

การประมาณอายุความล้าของโครงสร้างรถสามล้อสกยาแลบ

Fatigue Lifetime Estimation of Rot Samlor Skylab Structure

วีรฉัตร พลแสน¹, ประพจน์ ขุนทอง²

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900

โทร 0-2942-8555 ต่อ 1830 โทรสาร 0-2579-4576 อีเมลล์ weerachat2000@yahoo.com

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900

โทร 0-2942-8555 ต่อ 1830 โทรสาร 0-2579-4576 อีเมลล์ fengppk@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์อายุความล้าของโครงสร้างรถสามล้อสกยาแลบด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างถูกคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภาระกระทำบนโครงสร้างเป็นผลมาจากความขรุขระของผิวถนนที่ให้เป็นแบบ Random Two-Dimensional Isotropic Gaussian Field วิธีการ Stress-Life ถูกใช้ในการทำนายอายุความล้าของโครงสร้าง โดยใช้กฎ Palmgren-Miner ในการคำนวณความเสียหายสะสม และใช้วิธี Rainflow สำหรับการนับจำนวนรอบความเค้น

Abstract

Numerical analysis of high-cycle fatigue life for the structure of Rot Samlor Skylab is presented. Stress time history for the structure is computed by means of linear transient finite element analysis. Rough pavement surfaces inducing random loads on the structure are represented by a random two-dimensional isotropic Gaussian field. The stress-life (S-N) method using Palmgren-Miner's rule to compute the cumulative damage and the rainflow method for cycles counting is employed to predict the fatigue life of the structure.

1. คำนำ

ความล้า (Fatigue) เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างประเภทต่าง ๆ ที่ต้องรับแรงกระทำแบบซ้ำ ๆ และสามารถทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างเกิดการวิบัติได้ภายใต้ความเค้นที่มีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นที่จุดครากของวัสดุหรือความเค้นที่ยอมให้ที่ได้ออกแบบไว้สำหรับชิ้นส่วนนั้น ๆ โดยการวิบัติจากความล้านี้ เป็นสาเหตุหลักของการวิบัติที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนและโครงสร้างต่าง ๆ

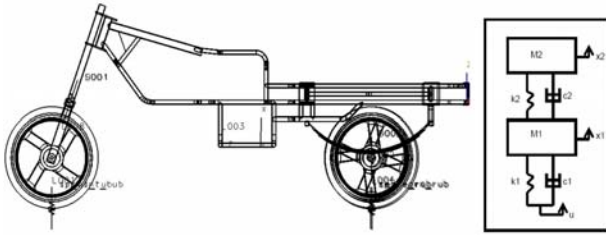
เนื่องจากชิ้นส่วนหรือรอยต่อชิ้นส่วนประเภทต่าง ๆ ส่วนใหญ่จะมีกำลังในการต้านทานความล้าที่ต่ำกว่าผู้ออกแบบได้ประเมินไว้ โดยเฉพาะ

อย่างยิ่งในชิ้นส่วนโครงสร้างที่เกิดสภาวะของความเค้นที่เพิ่มสูงขึ้น (Stress Concentration) ตัวอย่างเช่น ในชิ้นส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดอย่างทันทีทันใด และรอยแตกร้าวเริ่มต้นที่มีอยู่แล้วในวัสดุ (Defect, Flaw) เหล่านี้เป็นต้น จะเป็นบริเวณที่เกิดความเสียหายจากความล้าได้มากกว่าบริเวณอื่นซึ่งในบริเวณดังกล่าวนี้เมื่อรับแรงกระทำซ้ำ ๆ อย่างต่อเนื่องจะมีโอกาสเกิดการแตกร้าวเริ่มต้นจากความล้าและอาจนำไปสู่ความเสียหายของโครงสร้างและโครงสร้างเกิดการวิบัติจากความล้าได้ ดังนั้นในกระบวนการออกแบบจึงมีความจำเป็นที่ต้องพิจารณาถึงความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้าในกระบวนการวิเคราะห์ความล้า โดยวิธีการทดลองนั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายสูง การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการวิเคราะห์ความล้าจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในกระบวนการออกแบบ

ในงานวิจัยนี้เป็นการประมาณอายุความล้าของโครงสร้างรถสามล้อสกยาแลบด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ความเค้นในโครงสร้างซึ่งเป็นผลมาจากการที่รถวิ่งบนผิวถนนที่ขรุขระถูกวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยผิวถนนให้มีลักษณะเป็นแบบ Random Two-Dimensional Isotropic Gaussian Field จากนั้นค่าความเค้นที่ได้ในโดเมนของเวลาถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความล้าตัวของโครงสร้างด้วยวิธีการ Stress -Life (S-N) [1] โดยใช้สมการของ Goodman ในการแก้ค่า Mean Stress กฎของ Palmgren-Miner [2, 3] ถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่าความเสียหายสะสมและวิธีการ Rainflow ในการนับจำนวนรอบความเค้น [4]

2. รายละเอียดโครงสร้างและระบบกันสะเทือนรถสามล้อ

รถสามล้อสกยาแลบที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้เป็นรถสำหรับขนส่งผู้โดยสารขนาดไม่เกิน 10 คน โดยโครงสร้างรถนั้นทำจากท่อเหล็กที่มีคุณสมบัติดังนี้ มีค่าความหนาแน่น (ρ) 7850 kg/m³, โมดูลัสสภาพยืดหยุ่น (E) 207 GPa, อัตราปัวซอง (ν) 0.3, ความเค้นคราก (σ_y) 315 MPa, สำหรับระบบกันสะเทือนของรถนั้นประกอบด้วย ระบบกันสะเทือนแบบใช้คู่ที่ล้อหน้าและแหนบสปริงที่ล้อหลัง รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองโครงสร้างและระบบกันสะเทือนของรถสามล้อ โดยค่าคงที่สำหรับชุดระบบกันสะเทือนนั้นให้ไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองโครงสร้างและระบบกันสะเทือนของรถสามล้อ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของชุดกันสะเทือน

ค่าคงที่สำหรับชุดระบบกันสะเทือน	ล้อหน้า	ล้อหลัง
การหน่วงของยาง, c_1 (kN·s/m)	2.86	2.86
การหน่วงของโช๊ค, c_2 (kN·s/m)	1	1.1
สปริงของยาง, k_1 (kN/m)	215	215
สปริงของโช๊ค, k_2 (kN/m)	35	38

3. แบบจำลองผิวดน

ผิวดนโดยทั่วไปอาจจะพิจารณาให้เป็นแบบ Random Two-Dimensional Isotropic Gaussian Field ซึ่งอธิบายโดยฟังก์ชัน Power Spectral Density (PSD) [5]

$$S_r(\omega) = A_r \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-2} \quad (1)$$

โดย A_r คือค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระมีหน่วย m^3/cycle , ω คือค่าความถี่ในหน่วย cycles/m และ ω_0 คือความถี่ไม่ต่อเนื่องซึ่งให้มีค่าเท่ากับ $\pi/2$ cycles/m สภาพผิวดนจัดให้อยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ โดยผิวดนแบบ Good, Average และ Poor มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 20×10^{-6} , 80×10^{-6} และ 256×10^{-6} m^3/cycle ตามลำดับ ลักษณะของผิวดนถูกสร้างจากค่า PSD โดยสมการ (2) [6]

$$r(x) = \sum_{k=1}^N \sqrt{4A_r \left(\frac{\pi k}{L\omega_0} \right)^{-2}} \frac{\pi}{L} \cos \left(\frac{\pi k}{L} x + \phi_k \right) \quad (2)$$

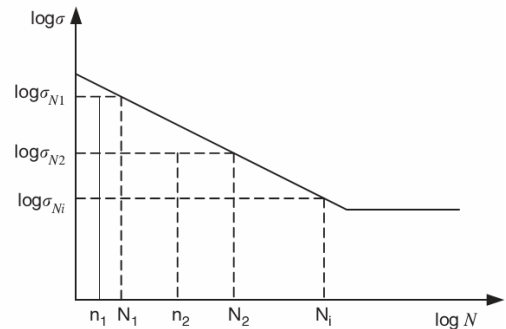
โดย $r(x)$ คือฟังก์ชันแสดงลักษณะผิวดน L คือความยาวของผิวดน ϕ_k คือมุมเฟสของลำดับความถี่ k^{th} ซึ่งกำหนดให้มุมเฟสของความถี่มีการกระจายตัวแบบสุ่มที่มีค่าระหว่าง 0 และ 2π

4. การประมาณอายุความล้า

วิธีการ Stress-Life ถูกใช้ในการวิเคราะห์อายุความล้าของโครงสร้างรถสามล้อ โดยใช้กฎของ Palmgren-Miner สำหรับคำนวณความเสียหายสะสมในแต่ละรอบความเค้น ดังแสดงในสมการ (3)

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad (3)$$

โดย n_i คือจำนวนรอบของค่าความเค้น Alternating σ_i และ N_i คือจำนวนรอบอายุการใช้งานที่ระดับความเค้น σ_i ซึ่งในการนับจำนวนความเค้นนั้นได้ใช้วิธีการ Rainflow ในรูปที่ 2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับค่าความเค้นกับจำนวนรอบอายุการใช้งาน



รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบความเสียหายกับระดับค่าความเค้น

วิธีการ Goodman ถูกนำมาใช้ในการแก้ไขค่าเฉลี่ยของความเค้น Alternating เพื่อให้ได้ค่าความเค้นสมมูล σ_{equiv} ดังแสดงในสมการ (4)

$$\sigma_{equiv} = \frac{\sigma_a}{(1 - \sigma_m / \sigma_u)} \quad (4)$$

โดยที่ σ_a เป็นความเค้น Alternating, σ_m เป็นค่าเฉลี่ยของความเค้น Alternating และ σ_u เป็นความเค้นประลัย ซึ่งความเค้นที่ใช้ในการคำนวณสมการ (4) นั้นให้ใช้เป็นค่าความเค้นสมมูล von Mises [1, 7]

5. วิธีการทดลอง

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างนั้นจะใช้วิธีการ Semi-discretization [8] โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในโดเมนเชิงพื้นที่ ซึ่งจะทำให้ได้สมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับสองในฟังก์ชันของเวลา ดังแสดงในสมการ (5)

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{f(t)\} \quad (5a)$$

$$\{u(0)\} = \{u_0\} \quad (5b)$$

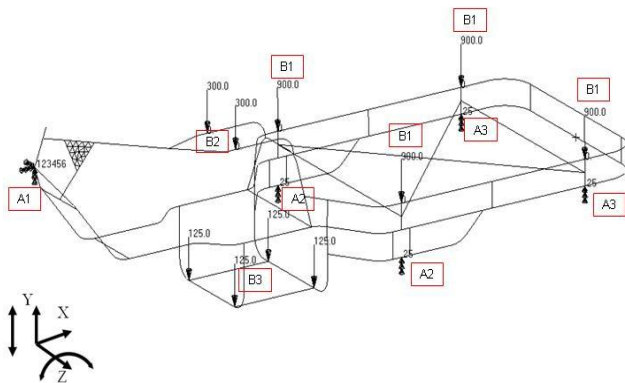
$$\{\dot{v}(0)\} = \{v_0\} \quad (5c)$$

โดย $\{\ddot{u}(t)\}$, $\{\dot{u}(t)\}$ และ $\{u(t)\}$ เป็นเวกเตอร์ความเร่ง ความเร็ว และการขจัดในฟังก์ชันของเวลา ตามลำดับ $[M]$, $[C]$ และ $[K]$ เป็นเมทริกซ์ของมวล ความหน่วง และความแข็งแรง ตามลำดับ $\{f(t)\}$ เป็นเวกเตอร์แรงภายนอกที่กระทำกับโครงสร้าง โดยมีสภาวะเริ่มต้น (Initial Conditions) เป็นเวกเตอร์ระยะขจัด $\{u(0)\} = \{u_0\}$ และ

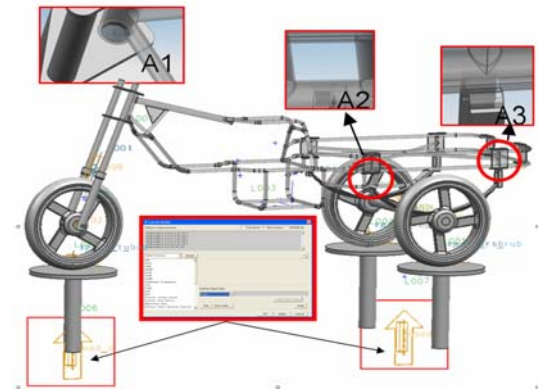
เวกเตอร์ความเร็ว $\{\dot{u}(0)\} = \{v_0\}$ โดยระบบสมการนี้สามารถถูกแก้หาผลเฉลยได้ด้วยวิธีการ Newmark [9]

รูปที่ 3 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างรถสามล้อที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งแบบจำลองนี้ได้ใช้เอลิเมนต์เป็นแบบคาน (Beam Element) สำหรับโครงสร้างที่ทำจากท่อเหล็กและใช้เอลิเมนต์แบบเปลือก (Shell Element) สำหรับโครงสร้างทำจากแผ่นเหล็ก โดยในงานวิจัยนี้จะไม่พิจารณาถึงผลกระทบของรอยเชื่อมในโครงสร้าง จุดรองรับโครงสร้างนั้นอยู่ที่จุด A1, A2 และ A3 ดังแสดง ซึ่งจุดเหล่านี้เป็นจุดที่จะทำการใส่ระยะขจัดอันเกิดจากความขรุขระของผิวถนน น้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้างนั้นประกอบด้วยน้ำหนักของผู้โดยสาร 10 คน (เฉลี่ยคนละ 60 kg) กระทำที่จุด B1, น้ำหนักของผู้ขับขี่ 60 kg กระทำที่จุด B2 และน้ำหนักเครื่องยนต์ 50 kg กระทำที่จุด B3 ดังแสดงในรูปที่ 3 ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม MSC. Patran-Natran เพื่อการวิเคราะห์หาค่าความเค้นในช่วงเวลา (Stress Time History) ของโครงสร้าง

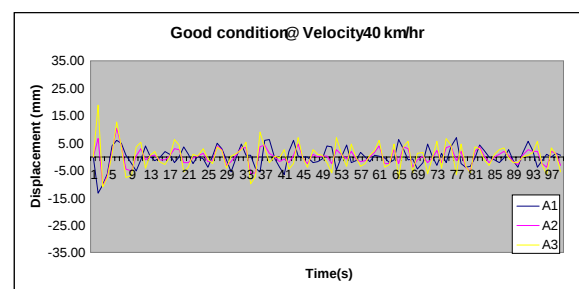
ในการหาระยะขจัดที่จุดรองรับ A1, A2, และ A3 นั้นได้ใช้โปรแกรม MSC. Adams ในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง รูปที่ 4 แสดงแบบจำลองโครงสร้างและระบบกับสะเทือนของรถสามล้อ โดยระยะขจัดของผิวถนนซึ่งได้จากสมการ (2) ถูกนำไปใส่ที่จุดรองรับที่ล้อหน้าและหลัง ดังแสดง การขจัดที่จุดรองรับโครงสร้าง A1, A2, และ A3 ในขณะที่รถวิ่งด้วยความเร็ว 40 km/hr ถูกแสดงในรูปที่ 5 (a), (b), และ (c) สำหรับผิวถนนแบบ Good, Average, และ Poor ตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 6 (a), (b) และ (c) นั้นแสดงการขจัดที่จุดรองรับโครงสร้าง A1, A2, และ A3 ในขณะที่รถวิ่งบนผิวถนนแบบ Average ที่ความเร็ว 60, 40, และ 20 km/hr ตามลำดับ



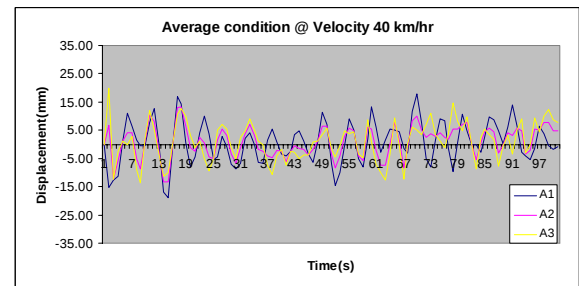
รูปที่ 3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างรถสามล้อ



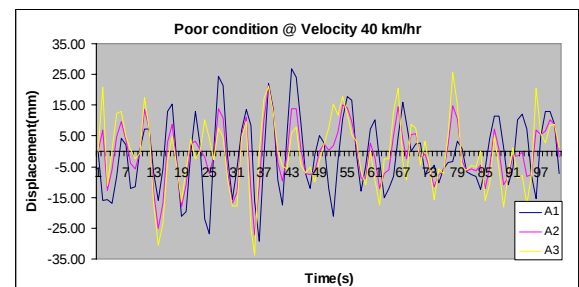
รูปที่ 4 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ของโครงสร้าง



(a)

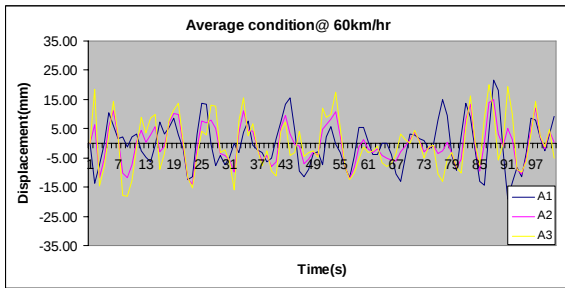


(b)

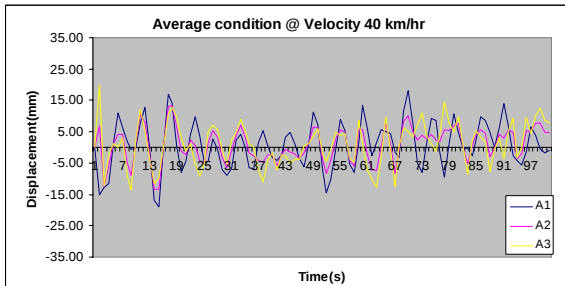


(c)

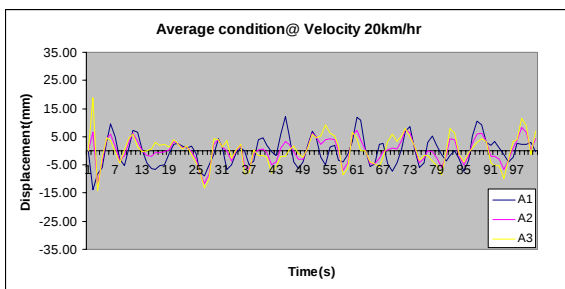
รูปที่ 5 การขจัดที่จุดรองรับ A1, A2 และ A3 ขณะที่รถวิ่งด้วยความเร็ว 40 km/hr สำหรับผิวถนนแบบ (a) Good (b) Average (c) Poor



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 6 ระยะเวลาที่จุดรองรับ A1, A2 และ A3 สำหรับผิวถนนแบบ Average ที่ความเร็วรถ (a) 60 km/hr (b) 40 km/hr (c) 20 km/hr

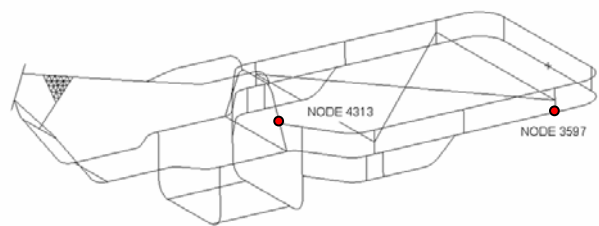
ค่าความเค้นในช่วงเวลา (Stress Time History) บนโครงสร้างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์อายุความล้าของโครงสร้างรถสามล้อ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม MSC. Fatigue เพื่อการทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างรถสามล้อ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Stress Life ดังคำอธิบายในหัวข้อที่ 4

6. ผลการทดลอง

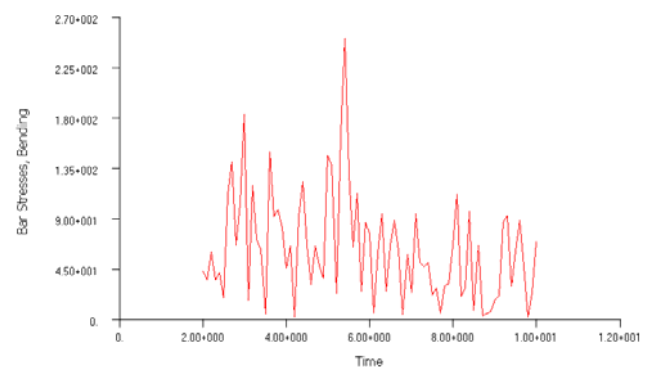
รูปที่ 7 แสดงบริเวณที่เกิดความล้าตัวมากที่สุดในโครงสร้าง โดยจะเกิดที่บริเวณ Node 3597 หรือ Node 4313 แล้วแต่สภาพของผิวถนนและความเร็วรถ ตัวอย่างเช่น สภาพผิวถนนแบบ Average และความเร็ว 60 km/hr จุดที่เกิดความเสียหายสูงสุดนั้นอยู่ที่บริเวณ Node 3597 โดยค่าความเค้น von Mises ที่เกิดขึ้นที่จุดนี้ถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 8 หมายเหตุค่าความเค้นในช่วง 2 วินาทีแรกจะไม่ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความล้าเนื่องจากระบบยังไม่เสถียร ดังนั้นค่าความเค้นที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้น

อยู่ในช่วง 2 ถึง 10 วินาที ในกรณีนี้ที่สภาพผิวถนนเป็นแบบ Poor และความเร็วเท่ากับ 20 km/hr ค่าความล้าตัวสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณ Node 4313 โดยความเค้น von Mises เกิดขึ้นที่จุดนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 9

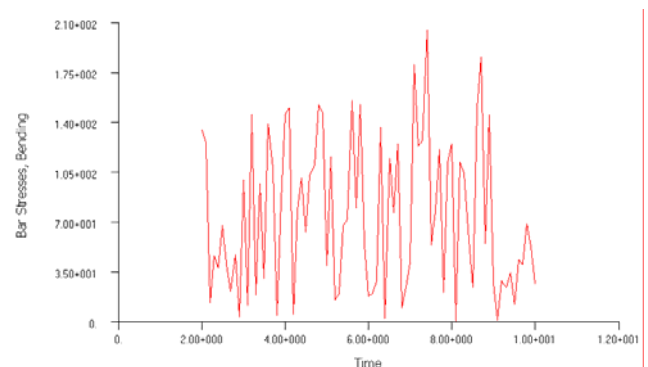
ในการทำนายอายุความล้าสำหรับแต่ละสภาพผิวถนนและความเร็วรถนั้นจะใช้ลักษณะผิวถนนที่เป็นแบบสุ่ม 10 ตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ จากนั้นจะนำอายุความล้าที่ได้จากแต่ละตัวอย่างมาหาค่าเฉลี่ย ตารางที่ 2 แสดงอายุการใช้งานของโครงสร้างรถสามล้อที่สภาวะต่าง ๆ โดยกำหนดให้รถถูกใช้งานวันละ 8 ชั่วโมง จากผลการวิเคราะห์พบว่าอายุการใช้งานของโครงสร้างรถนั้นขึ้นอยู่กับทั้งสภาพผิวถนนและความเร็ว โดยโครงสร้างรถจะมีอายุการใช้งานเกินกว่า 20 ปี เมื่อวิ่งบนผิวถนนแบบ Good ในทุกค่าความเร็วที่ใช้ในสภาพถนนแบบ Average และ Poor โครงสร้างรถจะมีอายุการใช้งานที่ต่ำลงเมื่อใช้ความเร็วรถสูงขึ้น



รูปที่ 7 บริเวณที่เกิดความล้าตัวในโครงสร้างสูงสุด



รูปที่ 8 ความเค้นที่ Node 3597 โดยใช้ผิวถนนแบบ Average และความเร็ว 60 km/hr



รูปที่ 9 ความเค้นที่ Node 4313 โดยใช้ผิวถนนแบบ Poor และความเร็ว 20 km/hr

ตารางที่ 2 อายุการใช้งาน (วัน) เฉลี่ยจาก 10 ตัวอย่าง สำหรับสภาวะการใช้งานแบบต่าง ๆ

ความเร็วรถ (km/hr)	สภาพผิวถนน		
	Good	Average	Poor
60	-	108	3.6
40	-	360	58
20	-	1692	432

- คือมีอายุการใช้งานมากกว่า 20 ปี

7. สรุป

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ประมาณค่าอายุความล้าของโครงสร้างรถสามล้อสกยาแลปโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข วิธีการรวมถึงขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ได้ถูกนำเสนอในบทความนี้ การประยุกต์ใช้โปรแกรม MSC Software ช่วยให้การวิเคราะห์มีความสะดวกและรวดเร็ว ผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาโครงสร้างรถสามล้อให้มีอายุการใช้งานที่สูงขึ้น นอกจากนี้กระบวนการวิเคราะห์ความล้าที่นำเสนอในบทความนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์กับกระบวนการออกแบบชิ้นโครงสร้างประเภทอื่น ๆ ได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัทและบุคคลที่มีรายชื่อดังต่อไปนี้ในการสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้

1. บริษัท ไทยซัมมิทและในเครือ
2. คุณ สิริกานต์ อินทรไพโรจน์
3. คุณ จิรปราชญ์ อัครสุวรรณชัย
4. คุณ ไพโรจน์ วิลาวรรณ

เอกสารอ้างอิง

1. Shigley, J. E., and Mischke, C. R., *Mechanical Engineering Design*, MaGraw-Hill, New York, 2001.
2. Palmgren, A., "Die Lebensdauer von Kugellagern," *ZVDI*, vol. 68, pp. 339–341, 1942.
3. Miner, M. A., "Cumulative Damage in Fatigue," *J. Appl. Mech.*, vol. 12, *Trans. ASME*, vol. 67, pp. A159-A164, 1945.
4. Matsuishi, M. and Endo, T., "Fatigue of metal subjected to varying stress," In: Presented to Kyushu District Meeting, *Jap. Soc. Mech. Engng.* (March 1968).
5. Dodds, C. J., and Robson, J. D., "The description of road surface roughness," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 31, pp. 175, 1973.
6. Wang, H., *Road Profiler Performance Evaluation and Accuracy Criteria Analysis*, M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2006.

7. Morsch, I. B., Boessio, M. L., and Awruch, A. M., "Fatigue lifetime estimation of commercial vehicles," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 291, pp. 169–191, 2006.
8. Hughes, T., *The Finite Element Method*, Dover Publications, Inc., Mineola, New York, 2000.
9. Newmark, N. M., "A method of computation for structural dynamics," *Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE*, vol. 85 (EM3), pp. 67-94, 1959.