมการรับภาระของรางรถไฟมีมากมายหลายประการดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดคุณสมบัติต่าง ๆ ของการวิเคราะห์โดยสามารถแบ่งเป็นหัวข้อได้ดังนี้

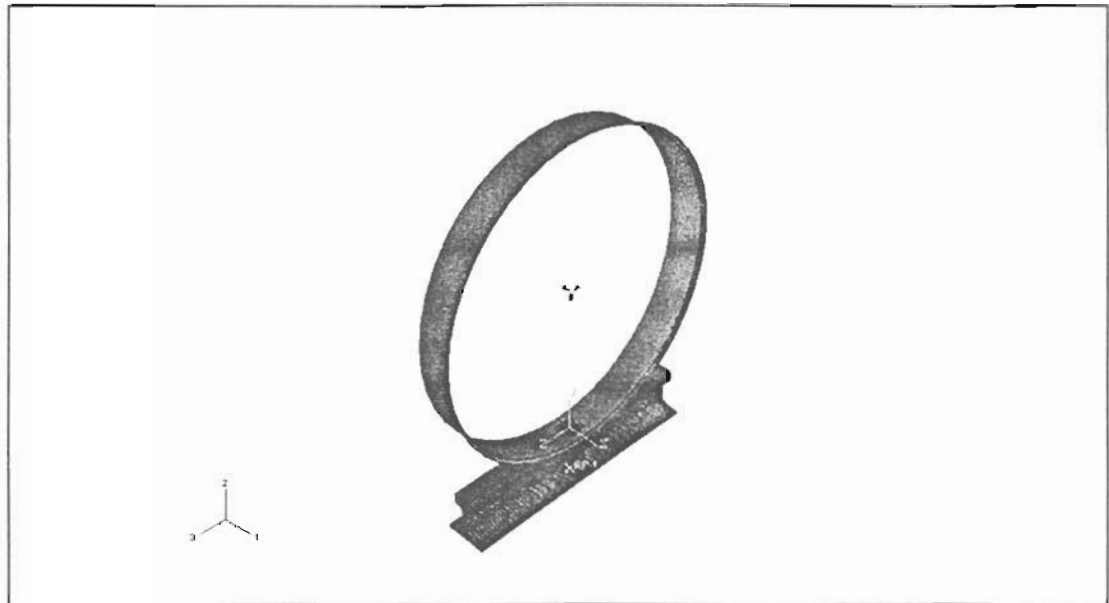
3.3.1 การสมมุติฐานของล้อรถไฟ

เนื่องจากงานวิจัยนี้เน้นการศึกษาไปที่รางรถไฟดังนั้นจึงได้ตั้งสมมุติฐานให้ล้อรถไฟมีคุณสมบัติของวัสดุเป็นแบบแข็งเกร็ง(Rigid Body) คือวัตถุไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างเมื่อถูกแรงกระทำ

3.3.2 การสมมุติฐานของรางรถไฟ

เนื่องจากงานวิจัยนี้เน้นการศึกษาการรับภาระของรางรถไฟ ดังนั้นจึงได้ตั้งสมมุติฐาน 2 สถานะคือสถานะแรกให้รางรถไฟมีการรองรับแบบยึดแน่นตลอดหน้าตัด (Fixed Support) และสถานะที่สองให้รางรถไฟมีการรองรับอย่างง่าย(Simple Support) แต่สามารถให้มีการขยายตัวของวัสดุเมื่อรับภาระได้ทางด้านตามยาวของรางรถไฟ

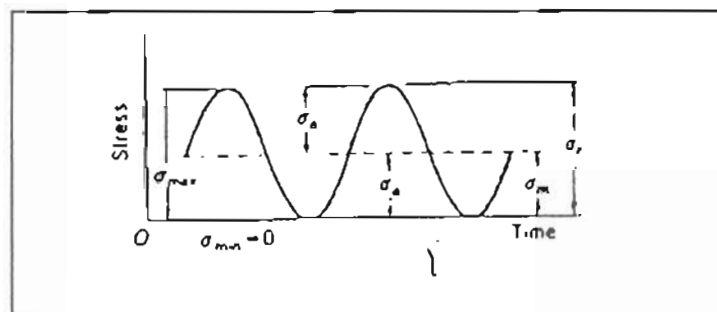
3.3.3 การตั้งสมมุติฐานของผิวสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟกำหนดให้ล้อและรางมีผิวสัมผัสกันตลอดการรับภาระ (Contact Region)



ภาพที่ 3-10 แสดงแบบจำลองการรับภาระของรางรถไฟแบบผิวสัมผัส (Contact Region)

3.3.4 การตั้งสมมุติฐานของการรับภาระ (Loading)

เนื่องจากการวิเคราะห์หาค่าความเค้นพอนมิสเสสดังนั้นจึงกำหนดให้การรับภาระของรางสูงสุดที่ 7.5 ตันต่อ 1 ล้อ และต่ำสุดที่ 0 ตันซึ่งเป็นค่าที่กำหนดโดยการรถไฟแห่งประเทศไทย



ภาพที่ 3-11 แสดงการรับภาระของรางรถไฟสูงสุด และต่ำสุด

3.3.5 มีการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุทำรางรถไฟจากการทดสอบแรงดึงเพื่อกำหนดลงในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 แสดงค่าคุณสมบัติของวัสดุทำรางรถไฟ

วัสดุรางรถไฟ	ค่ายังโมดูลัส (E), GPa	ค่าอัตราส่วนปัวซอง (V)
ชนิด 80 A	219	0.3
ชนิด 70 A	210	0.3
JIS S45C	205	0.3

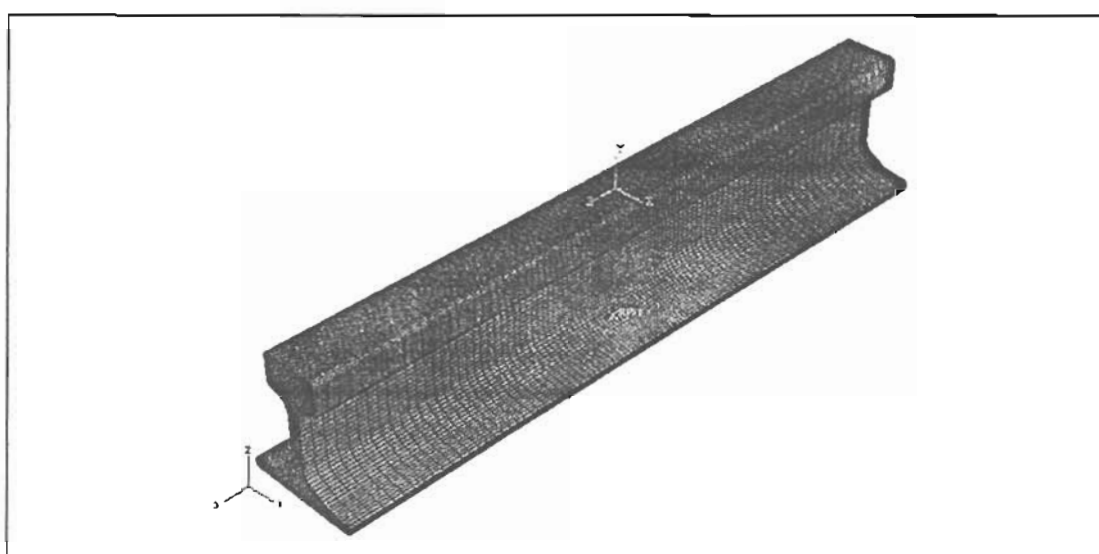
3.4 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองและการแบ่งเอลิเมนต์

แบบจำลองของรางรถไฟและล้อคังภาพที่ 3-9 ถูกออกแบบขึ้นจากสภาวะการรับภาระจริง โดยมีการกำหนดขอบเขตของรางให้รับภาระจากล้อรถไฟเป็นแบบผิวสัมผัส (Contact Region) มีการยึดฐานรางรถไฟ 2 สภาวะคือ

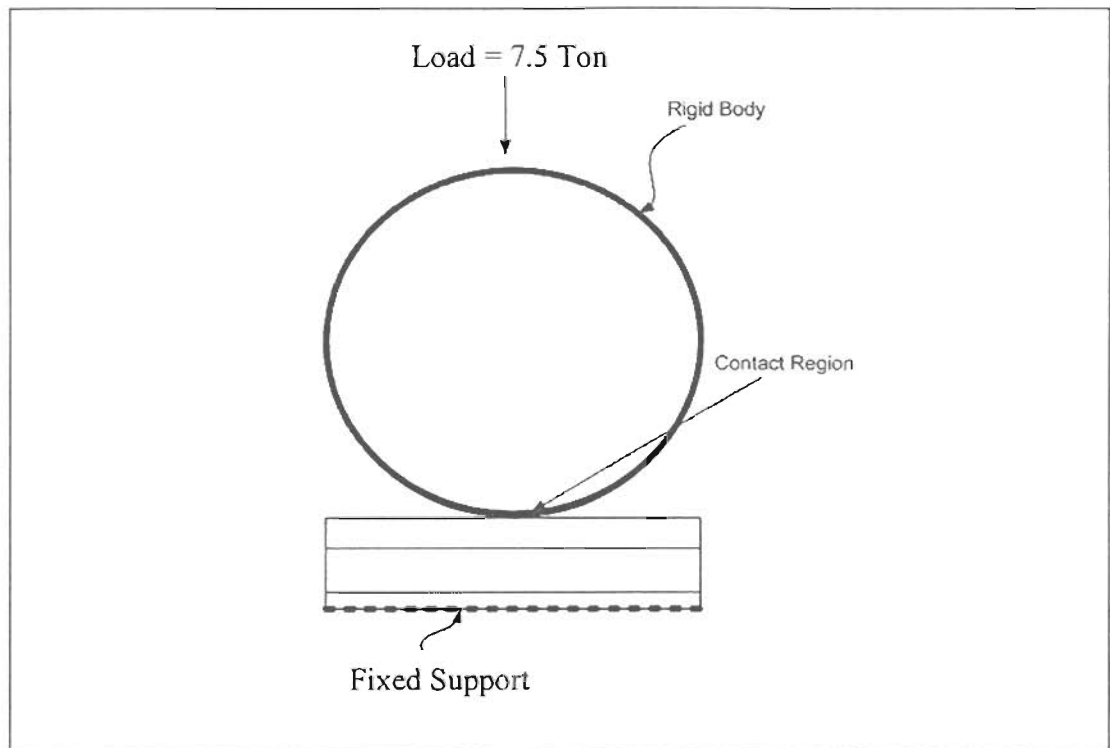
3.4.1 สภาวะที่รางรถไฟมีการรองรับแบบยึดแน่นตลอดหน้าตัด (ภาพที่ 3-13) กำหนดให้การรับภาระของรางสูงสุดที่ 7.5 ตันต่อ 1 ล้อ และต่ำสุดที่ 0 มีการกำหนดขอบเขตให้รางเคลื่อนตัวได้ในแนวแกน 2 ส่วนในแนวแกน 1 และแนวแกน 3 จะถูกควบคุม (ทิศทางแสดงในภาพที่ 3-12)

3.4.2 สภาวะที่รางรถไฟมีการรองรับอย่างง่าย (ภาพที่ 3-14) กำหนดให้การรับภาระของรางสูงสุดที่ 7.5 ตันต่อ 1 ล้อ และต่ำสุดที่ 0 มีการกำหนดขอบเขตให้รางเคลื่อนตัวได้ในแนวแกน 2 และ 3 ส่วนในแนวแกน 1 จะถูกควบคุม ทิศทางแสดงในภาพที่ 3-12

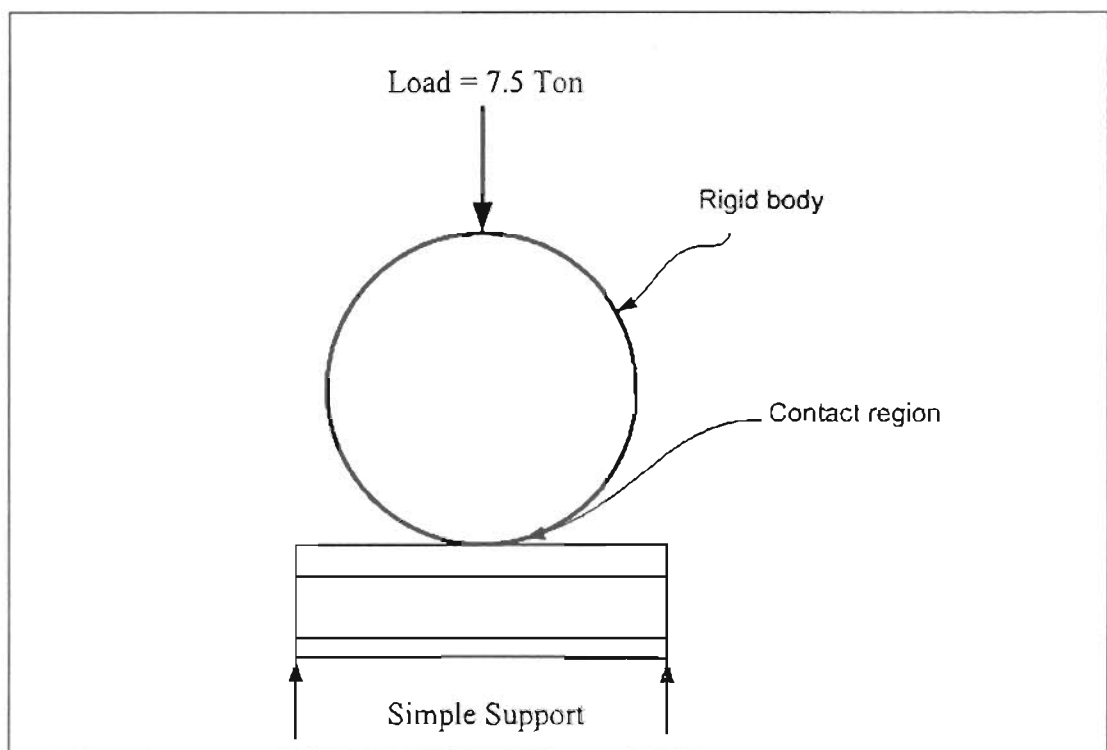
ส่วนการแบ่งเอลิเมนต์ แยกเป็นเอลิเมนต์ 3 มิติแบบสี่เหลี่ยมที่เชื่อมต่อกับรางรถไฟ และเอลิเมนต์แบบแข็งเกร็งที่ล้อรถไฟ ดังภาพที่ 3-12



ภาพที่ 3-12 แสดงการแบ่งเอลิเมนต์แบบรูปทรงสี่เหลี่ยมที่เชื่อมต่อกับ



ภาพที่ 3-13 แสดงการกำหนดขอบเขตของปัญหาแบบฐานยึดแน่นตลอด(Fixed Support)



ภาพที่ 3-14 แสดงการกำหนดขอบเขตของปัญหารูปร่างรองรับอย่างง่าย (Simply Support)

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์และผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์และผลการทดลองของงานวิจัยนี้ซึ่งได้แบ่งเป็นสองส่วน ได้แก่ส่วนแรกเป็นการทดสอบวัดชั้นแข็งผิวของวัสดุโลหะ, การทดสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะ และการทดสอบความล้าของโลหะ ส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1 ผลการทดสอบวัดค่า Yield Strength และค่า Tensile Strength ของโลหะ

ผลการทดสอบวัดค่า Yield Strength และค่า Tensile Strength ของโลหะทั้ง 3 ชนิดมีดังนี้

ตารางที่ 4-1 ค่า Yield Strength และค่า Tensile Strength ของโลหะทั้ง 3 ชนิดที่ได้จากการทดสอบ

คุณสมบัติทางกล	ชั้นที่	เหล็กทรงรีไฟ		
		เกรด 80 A	เกรด 70 A	JIS S45C
ค่า Yield Strength (MPa)	ชั้นที่ 1	560	532	436
	ชั้นที่ 2	566	483	423
	ชั้นที่ 3	570	507	429
	ค่าเฉลี่ย(MPa)	565	508	424
ค่า Tensile Strength (MPa)	ชั้นที่ 1	949	822	769
	ชั้นที่ 2	979	836	823
	ชั้นที่ 3	966	830	789
	ค่าเฉลี่ย(MPa)	964	829	775
ค่า Elongation %	ชั้นที่ 1	14.5	21.7	19.2
	ชั้นที่ 2	13.3	21.5	18.4
	ชั้นที่ 3	15.7	21.3	18.7
	ค่าเฉลี่ย	14.5	21.5	18.6

จากผลการทดสอบค่าความเค้นที่จุดคลาก (Yield Strength) และค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength) ของโลหะทั้ง 3 ชนิดโดยการทดสอบแรงดึงวัสดุทำรางรถไฟ 3 ชนิด ๆ ละ 3 ตัวอย่าง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยปรากฏว่าสำหรับค่าความเค้นที่จุดคลากและค่าความเค้นเนื่องจากแรงดึงสูงสุดได้ผลออกมาคล้ายกันกล่าวคือ วัสดุรางรถไฟเกรด 80A มีค่ามากที่สุดรองลงมาเป็นวัสดุเกรด 70A และต่ำสุดเป็น JIS S45C ส่วนค่าสัดส่วน (Elongation) ปรากฏว่าวัสดุรางรถไฟเกรด 70A มีค่ามากที่สุดรองลงมาเป็นวัสดุ เกรด 80A และน้อยสุดเป็นวัสดุ JIS S45C

4.2 ผลการทดสอบวัดชั้นแข็งลิค

ผลการทดสอบการวัดชั้นแข็งลิคของวัสดุรางรถไฟทั้ง 3 ชนิด มีค่าดังนี้

ตารางที่ 4-2 แสดงผลการทดสอบวัดชั้นแข็งลิค

วัสดุ	ผลการทดสอบวัดชั้นแข็งลิค (HB)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 1	ค่าเฉลี่ย
ราง 70 ปอนด์A	15.7	15.8	15.5	15.7
ราง 80 ปอนด์A	21.0	21.2	21.0	21.1
เหล็กกล้า JIS S45C	20.7	21.6	20.5	20.9

จากผลการทดสอบวัดชั้นแข็งลิคของวัสดุทำรางรถไฟทั้ง 3 เกรด ได้ผลออกมาใกล้เคียงกัน โดยที่วัสดุทำรางรถไฟเกรด 80A ได้ค่ามากที่สุดรองลงมาเป็นวัสดุ เกรด JIS S45C และน้อยที่สุดเป็นวัสดุ เกรด 70A

4.3 ผลการทดสอบวัดความล้า

จากผลการทดสอบวัดความล้าของวัสดุรางรถไฟด้วยเครื่องทดสอบความล้าแบบโมเมนต์ดัด โดยการปรับเปลี่ยนน้ำหนักจนกระทั่งเกิดความเสียหายทำให้สามารถทราบแนวโน้มความเสียหายจากผลการทดสอบความล้า ซึ่งถูกแสดงไว้ในตาราง 4-3 ถึง 4-5 สำหรับวัสดุทั้ง 3 เกรด และภาพที่ 4-1 ถึง 4-3 จะเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นด้านทานการล้าและค่าเฉลี่ยจำนวนรอบที่ขาดของชิ้นทดสอบรางรถไฟ

ตารางที่ 4-3 แสดงผลการทดสอบหาจำนวนรอบความเสียหายวัสดุรางรถไฟ เกรด 80 A

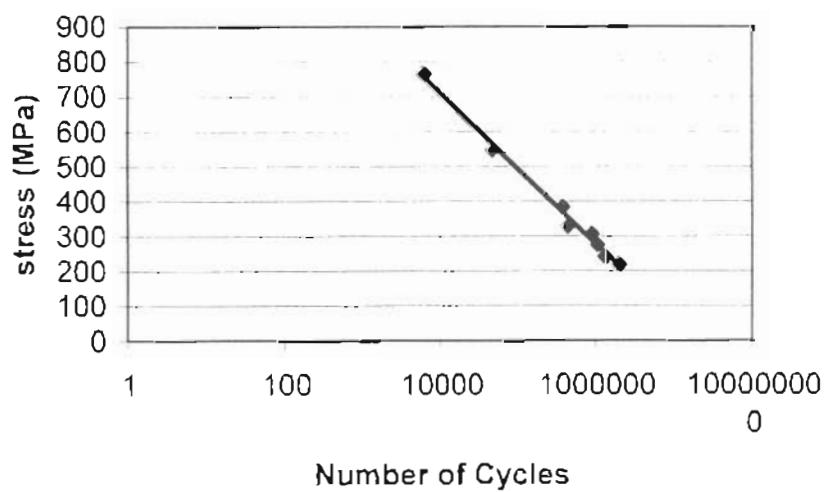
น้ำหนัก	ความต้านทาน การล้า(MPa)	จำนวนรอบ			ค่าเฉลี่ย (จำนวนรอบ)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
20	218.58	2,000,000	2,000,000	2,000,000	2,000,000
22	240.44	1,274,379	1,396,935	1,334,657	1,332,659
25	273.23	1,158,247	1,090,573	1,112,678	1,089,215
28	306.02	901,482	935,713	917,483	915,254
30	327.88	436,528	473,521	454,298	452,846
35	382.52	383,866	374,560	405,181	387,269
50	546.46	45,991	49,918	47,883	47,931
70	765.04	5,954	5,891	6,158	6,101

ตารางที่ 4-4 แสดงผลการทดสอบหาจำนวนรอบความเสียหายวัสดุรางรถไฟ เกรด 70 A

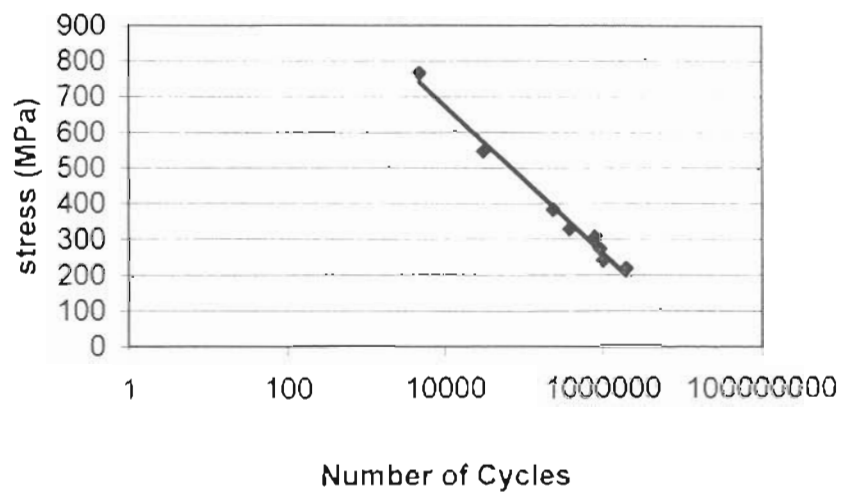
น้ำหนัก	ความต้านทาน การล้า(MPa)	ผลการทดสอบ			ค่าจำนวนรอบ เฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
20	218.58	2,000,000	2,000,000	2,000,000	2,000,000
22	240.44	931,207	1,103,945	1,025,247	1,020,133
25	273.23	952,305	852,305	998,376	934,328
28	306.02	809,055	781,352	822,792	804,399
30	327.88	355,487	425,310	382,419	387,738
35	382.52	229,495	237,253	246,872	237,873
50	546.46	32,991	29,271	31,483	31,248
70	765.04	4,986	4,218	5,126	4,777

ตารางที่ 4-5 แสดงผลการทดสอบหาจำนวนรอบความเสียหายวัสดุเหล็กกล้าเกรด JIS S45C

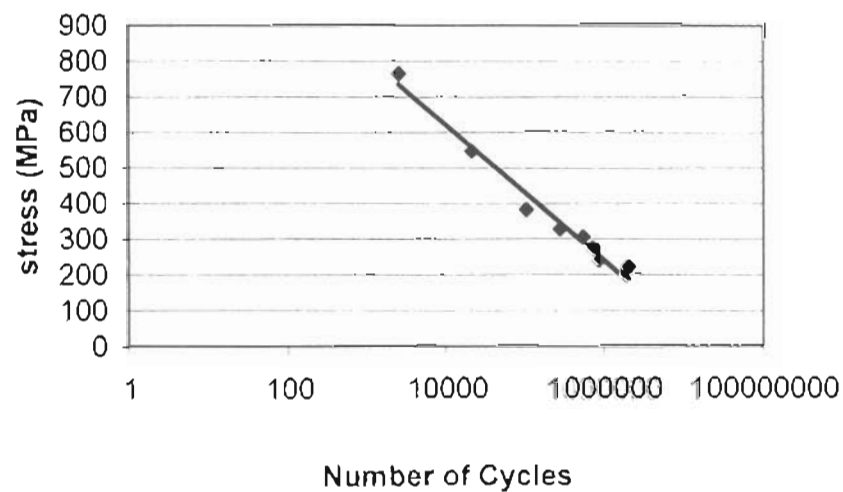
น้ำหนัก	ความต้านทาน การล้า(MPa)	ผลการทดสอบ			ค่าเฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
20	218.58	2,000,000	2,000,000	2,000,000	2,000,000
22	240.44	897,364	893,385	857,561	882,770
25	273.23	724,337	707,573	760,052	730,654
28	306.02	582,917	518,183	559,209	553,436
30	327.88	301,158	260,215	283,037	281,470
35	382.52	97,928	117,528	101,109	105,521
50	546.46	23,151	20,234	21,021	21,468
70	765.04	2,125	2,834	2,643	2,534



ภาพที่ 4-1 กราฟ S-N Curve ของวัสดุรางรถไฟ เกรด 80 A

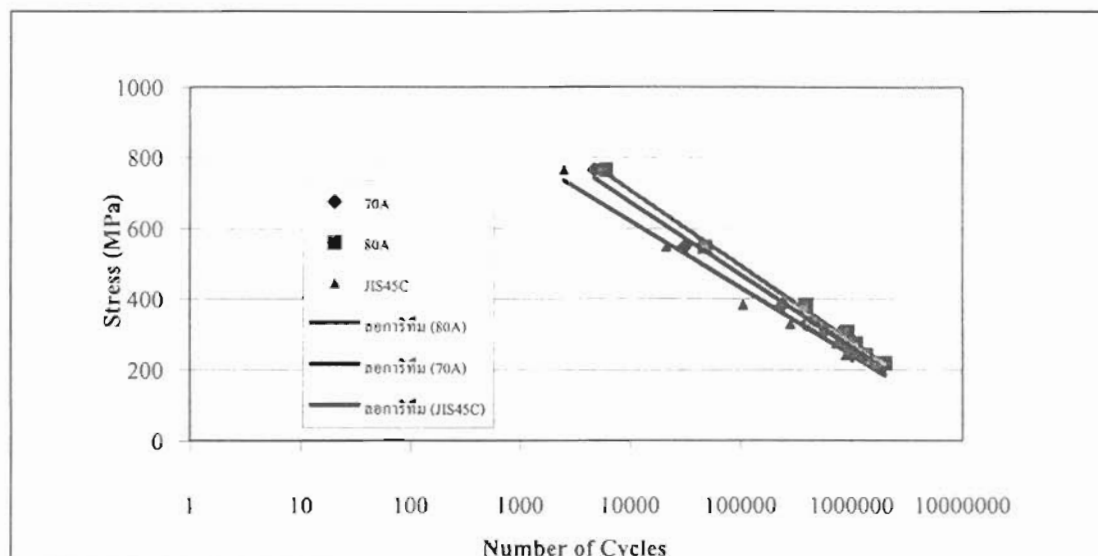


ภาพที่ 4-2 กราฟ S-N Curve ของวัสดุรางรถไฟ เกรด 70 A



ภาพที่ 4-3 กราฟ S-N Curve ของวัสดุเหล็กกล้าเกรด JIS S45C

ผลจากการทดสอบกราฟ S-N ของวัสดุทั้ง 3 เกรด สามารถนำมารวม เพื่อเปรียบเทียบดูแนวโน้มของกราฟ เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ผลของความล้าได้จากภาพที่ 4-4



ภาพที่ 4-4 กราฟเปรียบเทียบ S-N Curve ของวัสดุ แรงรไฟฟ้าทั้ง 3 เกรด

เพื่อให้สอดคล้องกับสมการความสัมพันธ์ของความล้าของวัสดุทั้ง 3 ชนิดจึงได้นำมาแสดงรวมกันไว้ในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 แสดงสมการความสัมพันธ์ของความล้าของเหล็กทั้ง 3 ชนิด

ชนิดเหล็กทำแรงรไฟ	สมการความสัมพันธ์ของความล้า	ค่า R-squared
80 A	$Y = 5127.9 x^{-0.2111}$	$R^2 = 0.9672$
70 A	$Y = 4491.3 x^{-0.2044}$	$R^2 = 0.9777$
JIS S45C	$Y = 3486.2 x^{-0.1896}$	$R^2 = 0.9881$

4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ผลจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการจำลองสถานะการรับน้ำหนักบรรทุกขนาด 7.5 ตัน/ล้อ ส่วนการรองรับแรงรไฟออกเป็น 2 แบบคือ แบบฐานยึดแน่นตลอด และแบบฐานรองรับอย่างง่าย (Simply Support) แล้วปรับเปลี่ยนคุณสมบัติวัสดุแรงรไฟเพื่อดูผลการวิเคราะห์ด้านความเค้นรวม (Von Mises Stress), ระยะการโก่ง (Deflection), ค่าความเค้นหลักสูงสุด-ต่ำสุด (Maximum - Minimum Principal Stress), ค่าความเครียดหลักสูงสุด-ต่ำสุด (Maximum - Minimum Principal Strain) ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4-7

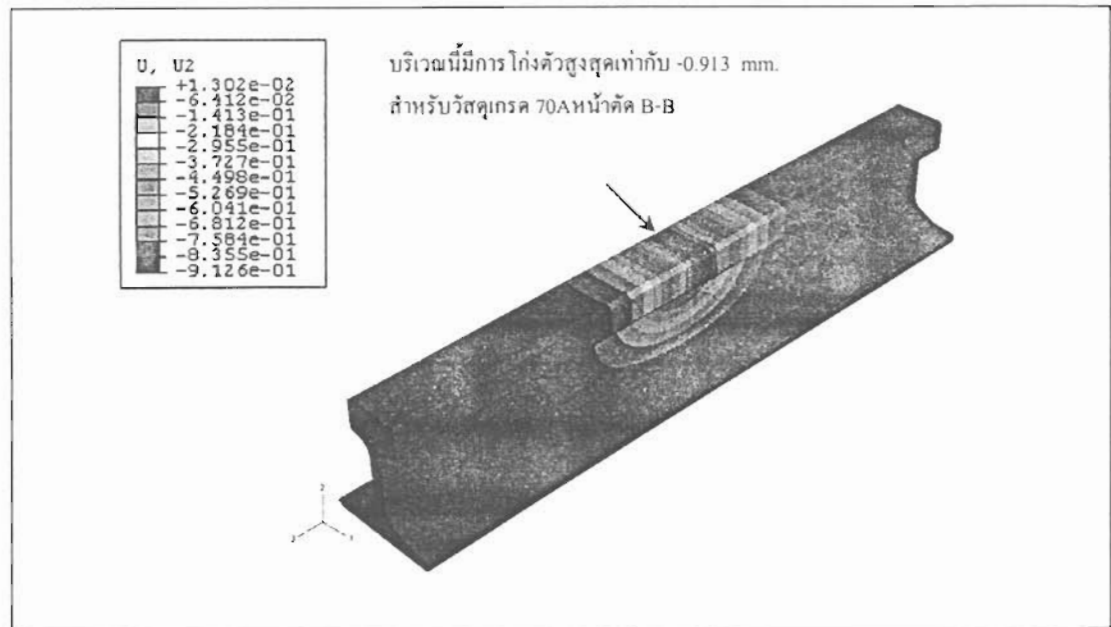
ตารางที่ 4-7 แสดงผลการวิเคราะห์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการรองรับแบบยึดแน่นตลอด

ผลการวิเคราะห์	วัสดุเกรด 80 A	วัสดุเกรด 70A	วัสดุเกรด JIS S45C	
	หน้าตัด A - A	หน้าตัด B - B	หน้าตัด A - A	หน้าตัด B - B
การโก่งของราง , mm	-0.525	-0.913	-1.000	-1.271
ความเค้นรวม , MPa	125.60	164.7	126.00	150.30
ความเค้นหลักสูงสุด ,MPa	51.82	41.65	51.96	41.32
ความเค้นหลักต่ำสุด ,MPa	-125.40	-159.10	-125.80	-150.10
ความเครียดหลักสูงสุด	0.00654	0.01355	0.01378	0.01737
ความเครียดหลักต่ำสุด	-0.01362	-0.02622	-0.02867	-0.03392

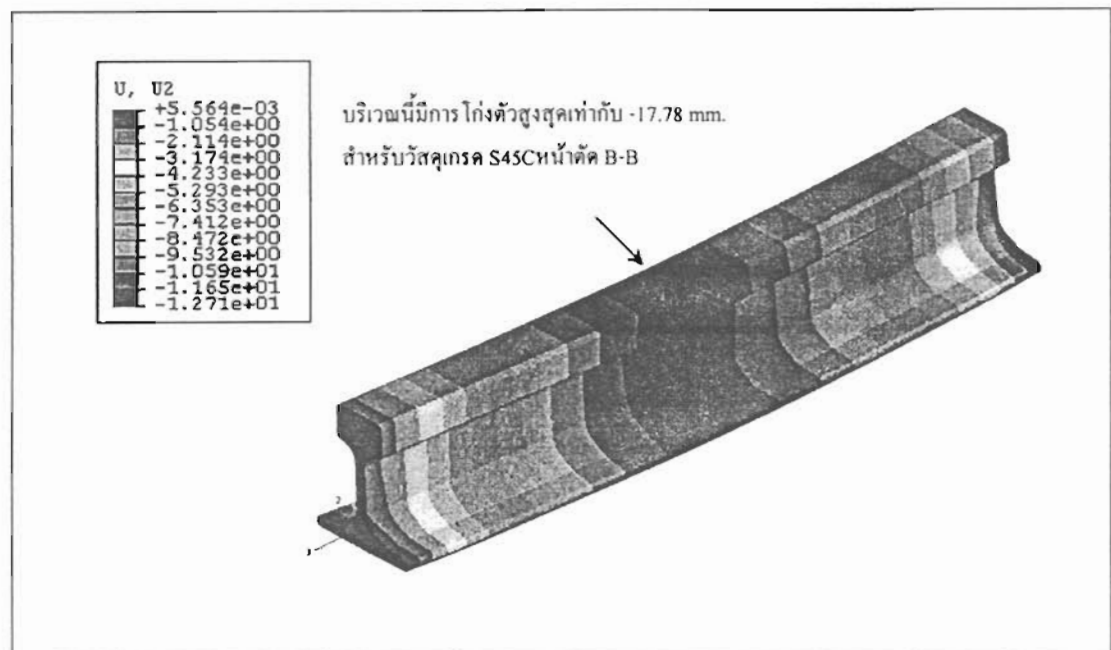
ตารางที่ 4-8 แสดงผลการวิเคราะห์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการรองรับอย่างง่าย

ผลการวิเคราะห์	วัสดุเกรด 80 A	วัสดุเกรด 70A	วัสดุเกรด JIS S45C	
	หน้าตัด A - A	หน้าตัด B - B	หน้าตัด A - A	หน้าตัด B - B
การโก่งของราง , mm	-6.047	-12.710	-12.70	-17.78
ความเค้นรวม , MPa	310.60	333.70	310.60	333.70
ความเค้นหลักสูงสุด ,MPa	103.30	110.40	103.30	110.40
ความเค้นหลักต่ำสุด ,MPa	-214.70	-229.80	-214.40	-229.80
ความเครียดหลักสูงสุด	0.01579	0.02516	0.03316	0.03523
ความเครียดหลักต่ำสุด	-0.0309	-0.04893	-0.06382	0.06850

จากภาพที่ 4-5 และภาพที่ 4-6 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าการโก่งของรางรถไฟจากการจำลอง
สภาวะการรองรับของรางรถไฟเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 7.5 ตัน

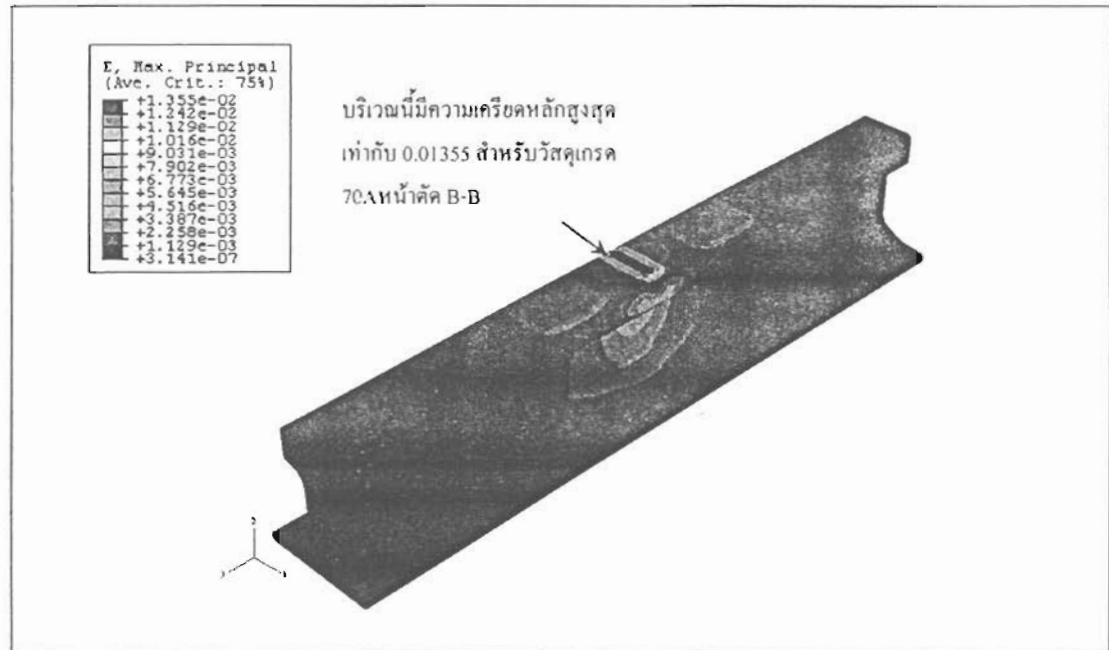


ภาพที่ 4-5 แสดงผลการวิเคราะห์การโก่งของรางรถไฟที่ฐานถูกยึดแน่นตลอด

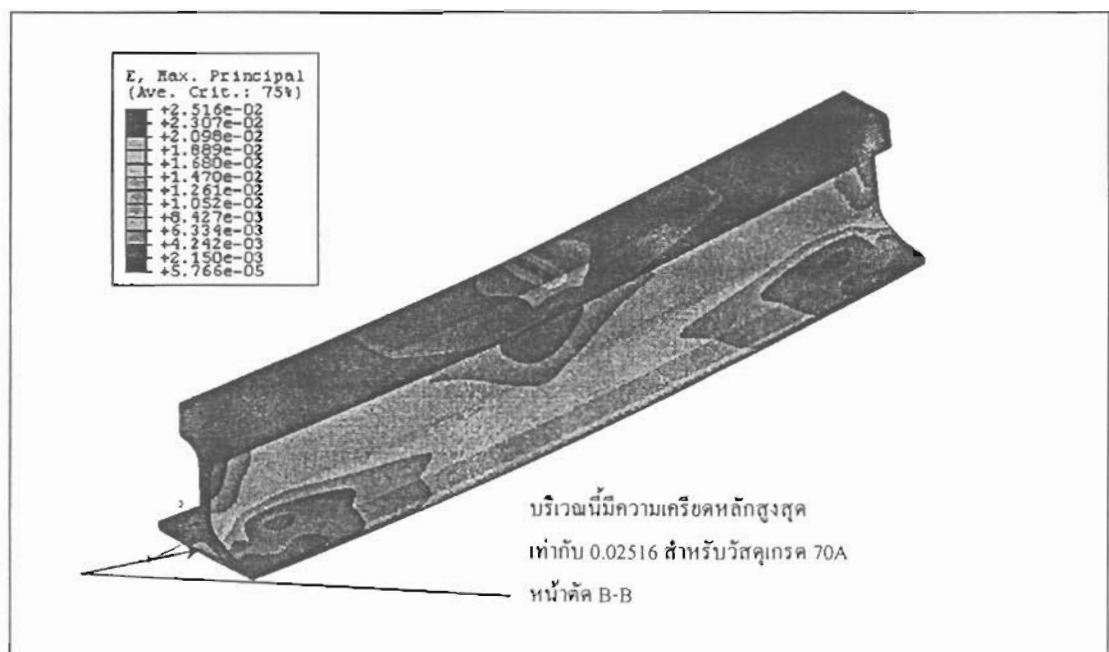


ภาพที่ 4-6 แสดงผลการวิเคราะห์การโก่งของรางรถไฟที่มีฐานรองรับอย่างง่าย

จากภาพที่ 4-7 และภาพที่ 4-8 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลักสูงสุด (Maximum Principal Strain) ของรางรถไฟที่จากการจำลองสถานะการรองรับของรางรถไฟเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 7.5 ตัน

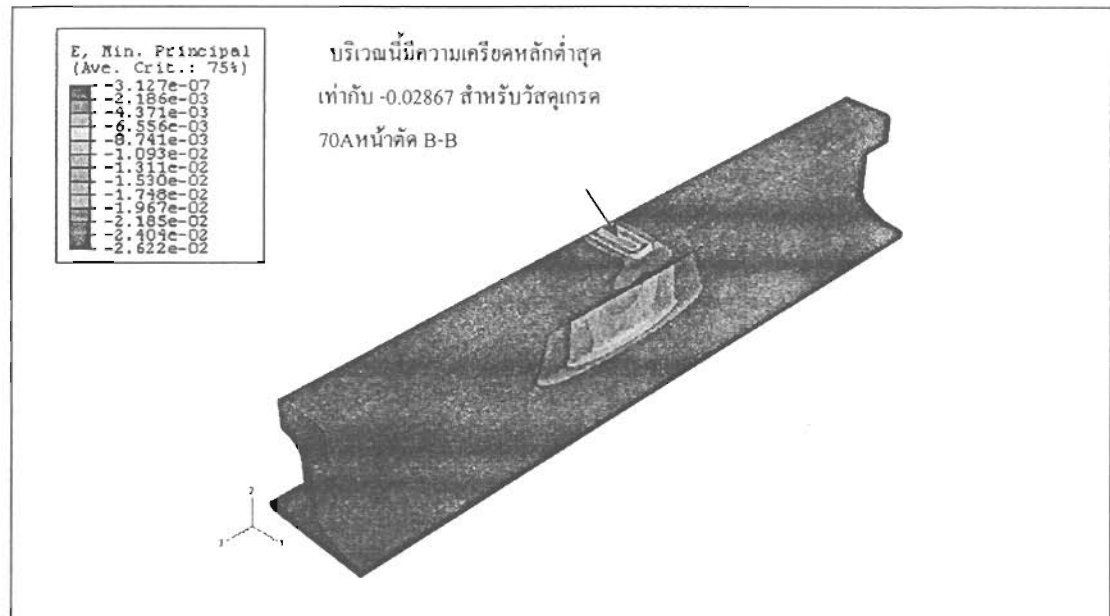


ภาพที่ 4-7 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลักสูงสุดของรางรถไฟที่ฐานถูกยึดแน่นตลอด

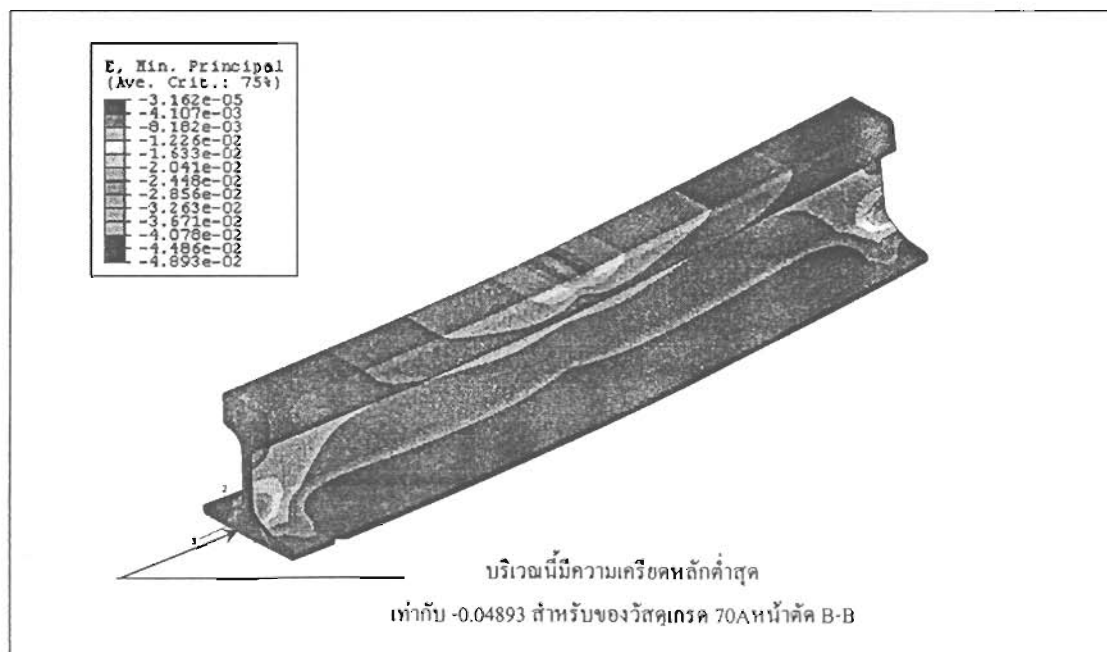


ภาพที่ 4-8 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลักสูงสุดของรางรถไฟที่มีฐานรองรับอย่างง่าย

จากภาพที่ 4-9 และภาพที่ 4-10 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลักต่ำสุด (Maximum Principal Strain) ของรางรถไฟที่จากการจำลองสถานะการรองรับของรางรถไฟเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 7.5 ตัน

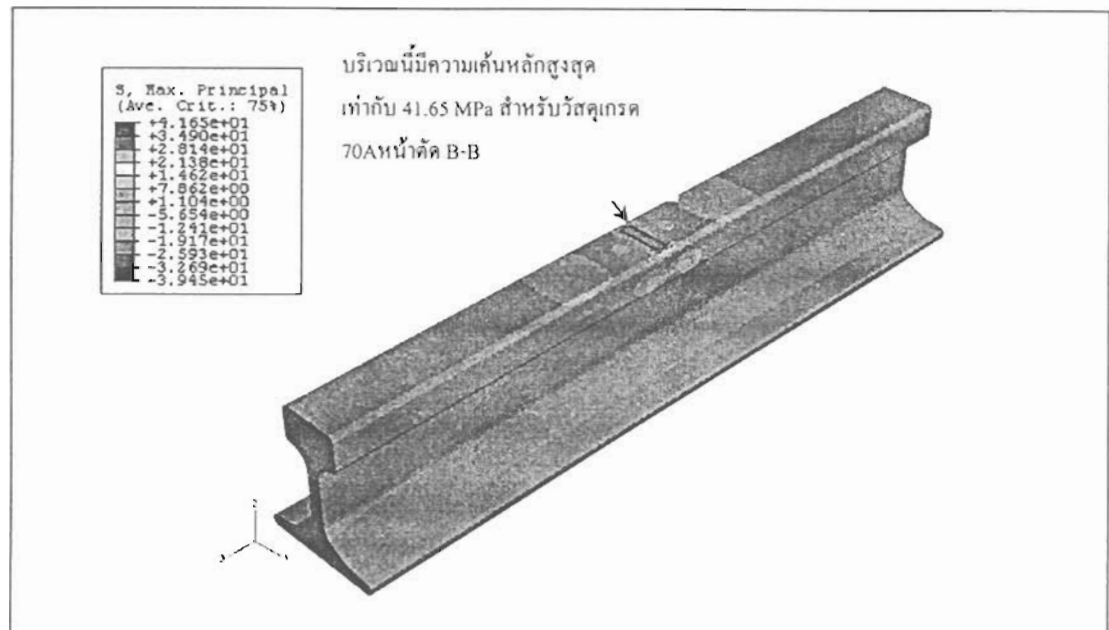


ภาพที่ 4-9 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลักต่ำสุดของรางรถไฟที่ฐานถูกยึดแน่นตลอด

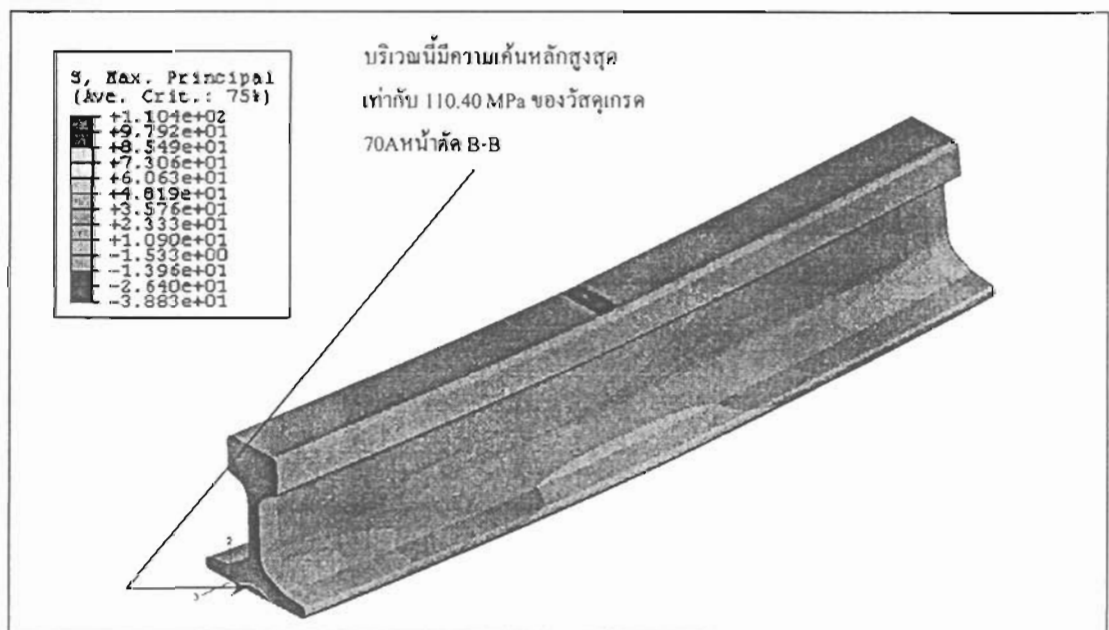


ภาพที่ 4-10 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดหลักต่ำสุดของรางรถไฟที่ฐานรองรับอย่างง่าย

จากภาพที่ 4-11 และภาพที่ 4-12 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าความเค้นหลักสูงสุด(Maximum Principal Stress) ของรางรถไฟจากการจำลองสภาวะการรองรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 7.5 ตัน

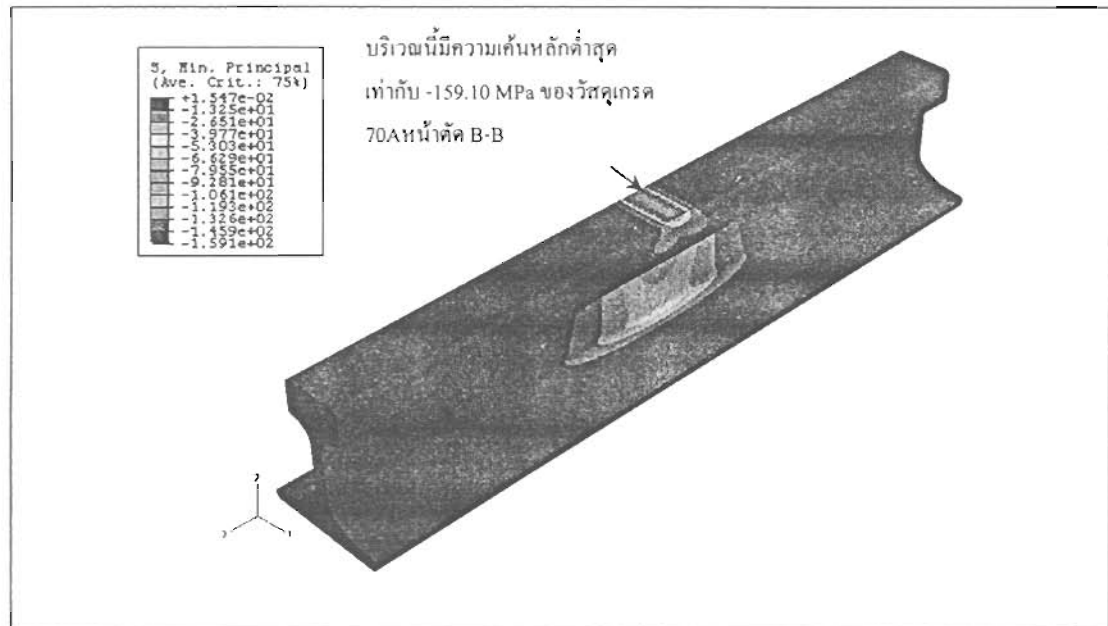


ภาพที่ 4-11 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าความเค้นหลักสูงสุดของรางรถไฟที่ฐานถูกยึดแน่นตลอด

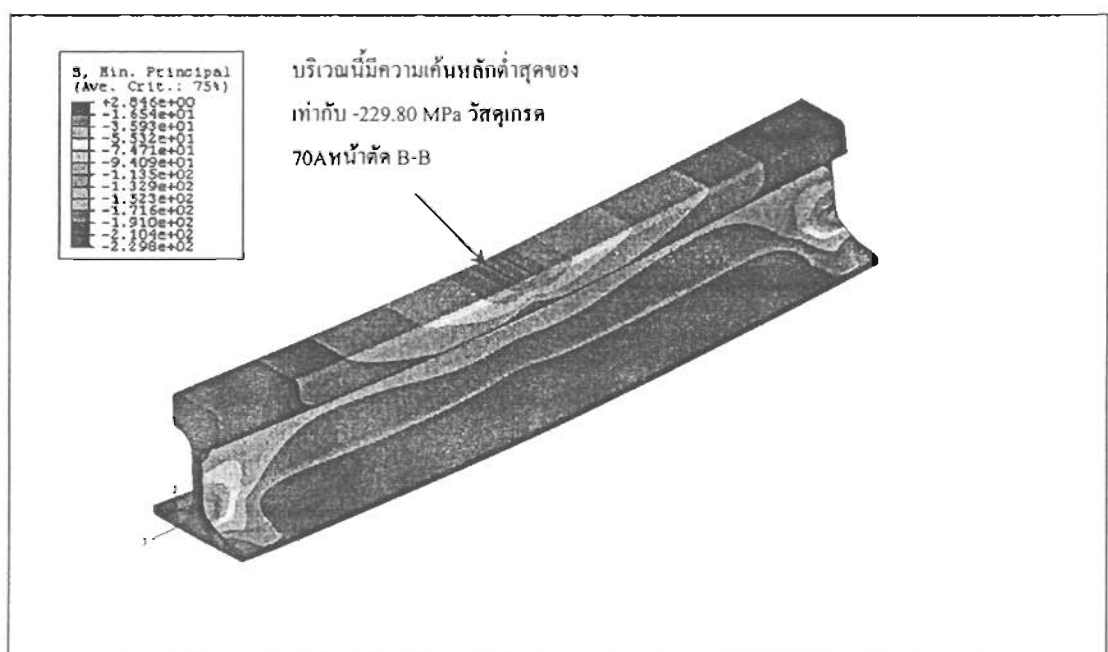


ภาพที่ 4-12 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าความเค้นหลักสูงสุดของรางรถไฟที่มีฐานรองรับอย่างง่าย

จากภาพที่ 4-13 และภาพที่ 4-14 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นหลักต่ำสุด(Minimum Principal Stress) ของรางรถไฟจากการจำลองสถานะการรองรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 7.5 ตัน

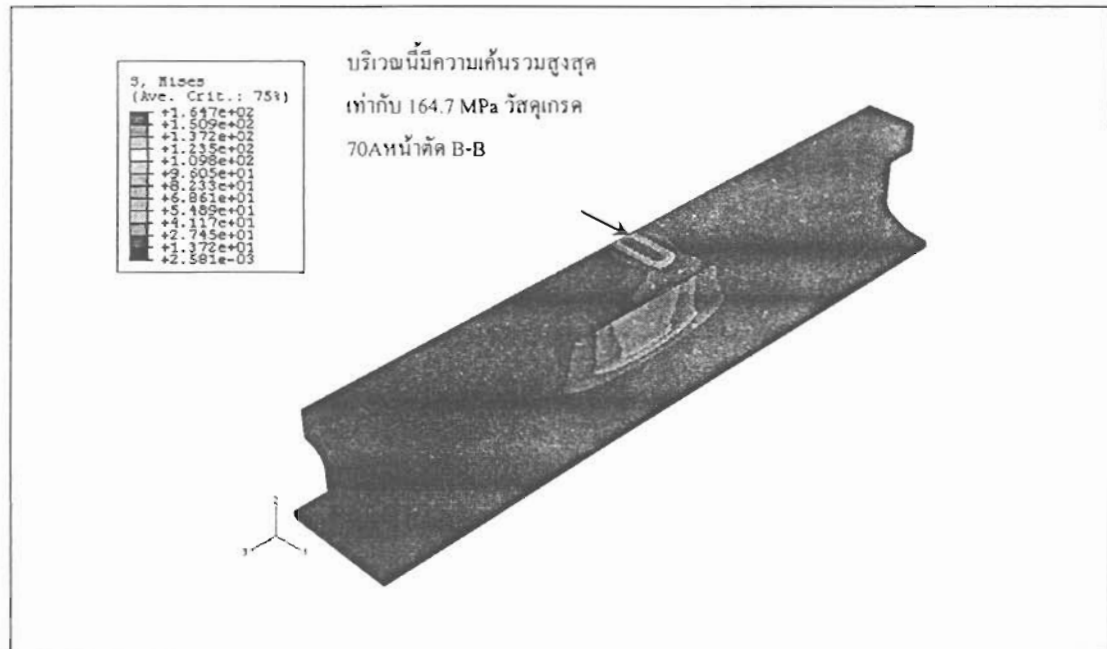


ภาพที่ 4-13 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นหลักต่ำสุดของรางรถไฟที่ฐานถูกยึดแน่นตลอด

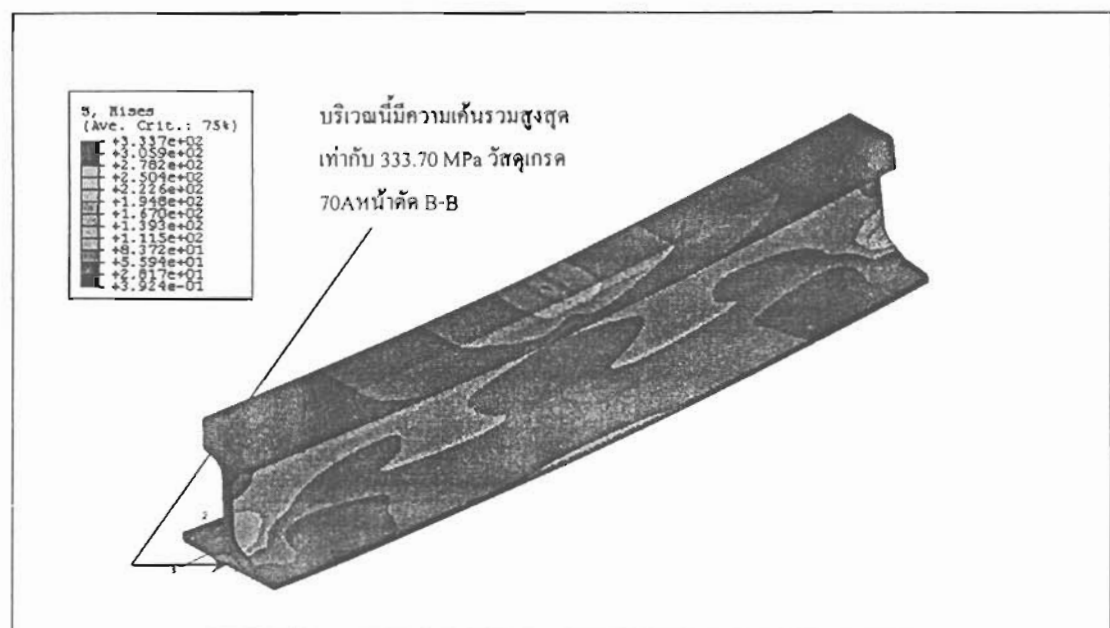


ภาพที่ 4-14 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นหลักต่ำสุดของรางรถไฟที่มีฐานรองรับอย่างง่าย

จากภาพที่ 4-15 และภาพที่ 4-16 แสดงผลการวิเคราะห์แสดงค่าความเค้นรวม (Von Mises Stress) ของรางรถไฟจากการจำลองสภาวะการรองรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 7.5 ตัน



ภาพที่ 4-15 แสดงผลการวิเคราะห์ Minimum Principal Strain ของรางรถไฟที่ฐานถูกยึดแน่นตลอด



ภาพที่ 4-16 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นรวมของรางรถไฟที่มีฐานรองรับอย่างง่าย

4.5 การคำนวณอายุการล้าตัว

การคำนวณอายุการล้าตัวของวัสดุรางรถไฟสามารถทำได้โดยการนำผลค่าความเค้นรวมจากการวิเคราะห์แบบสถิตย์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ภายใต้ขอบเขตสถานะของฐานรองรับ 2 แบบคือ แบบอย่างง่าย (Simply Support) และแบบ ยึดแน่นตลอดฐาน (Fixed) ส่วนการรับภาระจะเป็นภาระแบบผิวสัมผัส (Contact Region) ขนาด 7.5 ดัน/ล้อ แล้วนำค่ามาหาจำนวนรอบที่ทำให้เกิดความเสียหายโดยใช้สมการคูัดแมนจากนั้นเปลี่ยนจำนวนรอบความเสียหายให้เป็นจำนวนปีโดยการคำนวณจากจำนวนเที่ยวของการเดินรถซึ่งใช้กรณีการเดินรถของสถานีรถไฟพิษณุโลกเป็นกรณีศึกษา ตัวอย่างการการคำนวณอายุการล้าตัวจากตารางที่ 4-7 แสดงผลค่าความเค้นรวมของวัสดุรางรถไฟเกรด 80A บนรางรถไฟที่มีการรองรับอย่างง่ายบนหน้าตัด A-A สามารถคำนวณหาค่า S_f ได้โดยใช้สมการความสัมพันธ์ของจากสมการ Goodman ดังนี้

$$\frac{\sigma_a}{S_f} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \quad (2-34)$$

จากตารางที่ 4-7 เมื่อ $\sigma_{\max} = \sigma_{\text{von}} = 310.6 \text{ MPa}$ และ $\sigma_{\min} = 0$

เนื่องจากภาระที่มากระทำเป็นรอบแบบ zero to maximum ดังนั้น $\sigma_m = \sigma_a$ ดังนั้น

$$\sigma_m = \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{310.6}{2} = 155.3 \text{ MPa}$$

จากสมการ (2-36) จะสามารถหาค่าขีดจำกัดการทนทานได้คือ

$$S_f = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_a}{S_{ut}}} = \frac{155.3}{1 - \frac{155.3}{964}} = 185.123 \text{ MPa}$$

จากการทดสอบการล้าของวัสดุรางรถไฟชนิด 80A (ตารางที่ 4-6) ที่มีรอบอายุการใช้งานต่ำกว่า 10^6 รอบ สามารถประเมินอายุการใช้งานได้จาก สมการทั่วไปของความล้าคือ

$$S_f = a \cdot N_f^b$$

หรือ

$$N_f = \left(\frac{S_f}{a} \right)^{\frac{1}{b}} = \left(\frac{185.123}{5127.9} \right)^{\frac{1}{-0.2111}} = 6.81 \times 10^6$$

ดังนั้นอายุการใช้งานทั้งหมดเท่ากับ 6.81 ล้านรอบ

เพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับการประเมินอายุการใช้งานของรางรถไฟจึงได้ยกกรณีศึกษาการเดินรถไฟจากตารางการเดินรถไฟยังสายเหนือผ่านสถานีพิษณุโลกเริ่มใช้วันที่ 1 กรกฎาคม 2549 มีขบวนรถผ่านสถานีนี้เป็น จำนวนโบกี้บรรทุกเฉลี่ย 5-15 โบกี้ โดยในหนึ่งโบกี้มีจำนวนล้อที่วางบนรางเท่ากับ 4 ล้อแต่ละล้อมีระยะห่างกันประมาณ 1.7 เมตร ดังนั้นสามารถหาอายุการใช้งานของเหล็กรางรถไฟในสภาวะที่รางมีหน้าตัดและเนื้อวัสดุสม่ำเสมอตลอดได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{อายุการใช้งาน(สัปดาห์)} &= \frac{\text{อายุการใช้งานทั้งหมดเท่ากับ } 6.81 \text{ ล้านรอบ}}{\text{จำนวนโบกี้} \times \text{จำนวนล้อ} \times \text{จำนวนเที่ยวต่อวัน} \times \text{จำนวนวันต่อสัปดาห์}} \\ &= \frac{6.81 \times 10^6}{10 \times 4 \times 59 \times 365} = 7.91 \text{ ปี}\end{aligned}$$

ดังนั้นความเค้นรวมของวัสดุรางรถไฟเกรด 80A บนรางรถไฟที่มีการรองรับอย่างง่ายบนหน้าตัด A-A สามารถคำนวณหาค่าอายุการใช้งานประมาณ 9 ปี สำหรับผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองอื่นถูกสรุปไว้ในตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 แสดงผลการวิเคราะห์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคำนวณหาค่าอายุการใช้งานสำหรับการรองรับแบบยึดแน่นตลอด

ชนิดวัสดุ	หน้าตัด ราง	Tensile Strength (MPa)	ความต้านทาน การล้า, S_N (MPa)	จำนวนรอบ การล้า N_f รอบ	อายุการใช้งาน ปี
80 A	A-A	964	67.18	829.16×10^6	962.57
70 A	B-B	829	91.43	188.07×10^6	218.33
JIS S45C	A-A	775	68.57	997.45×10^6	1157.94
	B-B	775	83.22	359.35×10^6	417.17

ตารางที่ 4-10 แสดงผลการวิเคราะห์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคำนวณหาค่าอายุการใช้งาน
สำหรับการรองรับอย่างง่าย

ชนิดวัสดุ	หน้าตัด วาง	Tensile Strength (MPa)	ความต้านทาน การล้า, S_f (MPa)	จำนวนรอบการล้า N_f	อายุการใช้งาน ปี
80 A	A-A	964	185.123	6.81×10^6	7.91
70 A	B-B	829	208.89	3.30×10^6	3.834
JIS S45C	A-A	775	194.22	4.11×10^6	4.778
	B-B	775	121.626	2.55×10^6	2.96

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุรางรถไฟทั้ง 3 ชนิด สามารถแยกสรุปตามการทดสอบได้ดังนี้

5.1.1.1 การทดสอบแรงดึงของวัสดุรางรถไฟทั้ง 3 ชนิด ปรากฏว่าวัสดุรางรถไฟเกรด 80 A มีค่าแรงดึงสูงสุดที่ 964 MPa รองลงมาเป็นวัสดุรางรถไฟ เกรด 70A มีค่า 829 MP และต่ำสุดเป็นวัสดุเกรด JIS S45 C มีค่าเพียง 775.MPa

5.1.1.2 การทดสอบวัดชั้นแข็งลึก ของวัสดุรางรถไฟทั้ง 3 ชนิด ปรากฏว่าวัสดุรางรถไฟ เกรด 80A มีค่าความแข็งลึกมากที่สุดที่ 21.0 Hv รองลงมาเป็นวัสดุรางรถไฟเกรด Jis S45C มีค่า 20.7 Hv เป็นวัสดุเกรด และต่ำสุดเป็นวัสดุ เกรด 70 A มีค่า 15.7 Hv

5.1.2 สรุปผลการทดสอบความล้าตัวของวัสดุโลหะทั้ง 3 ชนิดปรากฏวัสดุรางรถไฟเกรด 80 A มีค่าความต้านทานการล้ามากที่สุดรองลงมาเป็นวัสดุรางรถไฟ เกรด 70A และต่ำสุดเป็นวัสดุเกรด JIS S 45C ดังตารางที่ 4-3 ถึงตารางที่ 4-4 และภาพที่ 4-1 ถึงภาพที่ 4-4 แสดง S-N Curve

5.1.3 จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อนำค่าความเค้นรวมพอนมิสเชส มาคำนวณหาค่าอายุการล้าตัวโดยกำหนดขอบเขตของปัญหาให้รางมีการรองรับแบบ Simple Support และแบบฐานยึดแน่นตลอดที่ฐานซึ่งสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

5.1.3.1 การวิเคราะห์การโค้งของรางปรากฏว่าเกิดการโค้งสูงสุดบริเวณกึ่งกลางของราง ทั้ง 2 แบบ ดังภาพที่ 4-5 และ 4-6

5.1.3.2 การเกิดความเครียดหลักสูงสุดและความเครียดหลักต่ำสุดเกิดขึ้นที่กึ่งกลางของรางสำหรับแบบ ยึดแน่นตลอด ส่วนการวิเคราะห์ที่ฐานรองรับเป็นแบบ Simple Support จะเกิดความเครียดที่ฐานรับแรงด้านข้างดังภาพที่ 4-7 ถึงภาพที่ 4-8

5.1.3.3 การเกิดความเค้นหลักสูงสุด เกิดที่กึ่งกลางรางสำหรับแบบฐานยึดแน่นตลอด และแบบ Simple Support จะเกิดขึ้นที่บริเวณฐานรองรับดังภาพที่ 4-11 ถึงภาพที่ 4-12

5.1.3.4 การเกิดความเค้นหลักต่ำสุดจะเกิดขึ้นที่กึ่งกลางของรางทั้ง แบบ Simple Support และแบบยึดแน่นตลอด

5.1.3.5 การเกิดความเค้นรวมฟอนมิสเชส เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของรางสำหรับการรองรับแบบ Simple Support แต่สำหรับฐานรองรับแบบยึดแน่นตลอดจะได้ค่าสูงสุดที่บริเวณฐานรองรับด้านล่าง ซึ่งก็เปรียบเหมือนบริเวณหมอนรองรับรางรถไฟนั่นเอง

5.1.4 การคำนวณอายุการใช้งานปรากฏว่าจากการคำนวณสำหรับฐานรองรับแบบยึดแน่นตลอดจะมีอายุการใช้งานต่ำสุดที่ 471.17 ปี โดยใช้วัสดุ JIS S45 C บนหน้าตัด B-B หากเปลี่ยนเป็นฐานแบบ Simple Support โดยใช้วัสดุ JIS S45 C หน้าตัด B-B จะมีอายุใช้งานต่ำสุดที่ 2.96 ปี ดังภาพที่ 4-9 และ ภาพที่ 4-10

5.2 วิจัยผลกระทบทดลอง

จากเป้าหมายหลักในการวิจัยคือการคาดการณ์ความเสียหายของรางรถไฟภายใต้ภาระกระทำซ้ำๆ จากผลการวิเคราะห์ของไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการนำวัสดุโลหะ เกรด JIS S45 C ที่มีคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับวัสดุรางรถไฟเกรด 80 A และเกรด 70A ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศของการรถไฟแห่งประเทศไทย

โดยจากการวิเคราะห์ทั้งการทดสอบวัสดุและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ปรากฏผลโดยรวมอย่างชัดเจนว่าวัสดุเกรด JIS S45 C สามารถนำมาใช้ทดแทนวัสดุเหล็กรางรถไฟทั้ง 3 ชนิด คือ เกรด 70A และ 80A แต่การวิเคราะห์ผลดังกล่าวเป็นเพียงการนำค่าความเค้นรวมฟอนมิสเชสของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาคำนวณหาอายุการใช้งาน ซึ่งตามความเป็นจริงแล้ววิธีการวิเคราะห์ผลกระทบทดลองยังมีอิทธิพลอีกหลายประการที่ต้องทำการวิเคราะห์ประกอบ เช่น ตัวประกอบของผิวงาน , ตัวประกอบของขนาด , ตัวประกอบของความเชื่อมั่น , ตัวประกอบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และตัวประกอบเนื่องจากค่าความเค้นหนาแน่น ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้วัสดุรางรถไฟที่มีหน้าตัดสม่ำเสมอไม่ได้พิจารณาบริเวณรอยเจาะหรือรอยต่อค้ำขึ้นเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น ที่รอยต่อระหว่างรางและศึกษาอิทธิพลดังกล่าวรวมถึงคุณสมบัติทางกลที่เปลี่ยนไปเมื่อขึ้นงานผ่านการขึ้นรูปโลหะควรจะนำมาศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

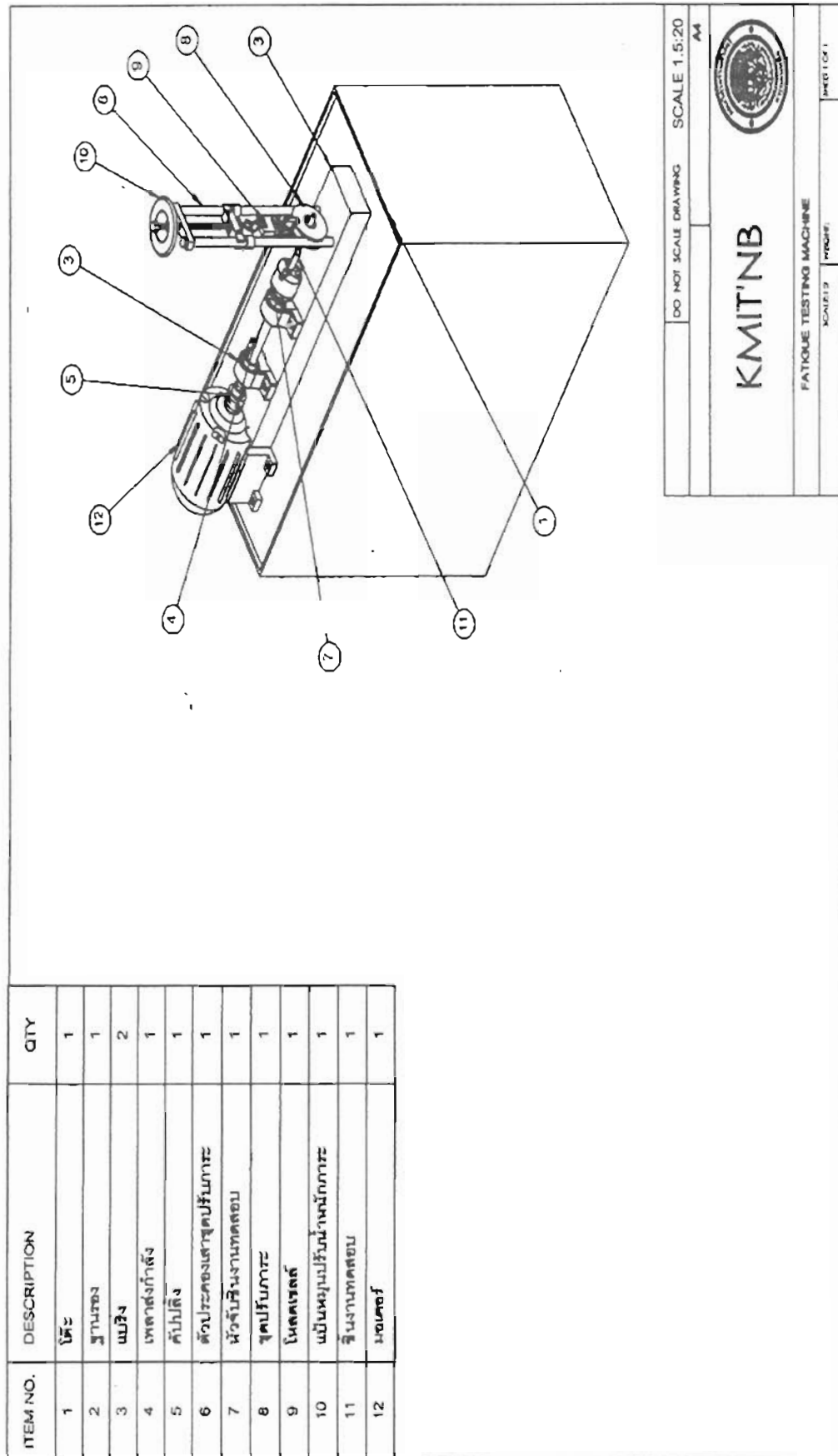
เอกสารอ้างอิง

1. Telliskivi, T. "Wheel and Rail Interaction." Royal Institute of Technology [serial online] 2003 [cited 2007 Aug 17]. Available from : URL : www.diva-portal.org/diva.html
2. Fent, J. "Probabilistic analysis of fatigue life for ITER CS Conduit." Plasma Science and Fusion Center Massachusetts Institute of Technology Cambridge [serial online] 2007 [cited 2007 Aug 17]. Available from : URL : <http://psfcwww2.psfc.mit.edu/library/03rr/03RR007.html>
3. Farfain, S., et al. "High cycle fatigue low cycle fatigue and failure modes of a carburized steel." International Journal of Fatigue. 26 (2004) : 673-678.
4. Genel, K. and Deminkol, M. "Effect of case depth on fatigue performance of AISI 8620 Carburized steel." International Journal of Fatigue. 21(1999) : 207-212.
5. Bomas, H., Mayr, P. and Schleicher, M. "Calculation method for the fatigue limit of parts of case hardened steels." Materials Science and Engineering. A234-236 (1997) : 393-396.
6. Shigley, J. E., Mischke, et al. การออกแบบเครื่องจักรกล. แปลและเรียบเรียงโดย ภาณุฤทธิ์ ยุกตะทัต. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ท็อป, 2547.
7. เดช พุทธเจริญทอง. การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท พิมพ์ดีจำกัด, 1998.
8. สมนึก วัฒนศรีกุล. การทดสอบวัสดุ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท กรีนเวลด์ มีเดีย (ประเทศไทย) จำกัด, 2549.
9. Stick, C.A. "Gas Carburizing" ASM Metals Handbook. Vol.4. 1991 : 312-324.
10. Harris, F. E. "Case Depth An Attempt Practical Definition." Metal Progress. Vol. 44. No2. 1943 : 265-272.
11. ASTM Section 3 "Metals Test Methods and Analytical Procedures." Annual Book of ASTM Standard 1999. American Society for Testing and Materials.
12. สมนึก วัฒนศรีกุล. โลหะวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2538.
13. ASM Handbook Committee. Metals Handbook 8th ed. The American Society for Metals, 1973.

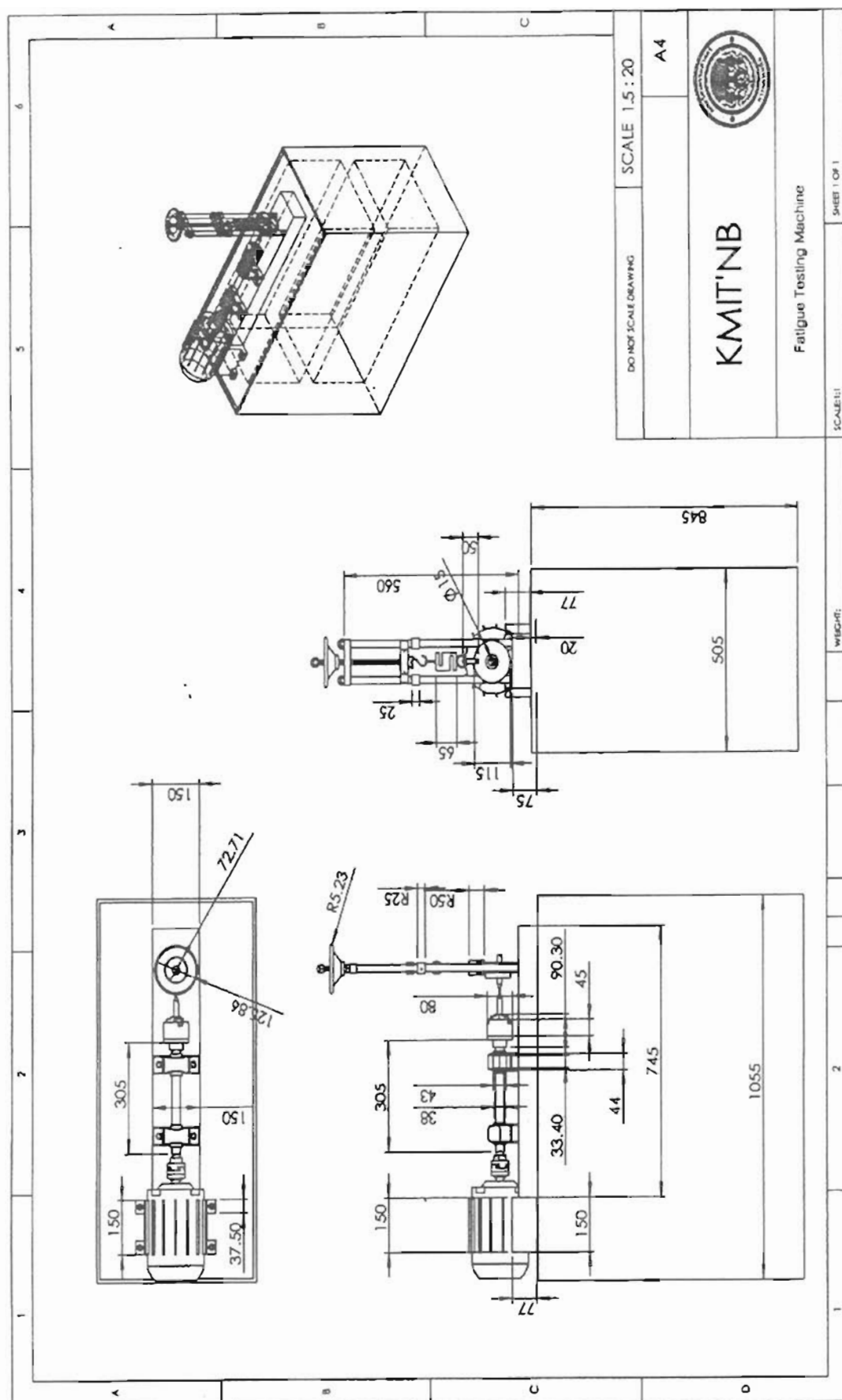
14. Askeland, And Donal R. The Science and Engineering of Materials. Third S.I. Edition. Chappman & Hill, 1987.
15. DIN TASCHENBUCH 19 : Materialprüfnormen für Metallische Werkstoffe 1, DIN 50113
Prüfung Metallischer Werkstoffe Umlaufbiegeversuch.
16. DIN TASCHENBUCH 19 : Materialprüfnormen für Metallische Werkstoffe 1, DIN 50125
Prüfung Metallischer Werkstoffe Zugproben Richtlinien für die Herstellung.

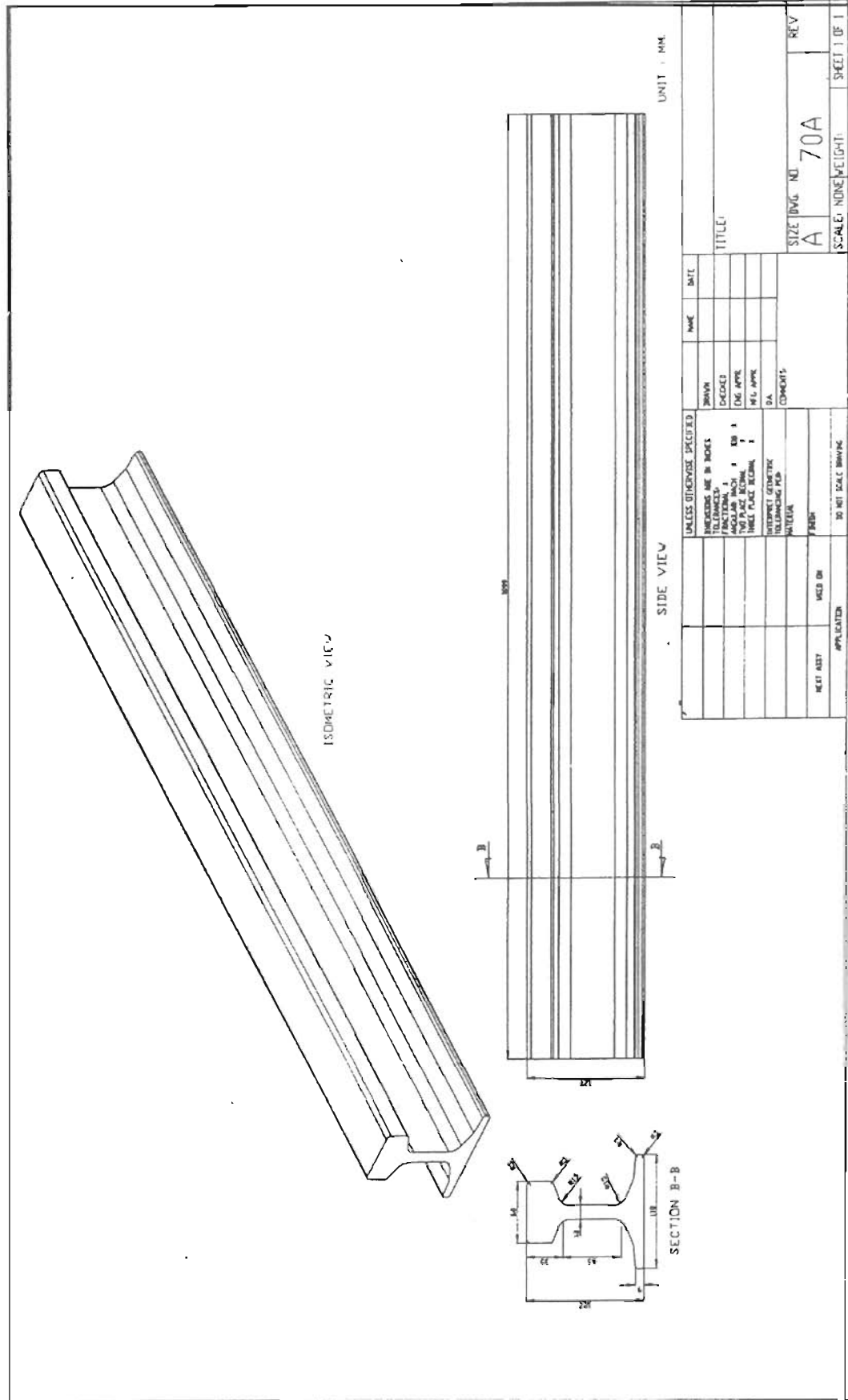
ภาคผนวก ก

เครื่องทดสอบความถี่และหน้าตัดรางรถไฟ

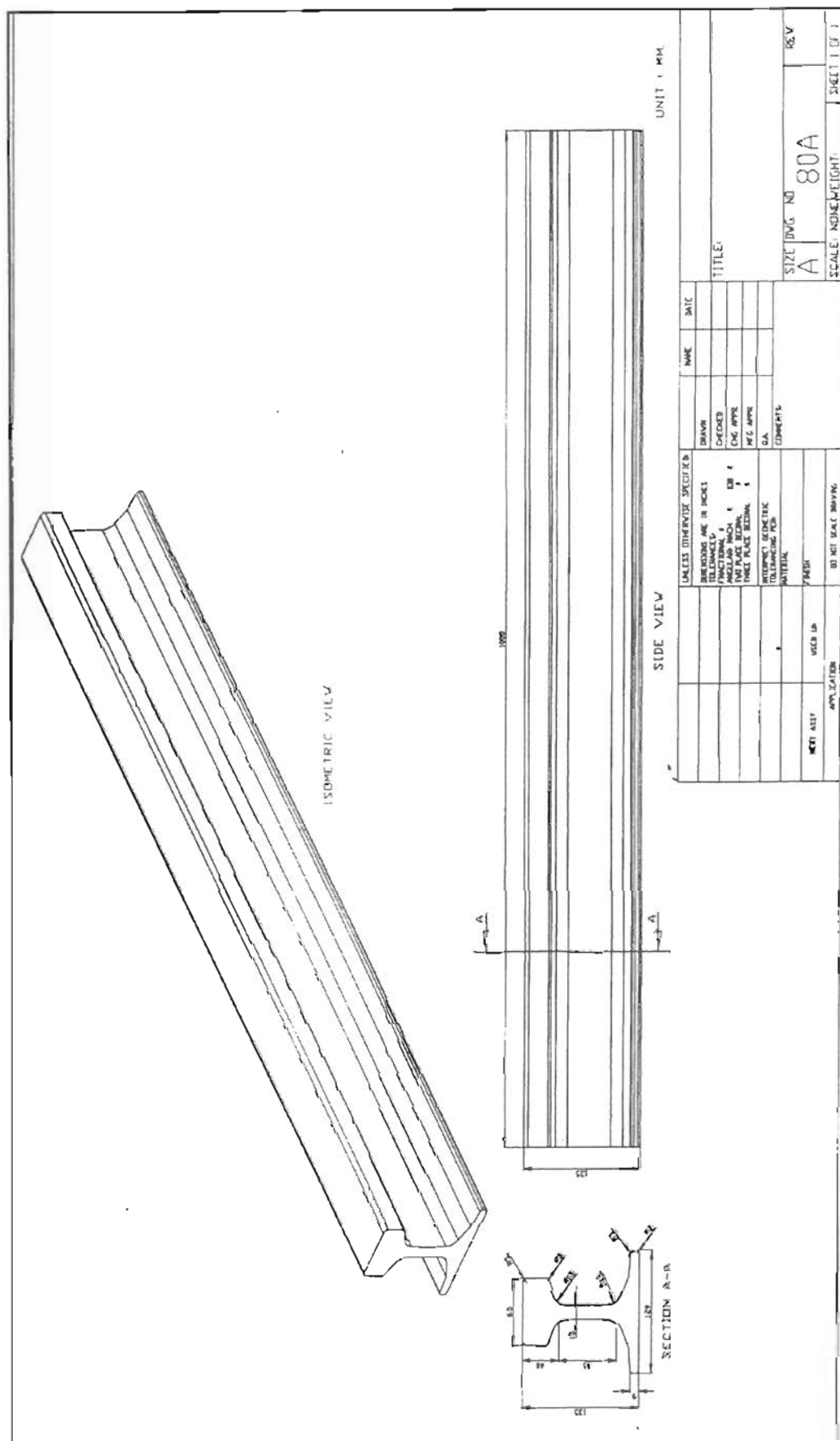


ภาพที่ ก-1 แสดงส่วนประกอบเครื่องทดสอบความล้า

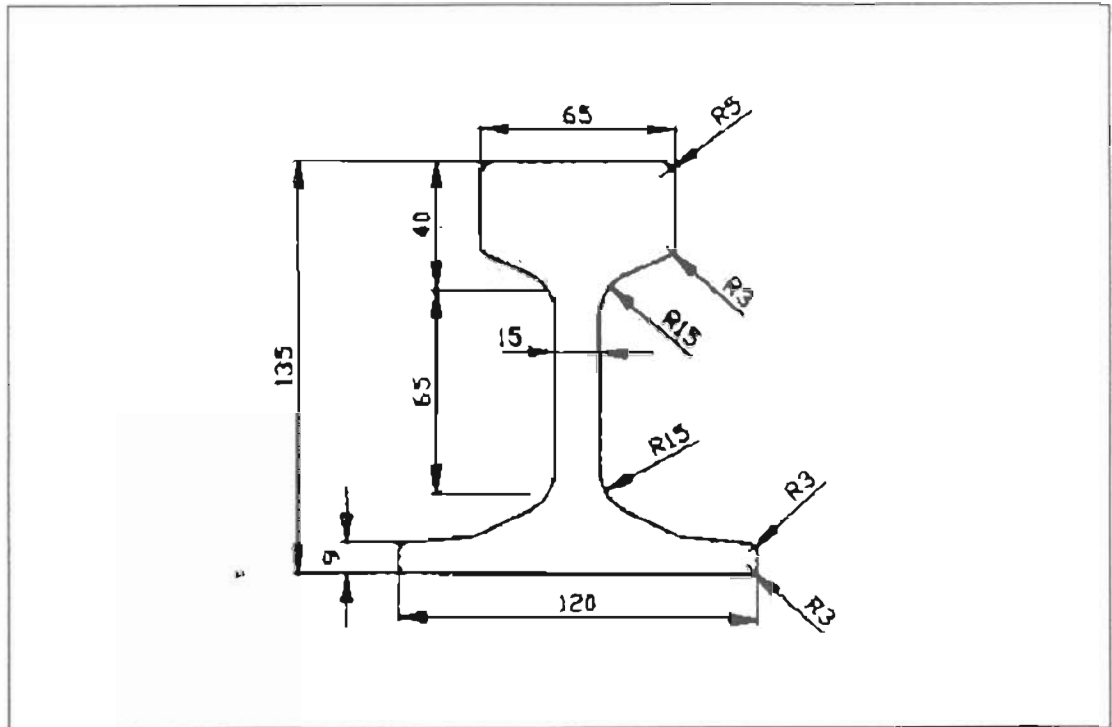




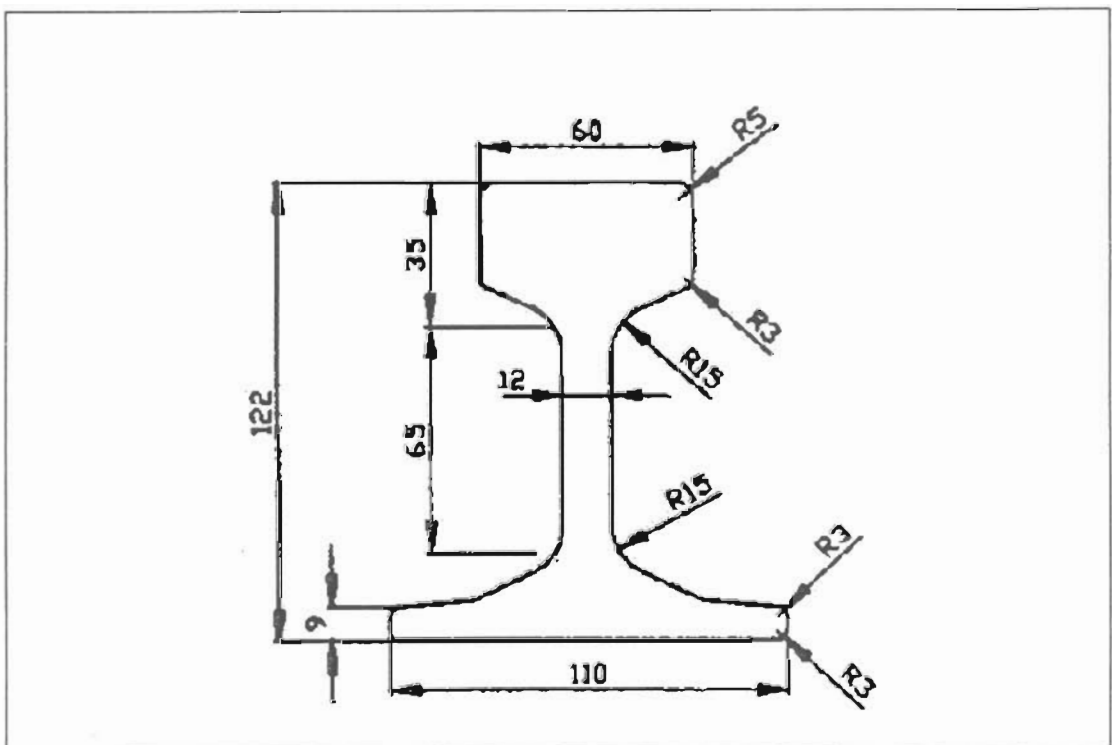
ภาพที่ ก-3 แสดงภาพประกอบหน้าตัดรางรถไฟ 70A



ภาพที่ ก-4 แสดงภาพประกอบหน้าตัดรางรถไฟขนาด 80A



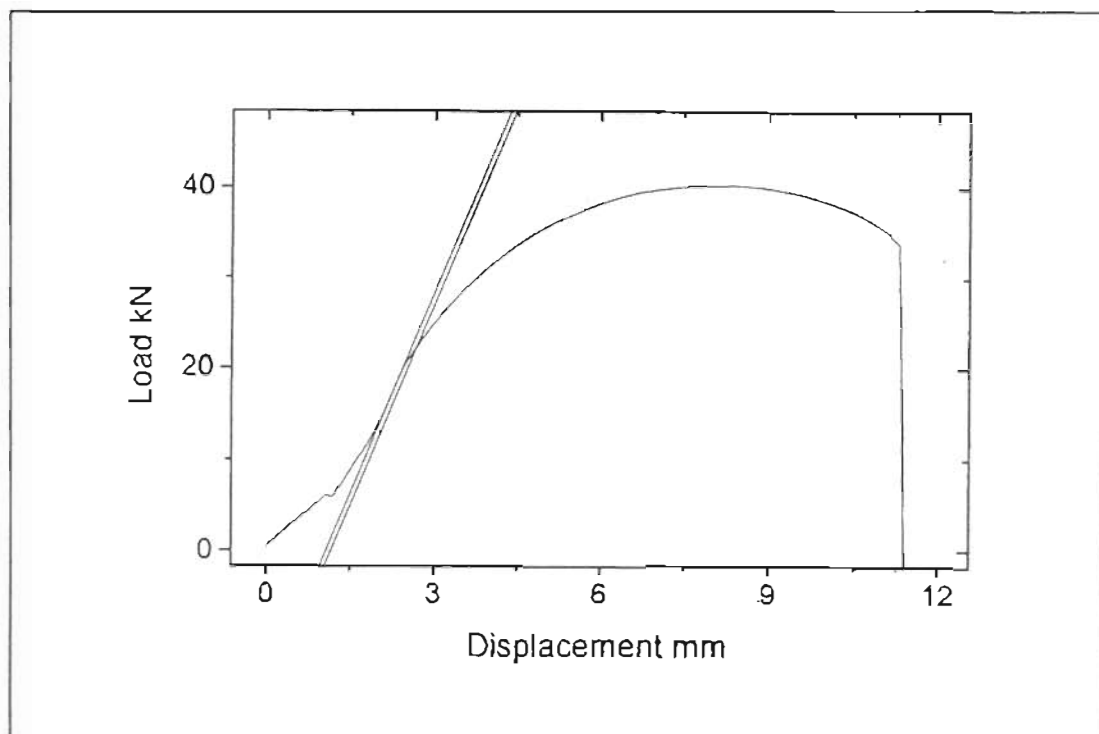
ภาพที่ ก-5 แสดงภาพฉายด้านหน้าของรางรถไฟหน้าตัด A-A



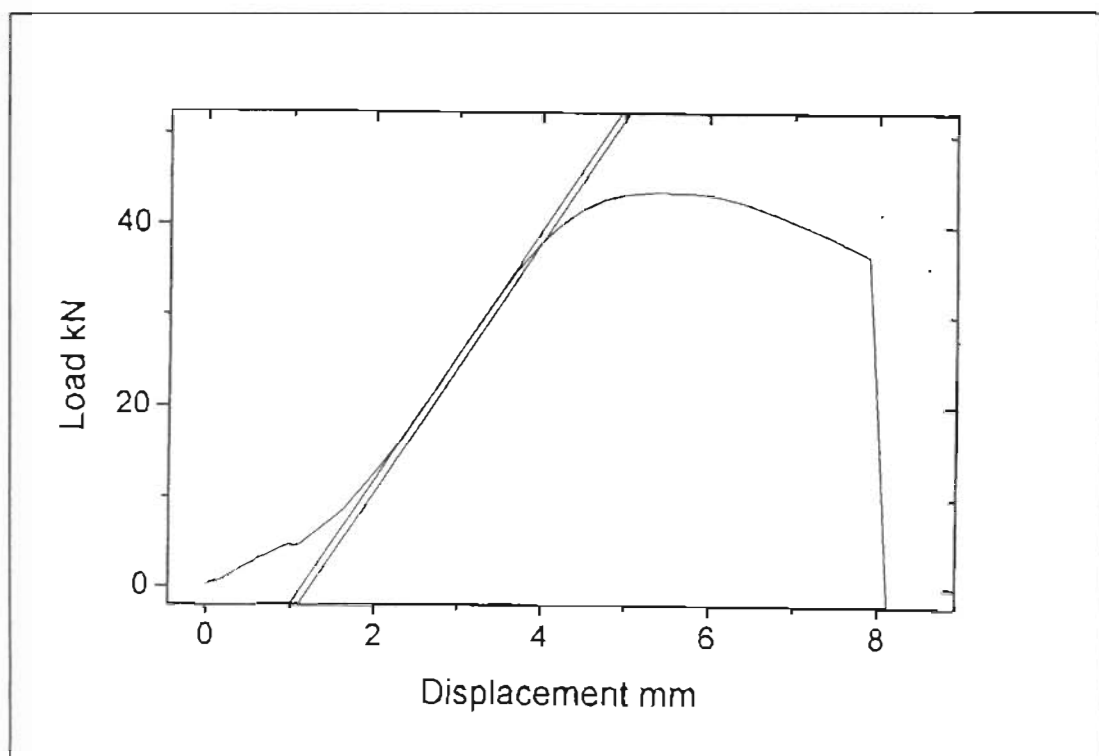
ภาพที่ ก-6 แสดงภาพฉายด้านหน้าของรางรถไฟหน้าตัด B-B

ภาคผนวก ข

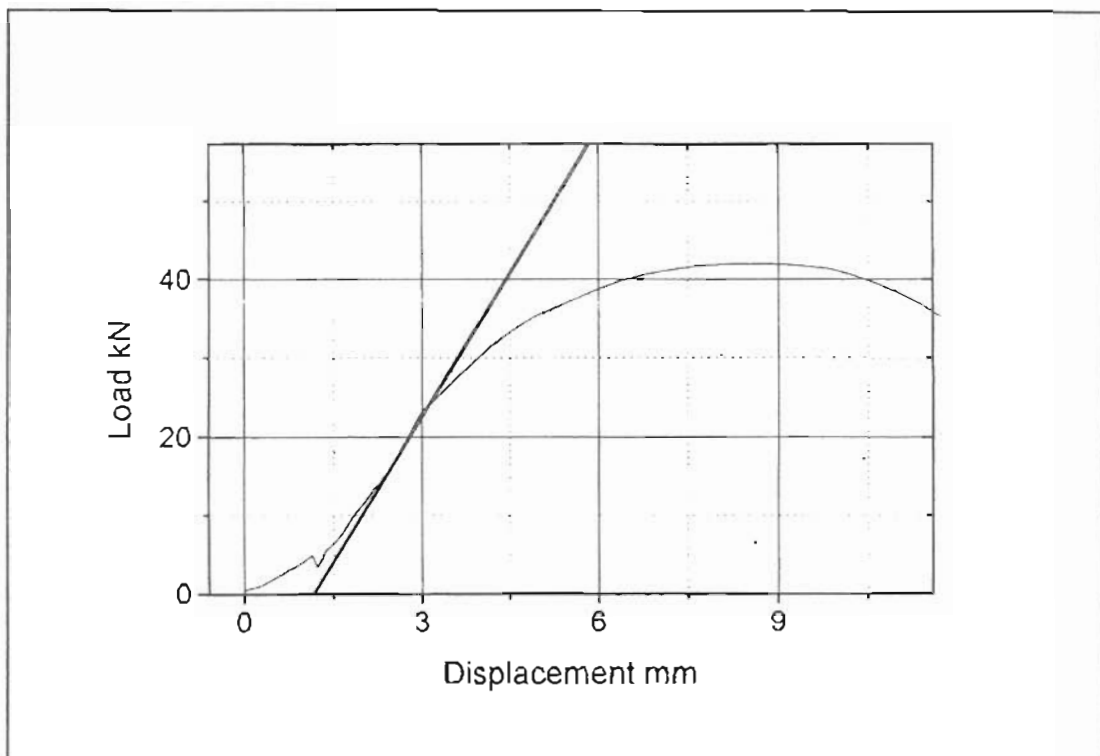
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง และระยะยืด



ภาพที่ ข-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง และระยะยืดของวัสดุเกรดไฟ 80A



ภาพที่ ข-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง และระยะยืดของวัสดุเกรดไฟ AISI 45C



ภาพที่ ข-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง และระยะยืดของวัสดุรางรถไฟ 70A

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายอศวิน ขอดרך

ชื่อวิทยานิพนธ์ : การคาดการณ์ความเสียหายของรางรถไฟ ภายใต้ภาระกระทำซ้ำ ๆ จากผลการวิเคราะห์ของไฟไนต์เอลิเมนต์

สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ประวัติ

ประวัติส่วนตัว

เกิดวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2513 ที่อำเภอเมือง จังหวัดลำพูน เป็นบุตรคนที่สามของ นายพิน ขอดרך และนางทัศนัสวิง ขอดרך

ประวัติการศึกษา

สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างยนต์ ที่วิทยาลัยเทคนิคภูเก็ตในปีการศึกษา 2532 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างยนต์ที่วิทยาลัยเทคนิคภูเก็ตปีการศึกษา 2534 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาเทคโนโลยีขนถ่ายวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปี 2539