

การคาดการณ์ความเสียหายของรางรถไฟภายใต้แรงกระทำซ้ำรอบ  
จากผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

Failure Prediction of Rail-way Under Cyclic Loading  
from Result of Finite Element Analysis

วันทนา เกิดนิยม<sup>1</sup>

ภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์

โทรศัพท์/โทรสาร 02 9132500 ต่อ 4405 / 02 5878253

E-mail Address : nu\_ying19@yahoo.com

อัศวิน ยอดรักษ์<sup>2</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

โทรศัพท์/โทรสาร 02 9132500 ต่อ 8632 / 02 5874336

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ<sup>1,2</sup>

1518 ถนนพิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

E-mail Address : aswin.yod@gmail.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาปัญหาการคาดการณ์ความเสียหายที่วัสดุรางรถไฟรับแรงกระทำซ้ำ โดยใช้กรณีศึกษาการรับน้ำหนักของรางรถไฟในประเทศไทย ในการดำเนินงานวิจัยใช้วัสดุทำรางรถไฟคือเหล็กกล้า 70A , เหล็กกล้า 80A และวัสดุโลหะที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไปคือ เหล็กกล้า JIS S45C ซึ่งเป็นเหล็กกล้าที่มีคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับเหล็กกล้า 70A , เหล็กกล้า 80A และน่าจะสามารถนำมาทดแทนวัสดุเก่าได้ โดยได้ทำการตรวจสอบความแข็ง ตรวจสอบโดยสร้างจุลภาค ตรวจสอบหาชั้นแข็งลึก และตรวจสอบความล้าแบบหมุนดัด (Rotating Bending) จากนั้นทำการจำลองการรับแรงของรางรถไฟด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาความเค้นสูงสุด – ต่ำสุด แล้วทำการออกแบบ

รางรถไฟโดยใช้เหล็กกล้า JIS S45C ให้สามารถรับน้ำหนักให้ได้ใกล้เคียงกับเหล็กกล้า 80A และเหล็กกล้า 70A ผลการทดลองพบว่า คุณสมบัติของวัสดุเหล็กกล้า JIS S45C มีสมบัติทางกลต่ำกว่าเหล็กรางรถไฟ 70A และ 80A แต่สามารถรับน้ำหนักได้ใกล้เคียงกับเหล็กกล้ารางรถไฟ 70A และ 80A และมีอายุการล้าใกล้เคียงกัน

**คำสำคัญ** : การคาดการณ์ความเสียหาย, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, แรงกระทำซ้ำรอบ, การทดสอบความล้าในวัสดุ

### Abstract

This research is to study 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 qualities 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.

**Keywords:** Failure Prediction, Finite Element Analysis, Cyclic Loading, Fatigue Testing.

## 1. บทนำ

ปัญหาในทางวิศวกรรมจำนวนมากไม่น้อยที่วิศวกรจะต้องเข้าไปทำการศึกษาร่วมทั้งหาทางแก้ไขมีสาเหตุของปัญหาเกิดขึ้นเนื่องมาจากการแปรเปลี่ยนภาระแรงกระทำซ้ำๆ ที่เรียกว่าการแตกหักเนื่องจากความล้า (Fatigue) การศึกษาเรื่องความล้าจึงมีความสำคัญมากในการทำนายอายุความล้าของชิ้นส่วนโครงสร้างต่างๆนั้น สิ่งหนึ่งที่มีผลต่อความ

แม่นยำในการทำนายก็คือความเหมาะสมในการจำลองสภาวะของภาระในสภาพการใช้งานจริงมายังสภาวะของภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ แต่เนื่องจากการระบุลักษณะของภาระแบบแอมพลิจูดคงที่นั้นจำเป็นต้องกำหนดตัวแปรแอมพลิจูดภาระทำให้เกิดปัญหาว่าจะต้องกำหนดภาระกับชิ้นงานเท่าใดจึงจะให้ผลลัพธ์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ใกล้เคียงที่สุด เพราะส่วนใหญ่แล้วเราไม่สามารถจะทำการทดสอบที่ภาระเท่ากับของจริงได้ ซึ่งการที่เราสามารถทำการประเมินอายุของชิ้นส่วนอันจะเป็นประโยชน์ในด้านการบำรุงรักษาและด้านการผลิต เพราะสามารถวางแผนการทำงานล่วงหน้าได้ เช่นการบำรุงรักษาประจำปี และการวางแผนการผลิต เป็นต้น

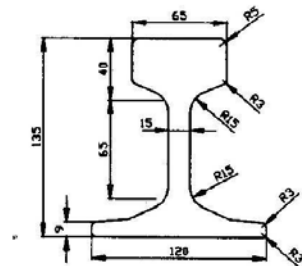
บทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ได้แก่ การศึกษาเกี่ยวกับการเกิดความเสียหาย และการเกิดรอยแตกร้าวที่ผิวสัมผัสระหว่าง ล้อกับรางรถไฟ โดยใช้การทดลองร่วมกับการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลปรากฏว่า ความเค้นตกค้างระหว่างล้อและเพลลาในตำแหน่งที่ผิวสัมผัสมากที่สุดจะก่อให้เกิดความเค้นตกค้างมากที่สุด [1,2] การวิจัยเกี่ยวกับรูปแบบการเสียหายของเหล็กกล้า AISI 8620 ในช่วงของการล้าตัวที่ช่วงความถี่สูง (High Cycle Fatigue) ลักษณะของผิวรอยหักของชิ้นทดสอบแสดงให้เห็นกลไกการแตกหักสองรูปแบบร่วมกัน คือการแตกหักแบบเปราะที่บริเวณผิวแข็งและการแตกหักแบบเหนียวที่เนื้อในของชิ้นทดสอบ จากการทดลองได้นำเอาผลไปใช้ปรับปรุงตัวแบบ Fatigue Crack Initiation Model Parameters (Coffin-Manson) เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนส่งกำลัง เช่น เพลลา และเฟือง [3] การทดลองหาผลกระทบของความล้าชิ้นผิวแข็งที่มีต่อการ

รับภาระแบบล้าตัวของเหล็กกล้า AISI 8620 โดยทำการทดลองการล้าของชิ้นทดสอบ ที่มีความลึกผิวแข็งต่างกัน ด้วยเครื่องทดสอบแบบ Rotary Bending Fatigue ผลการทดลองสรุปได้ว่า เมื่อความลึกชั้นผิวแข็งมากขึ้น ค่าความต้านทานการล้าตัวจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย [4]

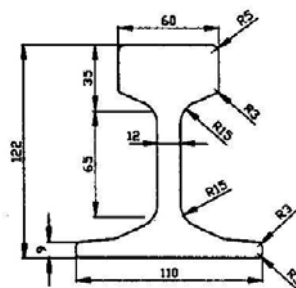
ในงานวิจัยนี้ได้อ้างถึงวิธีการของ T. Telliskivi และ J. Feng [1,2] เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดสถานะพื้นฐานเบื้องต้นในการรับภาระของรางรถไฟเป็นแบบผิวสัมผัสระหว่างล้อรถไฟและรางรถไฟ (Contact Body Analysis) โดยกำหนดให้ล้อรถไฟเป็นวัสดุแบบที่ไม่มีการเปลี่ยนรูปทรง (Rigid Body) แล้วทำการจำลองการรับน้ำหนักของรางรถไฟเพื่อหาความเค้นพอนมิสเสสสูงสุด (Von-Mises Stress) ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้มีการจำลองเหตุการณ์ของปัญหาที่เกิดขึ้นจากการแปรเปลี่ยนภาระกระทำซ้ำของรางรถไฟโดยมีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์และทำนายอายุการล้าตัวของรางรถไฟโดยการจำลองเหตุการณ์ การเลือกใช้วัสดุ 3 ชนิดคือ วัสดุรางรถไฟชนิดเหล็กกล้า 70A, วัสดุรางรถไฟชนิดเหล็กกล้า 80A และวัสดุที่สามารถซื้อขายได้ในประเทศไทยคือเหล็กกล้า JIS S45C และเลือกใช้หน้าตัดรางรถไฟ 2 แบบคือ หน้าตัดแบบ A-A และหน้าตัดแบบ B-B เป็นหน้าตัดหลักในการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ เพื่อทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุโลหะ 3 ชนิด นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการล้าตัวของวัสดุโลหะ อันเนื่องมาจากการรับน้ำหนักกระทำซ้ำๆ ด้วยเครื่องทดสอบความล้าชนิดรับโมเมนต์ดัดและศึกษาเปรียบเทียบการล้าตัวของวัสดุด้วยระเบียบวิธี

ไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมถึงเพื่อวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของวัสดุรางรถไฟของวัสดุทั้ง 3 ชนิด แล้วเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 1 ภาพฉายด้านหน้าของรางรถไฟหน้าตัด A-A ที่มา การรถไฟแห่งประเทศไทย



รูปที่ 2 แสดงภาพฉายด้านหน้าของรางรถไฟหน้าตัด B-B ที่มา การรถไฟแห่งประเทศไทย

## 2. วิธีการ

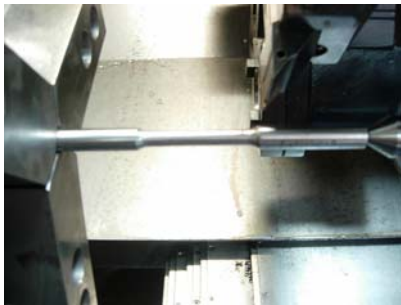
ในงานวิจัยนี้ได้ ต้องการศึกษาค่าผลกระทบความต้านทานความล้าของเหล็กกล้ารางรถไฟชนิด 70A และ 80A เปรียบเทียบกับเหล็กที่จำหน่ายในประเทศไทย ที่มีคุณสมบัติวัสดุใกล้เคียงกันกับเหล็กรางรถไฟคือเหล็กกล้าเกรด JIS S45C ดังนั้น ในการดำเนินงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรก เป็นการทดสอบค่าคุณสมบัติทางกลวัสดุ และส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาความเค้นสำหรับนำไปคำนวณหาอายุการใช้งานของเหล็กรางรถไฟทั้ง 3 ชนิด

## 2.1 การทดสอบค่าสมบัติทางกลวัสดุของวัสดุ

ชิ้นงานที่นำมาทดสอบตามมาตรฐาน DIN 50125 โดยการทดสอบความล้านี้ กำหนดให้ความเร็วรอบคงที่ 2500 รอบต่อนาที และหาภาระที่กระทำ โดยหาได้จากการนำเอาชิ้นงานมาทดสอบแรงดึง เพื่อหาค่า Yield Strength เพื่อใช้ในการคำนวณหาหน้าตัดภาระสูงสุด แล้วปรับเปลี่ยนภาระที่กระทำที่ปลายคานาดังในรูปที่ 3 เพื่อไปหา S-N Curve



รูปที่ 3 เครื่องทดสอบความล้าแบบโมเมนต์ดัดคงที่ (Constant Bending Moment)



รูปที่ 4 ชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน DIN 50125

## 2.2 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

### 2.2.1 การตั้งสมมุติฐานการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

การตั้งสมมุติฐานการวิเคราะห์ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์

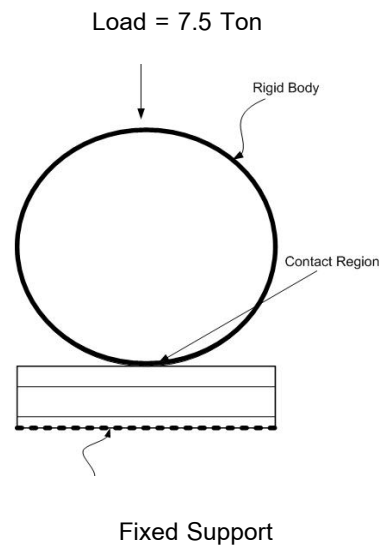
เพื่อความสะดวกต้องมีการกำหนดคุณสมบัติต่าง ๆ ของการวิเคราะห์ที่สามารถแบ่งเป็นหัวข้อได้ดังนี้

#### 2.2.1.1 การสมมุติฐานของล้อรถไฟ

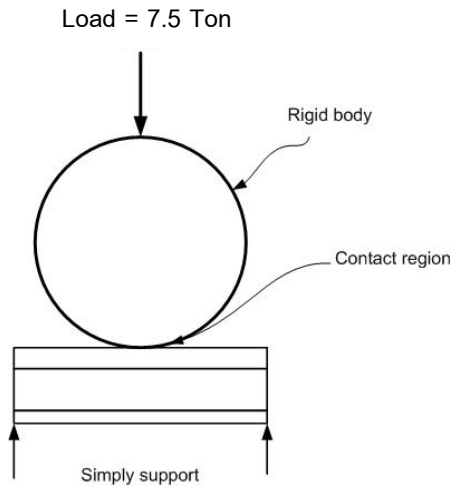
เนื่องจากงานวิจัยนี้เน้นการศึกษาไปที่รางรถไฟ ดังนั้นจึงได้ตั้งสมมุติฐานให้ล้อรถไฟมีคุณสมบัติของวัสดุเป็นแบบวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) คือวัตถุไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างเมื่อถูกแรงกระทำ

#### 2.2.1.2 การตั้งสมมุติฐานของรางรถไฟ

เนื่องจากงานวิจัยนี้เน้นการศึกษาการรับภาระของรางรถไฟ ดังนั้นจึงได้ตั้งสมมุติฐาน 2 ภาวะคือ ภาวะแรกให้รางรถไฟมีการรองรับแบบยึดแน่นตลอดหน้าตัด (Fixed Support) และภาวะที่สองให้รางรถไฟมีการรองรับอย่างง่าย (Simple Support) แต่สามารถขยายตัวได้เมื่อรับภาระตามยาวของรางรถไฟ ดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ



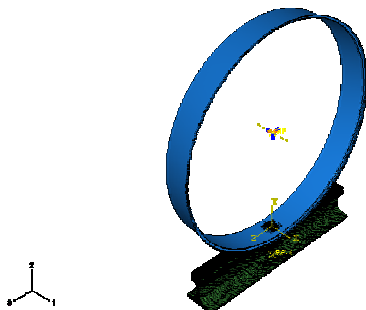
รูปที่ 5 รางรถไฟมีการรองรับแบบยึดแน่นตลอดหน้าตัด (Fixed Support)



รูปที่ 6 รางรถไฟมีการรองรับอย่างง่าย (Simple Support)

### 2.2.1.3 การตั้งสมมุติฐานของผิวสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ

กำหนดให้ล้อและรางรถไฟมีการผิวสัมผัสกันตลอดการรับภาระ (Contact Region) ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แบบจำลองการรับภาระของรางรถไฟแบบผิวสัมผัส (Contact Region)

### 2.2.1.4 การตั้งสมมุติฐานของการรับภาระ (Loading)

เนื่องจากต้องการวิเคราะห์หาค่าความเค้นพอนมิสเซส ดังนั้นจึงกำหนดให้การรับภาระของรางสูงสุดที่ 7.5 ตันต่อ 1 ล้อ และต่ำสุดที่ 0 ตัน ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดโดยการรถไฟแห่งประเทศไทย

### 2.2.1.5 มีการกำหนดค่าสมบัติของวัสดุทำรางรถไฟ

จากการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน DIN 50125 เพื่อกำหนดลงในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติของวัสดุทำรางรถไฟ

วัสดุรางรถไฟ	ค่ายังส์โมดูลัส ( $E$ ), GPa	ค่าอัตราส่วนปัวซอง ( $\nu$ )
เกรด 70 A	210	0.3
เกรด 80 A	219	0.3
JIS S45C	205	0.3

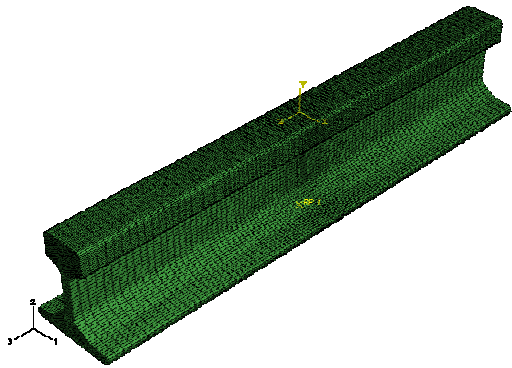
### 2.2.2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองและการแบ่งเอลิเมนต์

แบบจำลองของรางรถไฟและล้อดังรูปที่ 7 การออกแบบขึ้นจากสภาวะการรับภาระจริง โดยมีการกำหนดขอบเขตของรางให้รับภาระจากล้อรถไฟเป็นแบบผิวสัมผัส (Contact Region) มีการยึดฐานรางรถไฟ 2 สภาวะคือ

2.2.2.1 สภาวะที่รางรถไฟมีการรองรับแบบยึดแน่นตลอดหน้าตัด ดังรูปที่ 5 กำหนดให้การรับภาระของรางสูงสุดที่ 7.5 ตันต่อ 1 ล้อ และต่ำสุดที่ 0 มีการกำหนดขอบเขตให้รางเคลื่อนตัวได้ในแนวแกน 2 ส่วน ในแนวแกน 1 และแนวแกน 3 จะถูกควบคุมทิศทาง แสดงในรูปที่ 8

2.2.2.2 สภาวะที่รางรถไฟมีการรองรับอย่างง่าย ดังรูปที่ 6 กำหนดให้การรับภาระของรางสูงสุดที่ 7.5 ตันต่อ 1 ล้อ และต่ำสุดที่ 0 มีการกำหนดขอบเขตให้

รางเคลื่อนตัวได้ในแนวแกน 2 และ 3 ส่วนในแนวแกน 1 จะถูกควบคุมทิศทาง



รูปที่ 8 การแบ่งเอลิเมนต์แบบรูปทรงสี่เหลี่ยมสี่จุดต่อ

### 2.3 การวิเคราะห์การรับภาระแบบพลวัต

ในการออกแบบที่จะไม่ทำให้เกิดความเสียหายนั้น โดยปกติแล้วความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชิ้นส่วนจะไม่เกินค่าความแข็งแรงของวัสดุ ถ้าเป็นวัสดุประเภทเหนียวเราจะสนใจค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคดาก (Yield Strength) เพราะที่ค่านี้โลหะจะเริ่มต้นเปลี่ยนรูปอย่างถาวรอันจะทำให้ชิ้นส่วนเกิดการเสียหายแต่สำหรับการออกแบบวัสดุเนื่องจากการล้าที่อยู่ในกรณีของความเค้นเฉลี่ยไม่เท่ากับศูนย์ของวัสดุเหนียวซึ่งสามารถนำทฤษฎีความเสียหายของกู๊ดแมน (Goodman) มาวิเคราะห์ความล้าเนื่องจากเป็นสมการที่นิยมใช้กันแพร่หลายดังนี้

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

โดยที่

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

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (3)$$

เมื่อ

- $\sigma_a$  = ความเค้นอัมพลิจูด
- $\sigma_m$  = ความเค้นเฉลี่ย
- $S_f$  = ความต้านทานการล้าตัว
- $S_{ut}$  = ความต้านทานการล้าตัวสูงสุด
- $\sigma_u$  = ความเค้นแรงดึงสูงสุด
- $\sigma_{\max}$  = ความเค้นสูงสุด
- $\sigma_{\min}$  = ความเค้นต่ำสุด

จากสมการ (1) จะสามารถหาค่าขีดจำกัดการทนทานได้คือ

$$S_f = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_a}{S_{ut}}} \quad (4)$$

จากการทดสอบการล้าของวัสดุโลหะที่มีรอบอายุการใช้งานต่ำกว่า  $10^6$  รอบ สามารถประเมินอายุการใช้งานได้จาก สมการทั่วไปของความล้าคือ

$$S_f = a.N_f^b \quad (5)$$

$$N_f = \left( \frac{S_f}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (6)$$

เมื่อ

- a,b = ค่าคงที่เนื่องจากการล้า
- $S_f$  = ความต้านทานการล้า
- $N_f$  = จำนวนรอบการล้า

### 3. ผลการศึกษา

#### 3.1 ผลการทดสอบวัดค่า Yield Strength และค่า Tensile

##### Strength ของโลหะ

ผลการทดสอบวัดค่า Yield Strength และค่า Tensile Strength ของโลหะทั้ง 3 ชนิดมีดังนี้

ตารางที่ 2 ค่า Yield Strength และค่า Tensile Strength ของโลหะทั้ง 3 ชนิดที่ได้จากการทดสอบ

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

จากผลการทดสอบค่าความเค้นที่จุดคราก (Yield Strength) และค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength) ของโลหะทั้ง 3 ชนิดโดยการทดสอบแรงดึงวัสดุทำรางรถไฟ 3 ชนิด ๗ ละ 3 ตัวอย่าง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยปรากฏว่าสำหรับค่า

ความเค้นที่จุดครากและค่าความเค้นเนื่องจากแรงดึงสูงสุดได้ผลออกมาคล้ายกันกล่าวคือ วัสดุวางรถไฟเกรด 80A มีค่ามากที่สุดรองลงมาเป็นวัสดุ เกรด 70A และต่ำสุดเป็น JIS S45C ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) ปรากฏว่าวัสดุวางรถไฟเกรด 70A ให้ค่ามากที่สุดรองลงมาเป็นวัสดุเกรด JIS S45C และน้อยสุดเป็นวัสดุ เกรด 80A ตามลำดับ

#### 3.2 ผลการทดลองวัดชั้นแข็งลึก

การวัดค่าความแข็งในระบบไมโครวิคเกอร์ ผลการทดสอบการวัดชั้นแข็งลึกของวัสดุวางรถไฟทั้ง 3 ชนิด มีค่าดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดลองวัดชั้นแข็งลึก

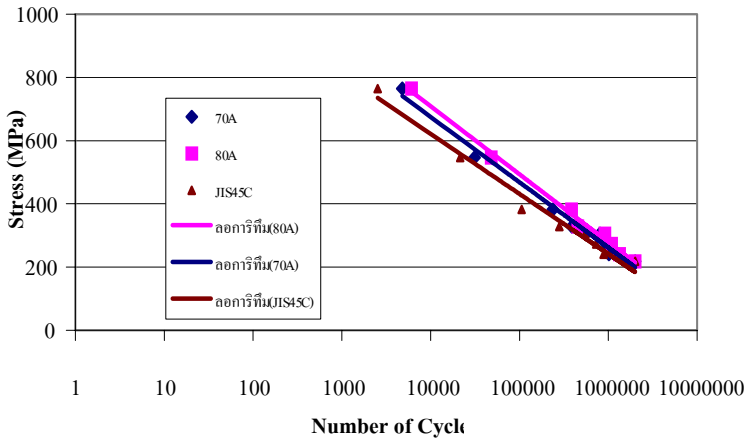
วัสดุ	ผลการทดสอบวัดชั้นแข็งลึก (Hv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 1	ค่าเฉลี่ย
เกรด 70 A	15.7	15.8	15.5	15.7
เกรด 80 A	21.0	21.2	21.0	21.1
เหล็กกล้า JIS S45C	20.7	21.6	20.5	20.9

จากผลการทดสอบวัดชั้นแข็งลึกของวัสดุทำรางรถไฟทั้ง 3 เกรด ได้ผลออกมาใกล้เคียงกัน โดยที่วัสดุทำรางรถไฟเกรด 80A ได้ค่ามากที่สุดรองลงมาเป็นเหล็กกล้า เกรด JIS S45C และน้อยที่สุดเป็นวัสดุ เกรด 70A ตามลำดับ

#### 3.3 ผลการทดลองวัดความล้า

จากผลการทดลองความล้าของวัสดุวางรถไฟด้วยเครื่องทดสอบความล้าแบบไมเมนต์ดัดโดยการปรับเปลี่ยนน้ำหนักจนกระทั่งเกิดความเสียหายของ

วัสดุทำให้สามารถทราบแนวโน้มความเสียหาย จากผลการทดสอบความล้า สำหรับวัสดุทั้ง 3 เกรด และผลจากการทดสอบกราฟ S-N ของวัสดุทั้ง 3 เกรด สามารถนำมารวม เพื่อเปรียบเทียบดูแนวโน้มของกราฟ เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ผลของความล้าได้ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบ S-N Curve ของวัสดุรางรถไฟทั้ง 3 เกรด

เพื่อให้สอดคล้องกับสมการความสัมพันธ์ของความล้าของวัสดุทั้ง 3 ชนิดจึงได้นำมาแสดงรวมกันในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงสมการความสัมพันธ์ของความล้ารางรถไฟ

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

### 3.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ผลจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการจำลองสภาวะการรับน้ำหนักบรรทุกขนาด 7.5

ตัน/ล้อ ส่วนการรองรับรางรถไฟออกเป็น 2 แบบคือแบบฐานยึดแน่นตลอด (Fixed Support) และแบบฐานรองรับอย่างง่าย (Simple Support) แล้วปรับเปลี่ยนคุณสมบัติวัสดุรางรถไฟเพื่อดูผลการวิเคราะห์ ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 5 และตารางที่ 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการรองรับแบบยึดแน่นตลอด (Fixed Support)

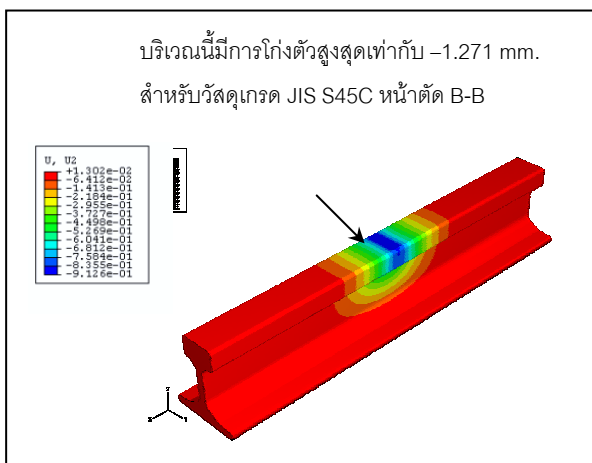
ผลการวิเคราะห์	วัสดุเกรด	วัสดุเกรด	วัสดุเกรด	
	80 A	70A	JIS S45C	
	หน้าตัด	หน้าตัด	หน้าตัด	หน้าตัด
	A - A	B - B	A - A	B - B
การโก่งของราง, mm	-6.047	-12.710	-12.70	-17.78
ความเค้นรวม, MPa	310.60	333.70	310.60	333.70
ความเค้นหลักสูงสุด, MPa	103.30	110.40	103.30	110.40
ความเค้นหลักต่ำสุด, MPa	-214.70	-229.80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



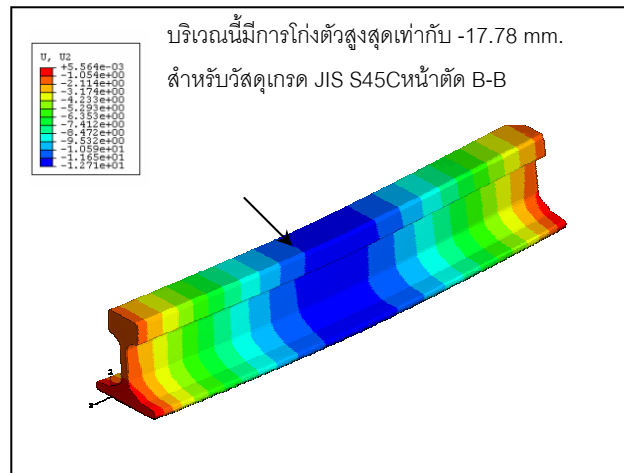
ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการรองรับอย่างง่าย (Simple Support)

ผลการวิเคราะห์	วัสดุเกรด	วัสดุเกรด	วัสดุเกรด	
	80 A	70A	JIS S45C	
	หน้าตัด	หน้าตัด	หน้าตัด	หน้าตัด
	A - A	B - B	A - A	B - B
การโก่งของราง , mm	-0.525	-0.913	-1.000	-1.271
ความเค้นรวม , MPa	125.60	164.7	126.00	150.30
ความเค้นหลัก สูงสุด ,MPa	51.82	41.65	51.96	41.32
ความเค้นหลัก ต่ำสุด ,MPa	-125.40	-159.10	-125.80	-150.10
ความเครียด หลักสูงสุด	0.00654	0.01355	0.01378	0.01737
ความเครียด หลักต่ำสุด	-0.01362	-0.02622	-0.02867	-0.03392

จากรูปที่ 10 และรูปที่ 11 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าการโก่งของรางรถไฟจากการจำลองสถานะการรองรับของรางรถไฟเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 7.5 ตัน



รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์การโก่งของรางรถไฟที่ฐานถูกยึดแน่นตลอด (Fixed Support)



รูปที่ 11 ผลการวิเคราะห์การโก่งของรางรถไฟที่มีฐานรองรับอย่างง่าย (Simple Support)

### 3.5 การคำนวณอายุการล้าตัว

การคำนวณอายุการล้าตัวของวัสดุรางรถไฟสามารถทำได้โดยการนำผลค่าความเค้นรวมจากการวิเคราะห์แบบสถิตย์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ภายใต้ขอบเขตสภาวะของฐานรองรับ 2 แบบคือ แบบยึดแน่นตลอดฐาน (Fixed Support) และแบบรองรับอย่างง่าย (Simple Support) ส่วนการรับภาระจะเป็นภาระแบบผิวสัมผัสขนาด 7.5 ตัน/ล้อ แล้วนำค่ามาหาจำนวนรอบที่ทำให้ความเสียหายโดยใช้สมการกูดแมน จากนั้นเปลี่ยนจำนวนรอบความเสียหายให้เป็นจำนวนปีโดยการคำนวณจากจำนวนเที่ยวของการเดินรถ ซึ่งใช้กรณีการเดินรถของสถานีรถไฟพิษณุโลกเป็นกรณีศึกษาตัวอย่างการการคำนวณอายุการล้าตัว ดังตารางที่ 7 แสดงผลความเค้นรวมของวัสดุรางรถไฟเกรด 80A บนรางรถไฟที่มีการรองรับอย่างง่ายบนหน้าตัด A-A สามารถคำนวณหาค่า  $S_f$  ได้โดยใช้สมการความสัมพันธ์ของสมการ Goodman ดังนี้

เมื่อ  $\sigma_{\max} = \sigma_{\text{von}} = 310.6 \text{ MPa}$   
 และ  $\sigma_{\min} = 0$

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

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

จากสมการที่ (1) จะสามารถหาค่าขีดจำกัดการทนทานได้คือ

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

ค่า  $S_{ut}$  ดูได้จากตารางที่ 7

**ตารางที่ 7** ผลการวิเคราะห์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคำนวณหาค่าอายุการใช้งาน สำหรับการรองรับแบบยึดแน่นตลอด

ชนิดวัสดุ	หน้าตัด	Tensile Strength (MPa)	ความต้านทานการล้า, $S_f$ (MPa)	จำนวนรอบการล้า $N_f$ ล้านรอบ	อายุการใช้งานปี
70 A	B-B	829	91.43	188.07	218.33
80 A	A-A	964	67.18	829.16	962.57
JIS	A-A	775	68.57	997.45	1157.94
S45C	B-B	775	83.22	359.35	417.17

จากการทดสอบการล้าของวัสดุรางรถไฟชนิด 80A ที่มีรอบอายุการใช้งานต่ำกว่า  $10^6$  รอบ สามารถประเมินอายุการใช้งานได้จาก สมการทั่วไปของความล้าคือ

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

ค่า a และ b ดูจากตารางที่ 4

ดังนั้นอายุการใช้งานของวัสดุรางรถไฟชนิด 80A ทั้งหมดเท่ากับ 6.81 ล้านรอบ

เพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับการประเมินอายุการใช้งานของรางรถไฟจึงได้ยกกรณีศึกษาการเดินทางรถไฟจากตารางการเดินทางรถไฟ ไปยังสายเหนือผ่านสถานีพิษณุโลกเริ่มใช้วันที่ 1 กรกฎาคม 2549 มีขบวนรถผ่านสถานีนี้เป็น จำนวนโบกี้บรรทุกเฉลี่ย 5-15 โบกี้ โดยในหนึ่งโบกี้มีจำนวนล้อที่วางบนรางเท่ากับ 4 ล้อ แต่ละล้อมีระยะห่างกันประมาณ 1.7 เมตร ดังนั้นสามารถหาอายุการใช้งานของเหล็กรางรถไฟในสถานะที่รางมีหน้าตัดและเนื้อวัสดุสม่ำเสมอตลอดได้ดังนี้

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

ดังนั้นความเค้นรวมของวัสดุรางรถไฟเกรด 80A บนรางรถไฟที่มีการรองรับอย่างง่ายบนหน้าตัด A-A สามารถคำนวณหาค่าอายุการใช้งานประมาณ 8 ปี สำหรับผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองอินทิกรัลไว้ในตารางที่ 8

**ตารางที่ 8** ผลการวิเคราะห์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับ  
คำนวณหาค่าอายุการใช้งานสำหรับการรองรับอย่างง่าย

ชนิดวัสดุ	หน้าตัด ราง	Tensile Strengt h (MPa)	ความ ต้านทาน การล้า, S <sub>i</sub> (MPa)	จำนวน รอบการ ล้า N <sub>f</sub> ล้านรอบ	อายุการ ใช้งาน ปี
70 A	B-B	829	208.89	3.30	3.834
80 A	A-A	964	185.123	6.81	7.91
JIS	A-A	775	194.22	4.11	4.778
S45C	B-B	775	121.626	2.55	2.96

#### 4. สรุป

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุราง  
รถไฟทั้ง 3 ชนิด สามารถแยกสรุปตามการทดสอบได้  
ดังนี้

1. การทดสอบแรงดึงของวัสดุรางรถไฟทั้ง 3  
ชนิด ปรากฏว่าวัสดุรางรถไฟเกรด 80 A มี  
ค่าแรงดึงสูงสุดที่ 964 MPa รองลงมาเป็น  
วัสดุรางรถไฟ เกรด 70A มีค่า 829 MP  
และต่ำสุดเป็นวัสดุเกรด JIS S45 C มีค่า  
เพียง 775 MPa
2. การทดสอบวัดชั้นแข็งลึก ของวัสดุรางรถไฟ  
ทั้ง 3 ชนิด ปรากฏว่าวัสดุรางรถไฟเกรด  
80A มีค่าความแข็งลึกมากที่สุดที่ 21.0 Hv  
รองลงมาเป็นวัสดุรางรถไฟเกรด JIS S45C  
มีค่า 20.9 Hv และต่ำสุดเป็นวัสดุ เกรด 70  
A มีค่า 15.7 Hv
3. การทดสอบความล้าตัวของวัสดุโลหะทั้ง 3  
ชนิดปรากฏวัสดุรางรถไฟเกรด 80 A มีค่า  
ความต้านทานการล้ามากที่สุด รองลงมาเป็น  
วัสดุรางรถไฟ เกรด 70A และต่ำสุดเป็นวัสดุ  
เกรด JIS S 45C

จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิ  
เมนต์เพื่อนำค่าความเค้นรวมฟอนมิสเซส เพื่อ  
คำนวณหาค่าอายุการล้าตัว โดยกำหนดขอบเขตของ  
ปัญหาให้รางมีการรองรับแบบอย่างง่ายและแบบฐาน  
ยึดแน่นตลอด ซึ่งสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์การโก่งของรางปรากฏว่าเกิด  
การโก่งสูงสุดบริเวณกึ่งกลางของรางทั้ง 2  
แบบ
2. การเกิดความเครียดหลักสูงสุดและ  
ความเครียดหลักต่ำสุด เกิดขึ้นที่กึ่งกลาง  
ของรางสำหรับแบบฐานยึดแน่นตลอด ส่วน  
การวิเคราะห์ที่ฐานรองรับเป็นอย่างง่าย จะ  
เกิดสูงสุดที่ฐานรับแรงด้านล่าง
3. การเกิดความเค้นหลักสูงสุด เกิดที่กึ่งกลาง  
รางสำหรับแบบฐานยึดแน่นตลอด และแบบ  
ฐานรองรับอย่างง่าย จะเกิดขึ้นที่บริเวณฐาน  
รับแรงด้านล่าง
4. การเกิดความเค้นหลักต่ำสุดจะเกิดขึ้นที่  
กึ่งกลางของรางทั้งแบบฐานรองรับเป็นอย่าง  
ง่าย และแบบยึดแน่นตลอด
5. การเกิดความเค้นรวมฟอนมิสเซส เกิดขึ้น  
บริเวณกึ่งกลางของรางสำหรับการรองรับ  
แบบฐานรองรับอย่างง่าย แต่สำหรับ  
ฐานรองรับแบบยึดแน่นตลอดจะได้ค่าสูงสุด  
ที่บริเวณฐานรองรับด้านล่าง ซึ่งก็เปรียบ  
เหมือนบริเวณหมอนรองรับรางรถไฟนั่นเอง
6. การคำนวณอายุการใช้งานปรากฏว่าจาก  
การคำนวณสำหรับฐานรองรับแบบยึดแน่น  
ตลอดจะมีอายุการใช้งานต่ำสุดที่ 218.3 ปี  
โดยใช้วัสดุ 70A บนหน้าตัด B-B ส่วน

หากเปลี่ยนเป็นฐานรองรับเป็นอย่างง่าย  
โดยใช้วัสดุ JIS S45 C หน้าตัด B-B จะมี  
อายุใช้งานต่ำสุดที่ 2.96 ปี

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Telliskivi, "Wheel and Rail Interaction"  
Royal Institute of Technology, 2003.
- [2] J. Fent, "Probabilistic analysis of fatigue  
life for ITER CS Conduit" Plasma Science  
and Fusion Center Massachusetts Institute of  
Technology Cambridge, 2007.
- [3] S. Farfain, "High cycle fatigue low cycle  
fatigue and failure modes of a carburized steel"  
International Journal of Fatigue, 26 (2004) : 673-  
678.
- [4] K. Geneland, M. Deminkol, "Effect of case  
depth on fatigue performance of AISI 8620  
Carburized steel" Internation Journal of  
Fatigue, 21(1999) : 207-212.