



การทำนายอายุการล้าของเพลลาขับแขนปู้งกี๋ของรถขุดไฟฟ้าตีนตะขาบด้วยระเบียบวิธีทาง  
ไฟไนต์เอลิเมนต์

Fatigue Life Prediction of Shipper Shaft of Electric Crawler Excavator by Finite  
Element Method

ศิวะ สิทธิพงษ์\*

Siva Sitthipong

สิทธิพงษ์ โลวีรกรณ์\*\*

Sitthipong Lohwirakorn

ประภาศ เมืองจันทร์บุรี\*\*\*

Prapas Muangjunburee

เจริญยุทธ เดชวายุกุล\*\*\*

Charoenyut Detvayukul

Received : October 1, 2018

Revised : November 13, 2018

Accepted : November 29, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำนายอายุการล้าของเพลลาขับแขนปู้งกี๋ของรถขุดไฟฟ้าตีนตะขาบซึ่งเป็นเครื่องจักรหลักของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตเหมืองแม่เมาะ วิธีการศึกษา เริ่มจากหาค่าความต้านทานต่อการล้าของวัสดุทดสอบโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASME B106.1M:1985 และสร้างสมการทำนายอายุการล้าตามสมการของ Basquin จากนั้นใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม NASTRAN วิเคราะห์ค่าความเค้นของเพลลาขับแขนปู้งกี๋ของรถขุดไฟฟ้าตีนตะขาบ และทำนายอายุการล้าของเพลลาเกียร์ขับแขนปู้งกี๋ของรถขุดไฟฟ้าตีนตะขาบ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายอายุการล้าของเพลลาขับแขนปู้งกี๋ของรถขุดไฟฟ้าตีนตะขาบขณะรับความเค้นล้า 423 เมกะ

ปาสคาล คือ 276,449 รอบวัฏจักร โดยสมการทำนายอายุที่ได้อคือ  $N = 10^{\left(\frac{1}{-0.144}\right)(\log \sigma - \log 2570)}$

\*นักวิชาการห้องปฏิบัติการทดสอบทางฟิสิกส์ ศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา (บางปู) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

Academic Physics Testing Laboratory Metrology and Testing Center (Bang Pu), Thailand Institute of Scientific and Technological Research

\*\*ผู้อำนวยการห้องปฏิบัติการทดสอบทางฟิสิกส์ ศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา (บางปู) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

Director of Physics Testing Laboratory Metrology and Testing Center (Bang Pu), Thailand Institute of Scientific and Technological Research

\*\*\*อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Lecturer at the Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering Prince of Songkla University

คำสำคัญ : เพลลาขับแขนปู้กัรรถชุดไฟฟ้าตีนตะขาบ / การล้า / การวิเคราะห์ค่าความเค้น /  
 ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ / สมการทำนายอายุ

### Abstract

The objective of this research is to predict the fatigue life of shipper shaft of the electric crawler excavator which is the major machine of Mae Moh mine. The method of study begins with finding the fatigue resistance of the test material based on ASME B106.1M:1985 standard and creating an equation for predicting the fatigue life according to the Basquin's equation. Then use the finite element method by NASTRAN program to analyze the stresses of Shipper shaft of the electric crawler excavator and predict the fatigue life of Shipper shaft of the electric crawler excavator. The results from the prediction of the fatigue life of shipper shaft of the electric crawler excavator while receiving the fatigue stress of 423 MPa were 276,449 cycle.

The predict life equation is  $N = 10^{\left(\frac{1}{-0.144}\right)(\log \sigma - \log 2570)}$

Keywords : Shipper Shaft of Electric Crawler Excavator / Fatigue / Stress Analysis /  
 Finite Element Method / Predict Life Equation

### บทนำ

รถชุดไฟฟ้าตีนตะขาบยี่ห้อ P&H รุ่น 2100BL ในภาพที่ 1 เป็นเครื่องจักรกลหนักและเป็นเครื่องจักรกลหลักของการไฟฟ้าเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย สำหรับใช้ขุดถ่านหินลิกไนต์ ขนาดของปู้กั 14 ลูกบาศก์เมตร ราคาต่อคัน 350-400 ล้านบาท เนื่องจากเป็นเครื่องจักรนำเข้าและมีเทคโนโลยีเฉพาะอะไหล่และชิ้นส่วนต่างๆต้องซื้อจากบริษัทผู้ผลิตซึ่งมีราคาแพง ในแต่ละปีสูญเสียงบประมาณค่าใช้จ่ายด้านอะไหล่ สูงถึง 15-20 ล้านบาท (ศิวะ และคนอื่นๆ, 2559) พบว่าบางครั้งรถชุดต้องหยุดการทำงานอย่างกะทันหันโดยมีสาเหตุมาจากการชำรุดของเพลลาขับแขนปู้กัที่ตั้งแสดงในภาพที่ 2 (ศิวะ และคนอื่นๆ, 2560) จากการศึกษาลักษณะการทำงานประกอบกับการตรวจพินิจผิวรอยแตกพบว่าเพลลาเข้าสู่กลไกการล้า งานวิจัยนี้จะทำนายอายุการล้าของเพลลาขับแขนปู้กัของรถชุดไฟฟ้าตีนตะขาบ เพื่อประโยชน์ในการวางแผนการซ่อมบำรุง



ภาพที่ 1 รถชุดไฟฟ้าตีนตะขาบยี่ห้อ P&H รุ่น 2100BL



ภาพที่ 2 เพลลาขับเคลื่อนปั๊มกีของรถชุดไฟฟ้าตีนจะขาบ

### วิธีดำเนินการวิจัย

1. หาค่าความต้านทานต่อการล้าของวัสดุทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการดัดล้มแบบคานหมุนดังแสดงในภาพที่ 3

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

- 1) เลือกวัสดุเพลลาเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูงเกรด AISI 4340 ให้ได้ขนาด 20 x 250 มิลลิเมตร จำนวน 30 ชิ้น
- 2) ใช้เครื่องกลึงกลึงชิ้นงานกลมให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตรความยาว 226 มิลลิเมตร และกลึงโค้งรัศมี 30 ด้วยเครื่อง CNC
- 3) ชัดกระดาษทรายให้ผิวชิ้นงานเรียบเป็นมันปราศจากออกไซด์และวัสดุหล่อลื่น

ขั้นตอนวิธีการทดสอบ

- 1) ยึดชิ้นงานทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบความแข็งแรงล้มแบบคานดัดดังแสดงในภาพที่ 3 ให้แน่นและตั้งตัวนักรอบอยู่ที่ศูนย์
- 2) ให้ภาระกัณฑ์แก่ชิ้นงานทดสอบกระทั่งชิ้นงานขาด ที่ความเค้น 5 ค่า คือ 400 เมกะปาสคาล 500 เมกะปาสคาล 600 เมกะปาสคาล 700 เมกะปาสคาล และ 800 เมกะปาสคาล ค่าความเค้นละ 6 ชิ้น
- 3) บันทึกกรอบและค่าความเค้นนำไปสร้าง S-N Curve



ภาพที่ 3 เครื่องทดสอบความแข็งแรงล้มแบบคานดัด

2. สร้างสมการทำนายอายุการล้าตามสมการ (1) ของ Basquin (Basquin, 1910)

นำข้อมูลการทดลองในตารางที่ 1 มากระชับข้อมูลด้วยวิธีการกำลังสองน้อยสุด และนำค่า intercept  $a = 2570$  และ  $b = -0.144$  ที่ได้จากการกระชับข้อมูลมาแทนในสมการ (2) จะได้สมการ (3) เพื่อใช้ทำนายอายุการล้า

$$\text{Basquin Equation} \quad \sigma_R = AN_R^B \quad (1)$$

$$N = 10^{\left(\frac{1}{b}\right)(\log \sigma - \log a)} \quad (2)$$

$$N = 10^{\left(\frac{1}{-0.144}\right)(\log \sigma - \log 2570)} \quad (3)$$

3. วิเคราะห์การส่งถ่ายกำลังของชิ้นส่วนเครื่องจักรและใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ค่าความเค้นของเพลากีเยอร์ซับแซนบุงกีของรถชุดไฟฟ้าตีนตะขา

การคำนวณระบบส่งกำลังของเพลา (Richard and Keith, 2011) ซับแซนบุงกีของรถชุดไฟฟ้าตีนตะขาเริ่มจากต้นกำลังมอเตอร์ขนาด 110 แรงม้า ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที ผ่านเกียร์ 16 ฟัน ไปจบที่ 91 ฟัน ดังแสดงในภาพที่ 4 สมการทั่วไปของ Gear train ได้แก่สมการที่ (4) ใช้หาทอร์กหรือแรงบิด (T) ต้องทราบกำลัง (P) และความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) สมการที่ (5) แสดงความสัมพันธ์อัตราทดของความเร็วรอบ (N) กับจำนวนฟันเกียร์ (n)

$$T = \frac{P}{\omega} \\ \frac{P(\text{hp})}{N(\text{rev/min})} \times \frac{550(\text{lb.ft/sec})}{1.0(\text{hp})} \times \frac{1.0(\text{rev})}{2\pi(\text{rad})} \times \frac{60\text{sec}}{\text{min}} \times \frac{12\text{in}}{\text{ft}} \\ T = 63025 \frac{P}{N} \text{ lbs.in} \quad (4)$$

$$N_3 = \frac{N_2}{N_3} n_2 \quad (5)$$

การคำนวณการส่งถ่ายกำลังการเคลื่อนที่และแรงบิดจากชุดเกียร์ที่ 1 ผ่านชุดเกียร์ที่ 2 ไปยังเพลาสับแซนบุงกี แสดงในสมการที่ (6) - ถึงสมการที่ (11) ตามลำดับ เพลากีเยอร์ซุดที่ 1

$$N = \frac{400 \times 16}{125} = 51.2 \text{ rpm} \quad (6)$$

$$T = \frac{63025 \times 110}{51.2} = 135,405 \text{ lbs.in} = 15,299 \text{ N.m} \quad (7)$$

เพลากีเยอร์ซุดที่ 2

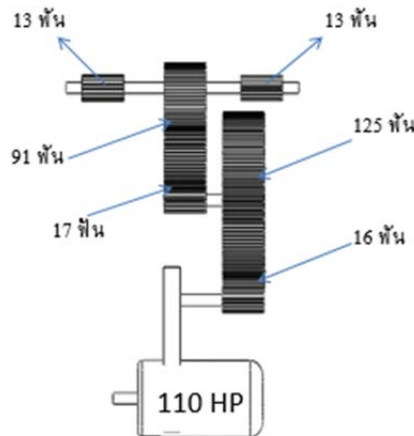
$$N = \frac{51.2 \times 17}{91} = 9.56 \text{ rpm} \quad (8)$$

$$T = \frac{63025 \times 110}{9.56} = 725,183 \text{ lbs.in} = 81,935 \text{ N.m} \quad (9)$$

แรงที่ส่งถ่ายจากเกียร์สู่ฟิเนียนมี 1 จุด แต่กลายเป็น 2 แนวแกน

$$F_{AT} = \frac{2T}{r} = \frac{2 \times 81935}{0.380} = 431,237 \text{ N} \quad (10)$$

$$F_{AN} = F_{AT} \tan 30 = 248,975 \text{ N} \quad (11)$$



ภาพที่ 4 ระบบส่งกำลังของเพลาขับแขนบู๊กี้ของรถชุดไฟฟ้าตีนตะขาบ

ในการวิเคราะห์ประมวผลใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรม NASTRAN ประกอบด้วย 7 ขั้นตอน

1. ตรวจสอบความสมบูรณ์ของ CAD file ที่นำเข้าให้สมบูรณ์ 100 %
2. กำหนดเงื่อนไขขอบเขตจุดจับยึดและประคองตามสภาวะการทำงานจริง
3. กำหนดภาระแรงกระทำระบุทั้งตำแหน่งและขนาด ซึ่งค่าที่ได้มาจากการคำนวณระบบส่งกำลังใน

ภาพที่ 5

4. กำหนดชนิดของวัสดุเป็นเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูงเกรด AISI 4340
5. กำหนดชนิดและรูปร่างเอลิเมนต์ให้เหมาะสมสำหรับรูปทรงเพลาซึ่งมีความซับซ้อน บริเวณ สไปลน์ จะเลือกเอลิเมนต์แบบ Tet 10
6. กำหนดความละเอียดของเอลิเมนต์บริเวณเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดให้มีค่าสูงเพื่อความแม่นยำในการวิเคราะห์
7. ใช้คำสั่งประมวผลชิ้นงาน
4. ทำนายอายุการล้าของเพลาเกียร์ขับแขนบู๊กี้ของรถชุดไฟฟ้าตีนตะขาบ  
แทนค่าความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ลงในสมการ (2) จะได้ค่าอายุการล้าของเพลาขับแขนบู๊กี้ของรถชุดไฟฟ้าตีนตะขาบดังแสดงในสมการ (3)

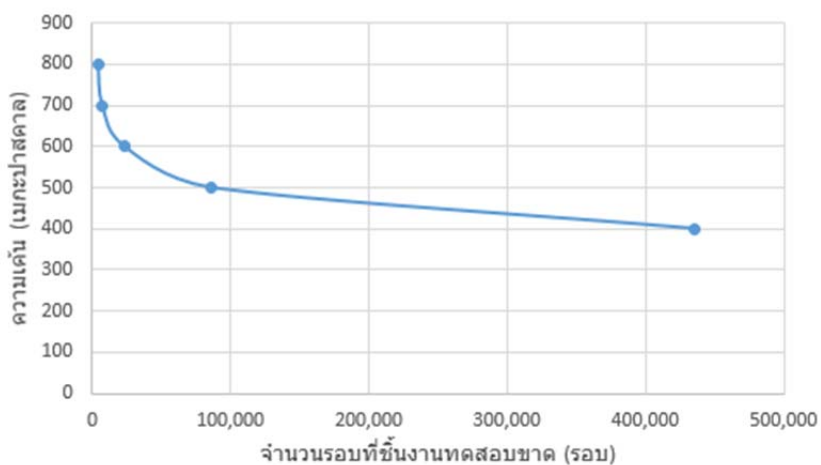
ปีที่ 6 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2562

### ผลการวิจัย

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการล้าของเหล็กกล้า AISI 4340 แสดงในตารางที่ 1 และกราฟ S-N Curve ภาพที่ 5

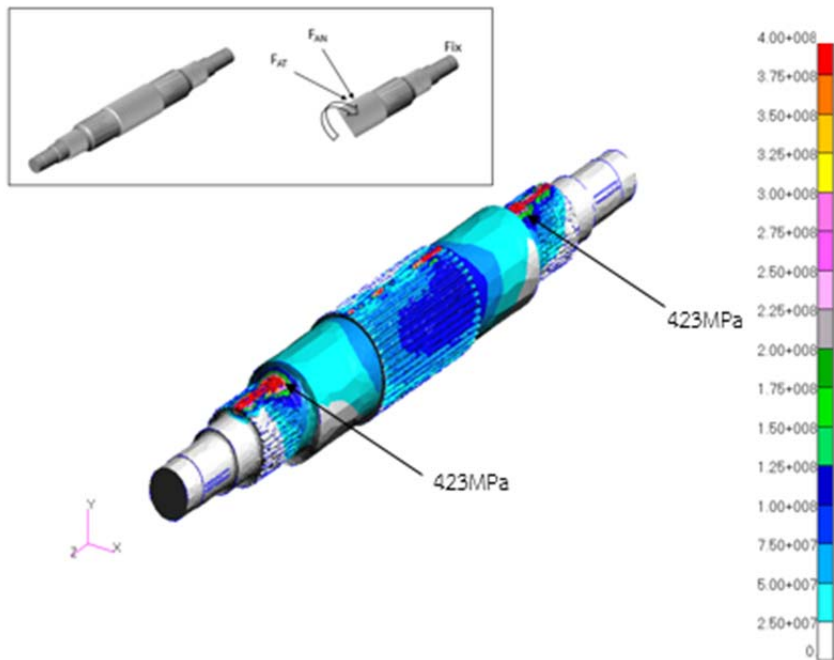
ตารางที่ 1 ค่าความเค้น-รอบเฉลี่ยของชิ้นงานที่ขาด

ค่าความเค้น (เมกะปาสคาล)	รอบเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบ (รอบ)
400	435,609
500	85,546
600	23,025
700	7,075
800	4,075

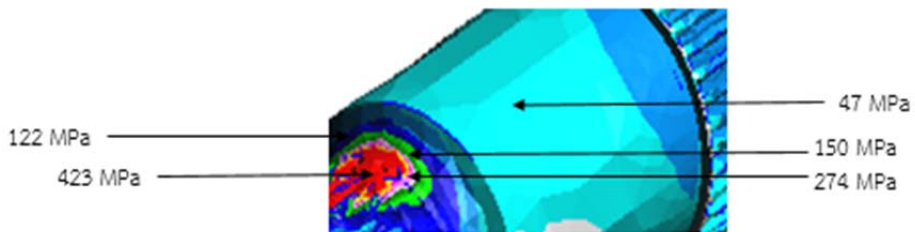


ภาพที่ 5 S-N Curve ของเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูงเกรด AISI 4340

ผลการทดสอบวิเคราะห์ค่าความเค้นด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของเพลลาขับแขนปู้งก็ร์ถชุดไฟฟ้าตีนตะขาบ แสดงในภาพที่ 6 ความเข้มข้นความเค้นสูงสุดอยู่ตำแหน่งเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดบริเวณบ่าเพลลา การกระจายตัวของค่าความเค้นแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 6 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้น ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 7 บริเวณเข้มข้นความเค้นและการกระจายตัวของความเค้น

ผลการทำนายอายุการล้าของเพลลาเกียร์ขับเคลื่อนปั๊มกีของรถชุดไฟฟ้าตีนตะขาพบได้จากการแทนค่าความเค้น 423 MPa ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ลงในสมการ (3) จะได้ค่าอายุการล้าของเพลลาขับเคลื่อนปั๊มกีของรถชุดไฟฟ้าตีนตะขา คือ 276,449 รอบวัฏจักร

#### อภิปรายผล

ค่าที่ได้จากสมการทำนายอายุมีหน่วยเป็นรอบวัฏจักรความเค้นไม่ใช่รอบการหมุนของเพลาดังนั้นในการนำไปใช้จึงต้องศึกษาทำความเข้าใจพฤติกรรมการทำงานของเครื่องจักรและพฤติกรรมการใช้งานของเครื่องจักร กล่าวคือในแต่ละรอบการหมุนของเพลาก็จะเกิดค่าความเค้นหลายค่า และแต่ละค่าจะมีอายุการล้าที่แตกต่างกัน การกระจายตัวของความเค้นบริเวณรอยร้าวเพื่อต่อยอดศึกษากลศาสตร์การแตกหักและยับยั้งกลไกการแตกหักไม่ได้อยู่ในขอบเขตของงานวิจัยนี้ ค่าความแข็งแรงของเพลาระบุใน S-N Curve นั้น เป็นค่าที่ยังไม่ได้คูณปัจจัยปรับแก้ อายุการล้าที่ได้จากสมการจะยาวนานกว่าอายุใช้งานจริง ดังนั้นเพื่อความถูกต้องแม่นยำ แนะนำให้ผู้ใช้

คุณปัจจัยปรับแก้หน้างานตามสมการที่ 12 ให้ได้ค่าความแข็งแรงล้าหน้างานจริง ( $\sigma_{real}$ ) เพื่อผลการทำนายที่แม่นยำขึ้น และวิธีการใช้งานปัจจัยปรับแก้นี้มีให้ศึกษาทั่วไปในบทเรียนเกี่ยวกับความล้าทางวิศวกรรม

$$\sigma_{real} = k_{surface} \times k_{size} \times k_{load} \times k_{temperature} \times k_{reliability} (\sigma_e) \quad (12)$$

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความเสียหายของเพลาส่งกำลัง อาทิ เพลาคับของลิปต์ (Goksenli and Eryurek, 2011) เพลาคับของปั้มน้ำ (Bachche and Tayade, 2013) เพลาคับที่เป็นที่อยู่ของแบร้ง (Bajaj, Borkar, 2015) เพลาคับใบจักรเรือ (Siva and Prawit, et al., 2018) พบว่าบริเวณเริ่มต้นความเสียหายเป็นบริเวณเข้มข้นความเค้นทั้งสิ้น รูปร่างบริเวณเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดมีความเค้นสะสมทำให้บริเวณนั้นเป็นจุดอ่อนแอในการรับภาระกระทำ มากหรือน้อยขึ้นกับลักษณะรูปร่างของบริเวณเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดที่ (Peterson RE, 1974)

อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่กระทำต่อเพลากีเยอร์ซิปแชนบุงก็รถชุดตีนตะขาพบว่าการความเค้นแอมพลิจูดมีค่าสูงกว่าค่าขีดจำกัดความแข็งแรงล้าทำให้เพลากีเยอร์ซิปแชนบุงก็รถชุดตีนตะขาเข้าสู่กลไกการล้ามีอายุการใช้งานจำกัด ข้อมูลในส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์เทียบระหว่างค่าความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับขีดจำกัดความแข็งแรงล้าซึ่งเป็นสมบัติของวัสดุจากข้อมูลผลการทดสอบ ซึ่งรูปร่างบ่าเพลาคับโค้งเป็นจุดอ่อนแอของการออกแบบ ทำให้เกิดการสะสมตัวของความเค้นและเป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตก สุดท้ายคือการแนะนำให้ปรับเปลี่ยนรูปร่างของบ่าเพลาคับโค้งเป็นแบบเทเปอร์เพื่อลดความเค้นสะสม ทั้งนี้การออกแบบต้องไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ร่วม

บทสรุป

จากการศึกษาวิจัยพบว่าเหล็กกล้าผสมต่ำแรงดึงสูงเกรด AISI 4340 ซึ่งถูกนำมาใช้ผลิตเพลาคับแชนบุงก็ของรถชุดไฟฟ้าตีนตะขาบามีค่าความเค้นล้าสูงสุดบริเวณบ่าเพลาคือ 423 เมกะปาสคาล ตัวประกอบความเข้มข้นความเค้น 1.9 และสมการทำนายอายุของเพลาคับแชนบุงก็ของรถชุดไฟฟ้าตีนตะขาบคือ

$$N = 10^{\left(\frac{1}{-0.144}\right)(\log \sigma - \log 2570)}$$
 จึงทำนายอายุการล้าของเพลาคับแชนบุงก็ของรถชุดไฟฟ้าตีนตะขาบได้ 276,449 รอบวัฏจักร

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์เสฐวรรธ สุจริตภวัตสกุล จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่แนะนำการใช้งานไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรม NASTRAN ขอขอบพระคุณ รศ.เดช เหมือนขาว และ ผศ.ยงยุทธ ดุลยกุล จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีวิชัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทดสอบ ขอขอบพระคุณ ผศ.ชัยยุทธ มิ่งาม และ อ.ศุภชัย ชัยณรงค์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด และขอขอบพระคุณอาจารย์ณรงค์ฤทธิ์ โตร์รัตน์ จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตเชียงใหม่และผู้ให้ข้อมูลศึกษา คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้



เอกสารอ้างอิง

- ศิวะ สิทธิพงษ์ และคนอื่นๆ. (2559, พฤษภาคม-สิงหาคม). การวิเคราะห์ค่าความเค้นของเพลาหมุนเหวี่ยงในระบบส่งกำลังของรถชุดไฟฟ้า. *วารสารนครสวรรค์พาเยา*, 9(2), 21-24.
- \_\_\_\_\_. (2560, มกราคม-มิถุนายน). การวิเคราะห์ค่าความเค้นของเพลาเกียร์ขับท้ายของรถชุดไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, 20(1), 57-66.
- Bachche, J. & Tayade, R.M. (2013). Finite Element analysis of shaft of centrifugal pump. *Journal of mechanical and civil engineering*, 3(7), 37-42.
- Bajaj, R. & Borkar, B.R. (2015). Finite Element analysis of Integral shaft bearing. *International journal of emerging engineering research and technology*, 1(3), 28-36.
- Basquin, O.H. (1910). *The exponential law of endurance tests*. America : American Society for Testing and Materials.
- Goksenli, A. & Eryurek, I.B. (2009). Failure analysis of an elevator drive shaft. *Engineering failure analysis*, 1(16), 1011-1019.
- Peterson, RE. (1974). *Stress concentration factors*. New York : John Wiley and Sons.
- Richard, G. & Keith, J. (2011). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. (9 th ed.). New York : McGraw Hill.
- Sitthipong, S., Towatana, P. & Sitticharoenchai, A. (2017). Failure Analysis of Metal Alloys Propeller Shafts. *Materials Today : Proceedings*, 4(5), 6491-6494.