

การวิเคราะห์ความเสียหายของล้อเครื่องตักถ่านลิกไนต์ที่เหมืองแม่เมาะ **Failure Analysis of Wheels of Lignite Reclaimers at Mae Moh Mine**

สมบัติ ศิริภักดิ์, เวชยันต์ รังศรี

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 50200

โทร 0-5394-4146 , โทรสาร 0-5394-4145

E-Mail Sombat.siri@Egat.co.th , wetchanyan.ransri@cmu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการเสียหายและประเมินสาเหตุของการเสียหายของล้อเครื่องตักถ่านลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะ โดยคัดเลือกลักษณะความเสียหายที่มีความถี่สูงที่สุดมาศึกษาพฤติกรรมของการเสียหาย ใช้การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ทำล้อ ตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ลักษณะการแตกร้าวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อนแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และวิเคราะห์กลไกการแตกร้าวโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นในล้อกับผลจากการคำนวณและลักษณะของการเสียหายจริง ผลการศึกษาพบว่าลักษณะการเสียหายเป็นการเสียหายจากการล้าผิว ซึ่งเป็นผลมาจากการกระทำที่เกิดจากการทำงานเป็นวัฏจักร ทำให้เกิดความเค้นสัมผัสที่ผิวล้อและทำให้เกิดการแตกร้าวในที่สุด

คำหลัก : เหมืองแม่เมาะ ; เครื่องตักถ่าน ; รอยแตกร้าว ; ความแข็งแรงล้าผิว

Abstract

This research purpose is mainly analyzing the characteristic of the fracture and evaluating the cause of such a fracture on the Reclaimer's wheel at Mae Moh mine. Selected from the highest frequency of those fractures, the research has been studied by testing on the mechanical property of the wheel material and not only checking on the chemical property but also with the microstructure. The optical microscopy and Scanning Electron Microscope are used to analyze the fractural characteristic. Moreover, the Finite Element Method is used to analyze the fractural mechanism in order to compare the result of the stress character that occur within the wheel with the real character of the fracture and those of the analytical calculation. The result shows that the Failure is caused by surface fatigue which is resulted from the characteristic of the duty of a working cycle. Such a cycle can cause the contact stress under the wheel surface to be fatigue crack in finally.

Keywords : Mae Moh Mine ; Reclaimer ; cracked ; surface fatigue strength

CST-269

รูปที่ 2. การทำงานของล้อเครื่องตักถ่าน

1. บทนำ

การขุดขนถ่านลิกไนต์ในเหมืองแม่เมาะเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ที่มีปริมาณประมาณวันละ 50,000 จำเป็นต้องใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่เช่นเครื่องตักถ่านดังแสดงในรูปที่ 1. ในการดำเนินการ หากเครื่องตักถ่านเกิดการชำรุดและต้องหยุดการทำงานจะส่งผลกระทบต่อ การส่งถ่านเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยซึ่งต้องการความมั่นคงสูง



รูปที่ 1. เครื่องตักถ่าน

ล้อเครื่องตักถ่านดังแสดงในรูปที่ 2. ต้องรับน้ำหนักและเคลื่อนที่อยู่บนรางตลอดเวลาขณะทำงาน จากการทำงานพบว่าความถี่ในการหยุดซ่อมมีมากกว่าแผนบำรุงรักษาที่กำหนดไว้ เนื่องจากการชำรุดของล้อของเครื่องตักถ่าน จึงมีความจำเป็นต้องถอดเปลี่ยนหรือทำการซ่อมล้อ



จากการตรวจสอบลักษณะการแตกร้าวของล้อพบว่า การแตกแบบลายงา ดังแสดงในรูปที่ 3. เป็นความเสียหายที่พบบ่อยที่สุดจึงได้นำลักษณะการเสียหายดังกล่าวมาวิเคราะห์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสาเหตุของการเสียหายสำหรับเป็นแนวทางในการบำรุงรักษา เป็นการยืดอายุการใช้งานและลดงบประมาณในการบำรุงรักษา ส่งผลไปถึงความมั่นคงต่อระบบการผลิตกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3. ลักษณะการแตกร้าวของล้อ

2. ทฤษฎี

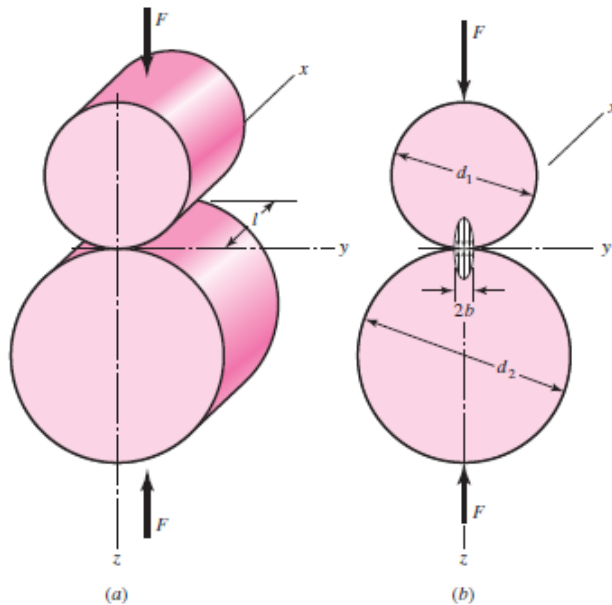
2.1 ความเค้นสัมผัส (Contact Stress) และการสัมผัสแบบกลิ้ง (Rolling Contact)

ขณะที่ล้อเครื่องตักถ่านทำงานจะมีการสัมผัสกันระหว่างล้อกับราง ทำให้เกิดแรงกระทำซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดความเค้นซึ่งเรียกว่าความเค้นสัมผัส เมื่อล้อเครื่องตักถ่านหมุนหรือลื่นไถลไปบนราง จะทำให้ความเค้นที่เกิดการกระจายของความเค้นบริเวณใต้ผิวล็กกลิ้งใต้ผิวเล็กน้อยจะเป็นบริเวณความเค้นเฉือนสูงสุดเมื่อใช้งานเป็นเวลานานๆ รอยแตกจะเกิดบริเวณนี้และขยายตัวขึ้นสู่ผิวตามรูปที่ 5. และรูปที่ 6.

ในกรณีการสัมผัสระหว่างผิวโค้งของทรงกระบอกกับผิวโค้งของทรงกระบอกภายใต้แรงกด

CST-269

แสดงได้ดังรูปที่ 4. บริเวณใต้ผิวสัมผัสจะเกิดความเค้นอัด ความเค้นดึง และความเค้นเฉือน และจุดที่เกิดการเสียหายได้ง่ายคือจุดที่เกิดความเค้นเฉือนสูงสุดเนื่องจากความแข็งแรงต่อแรงเฉือนของวัสดุเหนียวจะน้อยกว่าความแข็งแรงต่อแรงดึง



รูปที่ 4. แสดงมิติที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณหาความกว้างรอยสัมผัสระหว่างล้อทรงกระบอก
(a) การสัมผัสของผิวโดยมีแรง F กระจัดไปตามรูปทรงกระบอก
(b) ความเค้นสัมผัสกระจายเป็นรูปวงรีในความกว้างของ $2b$
ที่มา: Budynas G.R. and Nisbett J.K. (2011)

โดยใช้สมการของเฮอริท ความกว้างรอยสัมผัสของผิวโค้งแสดงดัง b สามารถหาได้จาก จากสมการที่ 1.

$$b = \sqrt{\frac{2F(1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2}{\pi l \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}} \quad (1)$$

เมื่อ b คือ ความกว้างรอยสัมผัสของผิวโค้ง
 F คือ แรงที่กระทำกับวัตถุ
 l คือ ความยาวของแนวสัมผัส

ν_1, ν_2 คือ อัตราส่วนปัวซองของวัตถุที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

E_1, E_2 คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัตถุที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

d_1, d_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ความดันสูงสุดหรือความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นใต้ผิวสัมผัสหาได้จากสมการที่ (2)

$$p_{\max} = \frac{2F}{\pi bw} \quad (2)$$

จุดที่เกิดความเค้นเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณใต้ผิวของการสัมผัส มีค่าประมาณ 30 % ของความเค้นสูงสุดบนผิวสัมผัสและมีความลึกประมาณ $0.786 b$ สำหรับวัตถุที่เป็นทรงกระบอกซึ่งเป็นจุดวิกฤต (Budynas G.R. and Nisbett J.K. ,2011)

2.3 ความแข็งแรงล้าผิว

ในกรณีที่วัสดุรับภาระที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาหรือภาระที่กระทำเป็นวัฏจักร วัสดุอาจเสียหายได้แม้ว่าความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าความแข็งแรง การเสียหายที่เกิดขึ้นมีชื่อเรียกว่าการเสียหายจากการล้า (Fatigue Failure)

R. R. Moore ทำการหาความแข็งแรงต่อการล้า (Fatigue Strength) โดยนำเพลากลมมารับภาระมาแขวนบนเพลาลูกทำให้เกิดภาระที่มีทิศทางและขนาดคงที่ และหมุนขึ้นงานจนกระทั่งเพลาลูกเกิดการร้าวรอยร้าวความแข็งแรงต่อการล้าขณะเสียหายนี้จะรายงานร่วมกับจำนวนรอบการหมุนที่ได้ ในกรณีเหล็กกล้าจะปรากฏความแข็งแรงต่อการล้าค่าต่ำสุดค่าหนึ่งที่เหล็กกล้าจะมีอายุการใช้งานไม่จำกัด จะเรียกความแข็งแรงต่อการล้าต่ำสุดว่าขีดจำกัดการล้า (Endurance Limit) ทั้งนี้การเสียหายเนื่องมาจากการล้าแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ การแตกแบบจุลภาค การลุกลามของการเสียหาย ก่อนที่เนื้อวัสดุที่เหลือจะรับภาระไม่ได้และเกิดการเสียหายอย่างฉับพลัน

CST-269

เมื่อผิวสองผิวสัมผัสและมีแรงกระทำซึ่งกันและกันแบบสถิต หากมีแรงมีขนาดระดับหนึ่ง การเสียหายจะมีจุดเริ่มต้นเป็นแบบจุด (Pitting Failure) ที่ใต้ผิวเล็กน้อยซึ่งเกิดความเค้นเฉือนสูงสุดก่อนจะลุกลามออกมาภายใต้ผิว ดังที่ได้กล่าวไว้ในส่วนของ การสัมผัสของเฮิร์ต ในกรณีที่มีการเคลื่อนที่สัมผัสกัน การเสียหายจะเกิดขึ้นหลังจากการหมุนสัมผัสกัน สักระยะเวลาหนึ่ง กลไกการเสียหายมีความซับซ้อนมากกว่ากรณีการสถิต และยังไม่มีการอธิบายอย่างชัดเจน

Earle Buckingham ได้ออกแบบอุปกรณ์ทดสอบเพื่อหาความแข็งแรงต่อการล้าแบบสัมผัส (Contact Fatigue Strength) หรือความแข็งแรงทนทานต่อการล้าของเฮิร์ต (Hertzian Endurance Strength) และแสดงการคำนวณโดยประยุกต์ใช้สูตรของเฮิร์ต นอกจากนี้ยังมีงานรวบรวมข้อมูลความสัมพันธ์ของความแข็ง H_B กับความแข็งแรงต่อการล้าแบบสัมผัส S_C ที่การทำงาน 10^8 รอบ แสดงได้ดังสมการที่ 3 (Budynas G.R. and Nisbett J.K., 2011)

$$(S_C)_{10^8} = \begin{cases} 0.4H_B - 10 \text{ kpsi} \\ 2.76H_B - 70 \text{ MPa} \end{cases} \quad (3)$$

3. ขั้นตอนการทดลอง

ได้ดำเนินการวิจัยโดยแบ่งออกเป็น การทดสอบสมบัติของวัสดุ เพื่อนำสมบัติที่ได้ไปใช้สำหรับ การคำนวณเชิงทฤษฎี เช่น ความเค้นของเฮิร์ต และความแข็งแรงต่อการล้าแบบสัมผัส หลังจากนั้นนำความเค้นที่ได้เปรียบเทียบกับแข็งแรงต่อการล้าแบบสัมผัส แล้วทำการคำนวณโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบการกระจายของความเค้นที่ได้จากการคำนวณ และนำไปวิเคราะห์ร่วมกับการทดสอบสมบัติของวัสดุ

3.1 การทดสอบสมบัติของวัสดุ

ทำโดยนำล้อที่รอกการซ่อมและมีลักษณะการแตกแบบลายงามาผ่าเพื่อเตรียมเป็นชิ้นทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5. และรูปที่ 6.



รูปที่ 5. การผ่าล้อเพื่อเตรียมชิ้นทดสอบ



รูปที่ 6. ล้อหลังการผ่าเพื่อเตรียมชิ้นทดสอบ

3.1.1 การทดสอบแรงดึง

ทำโดยนำชิ้นงานที่ได้จากการตัดผ่าล้อมา กลึงขึ้นรูปให้ได้ขนาดตามมาตรฐานระบุดังแสดงในรูปที่ 7. แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM E8



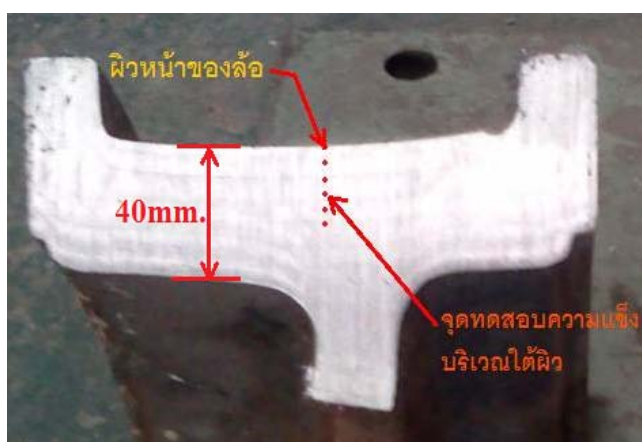
วัสดุล้อเครื่องตัดถ่าน (Reclamer # 1)

CST-269

รูปที่ 7. ชั้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8

3.1.2 การทดสอบความแข็ง

ทำโดยใช้เครื่องแบบ Micro Hardness Tester เริ่มทดสอบจากบริเวณผิวหน้าของล้อยักเข้าไปในด้านจุดศูนย์กลางของล้อยักดังรูปที่ 8. โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E384-89



รูปที่ 8. แสดงตำแหน่งการวัดค่าความแข็ง

3.1.3 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี

เพื่อให้ทราบว่าวัสดุที่ใช้ทำล้อยักเป็นวัสดุประเภทใดจึงได้ตรวจสอบหาปริมาณของธาตุต่าง ๆ ที่ประกอบอยู่ในวัสดุ



รูปที่ 9. การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Spectrometer Spark Emission โดยนำชิ้นงานที่ตัดแยกออกเป็นชิ้นแล้วทำการตรวจสอบด้วยเครื่อง Spectrometer Spark Emission ดังแสดงในรูปที่ 9.

3.1.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

เพื่อให้ทราบว่าวัสดุได้ผ่านกระบวนการด้านความร้อนใดมาบ้างจึงต้องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยการนำชิ้นงานมาติดกับแท่งพลาสติกตามรูปที่ 10. ขัดผิวหน้าให้เรียบมัน แล้วกัดด้วยกรด Nitral 2% แล้วนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยตรวจสอบตามมาตรฐาน ASTM E407-93

CST-269



รูปที่ 10. ชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

3.1.5 การตรวจสอบรอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

นำล้อเครื่องตัดถ่านมาตัดบริเวณที่มีรอยแตกตัดแบ่งเป็นชิ้นเล็กดังรูปที่ 11. เป็ตรอยแตกให้แยกออกจากกันแล้วนำไปตรวจสอบร่องรอยของการเสียหายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

3.2 คำนวณหาความเค้นใต้ผิวและความแข็งแรงต่อการล้าแบบสัมผัสของผิวล้อ

หลังจากได้สมบัติทางกายภาพของล้อและสมบัติเชิงกลของของวัสดุที่ใช้ทำล้อจึงได้นำข้อมูลมา



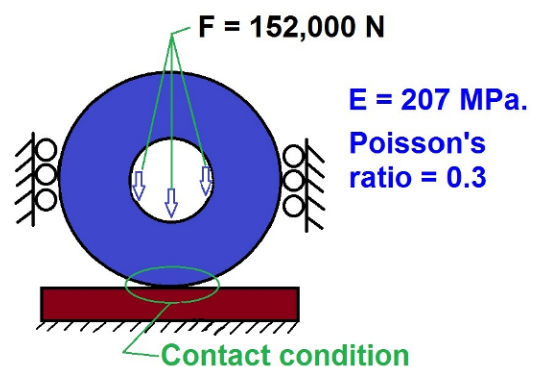
รูปที่ 11. การตัดล้อบริเวณรอยแตก

ใช้สำหรับคำนวณหาความเค้นสูงสุดที่ได้ผิวตามสมการที่ (2) และคำนวณหาความแข็งแรงต่อการล้าแบบสัมผัสของผิวล้อตามสมการที่ (3)

3.3 การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

เพื่อหาขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานว่าเป็นไปตามทฤษฎี เริ่มจากการสร้างแบบจำลอง แล้วใช้ค่าสมบัติจากการทดสอบไปจำลองการทำงานโดยใช้เงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับการประเมินสาเหตุของการเสียหายที่เกิดขึ้นกับล้อเครื่องตัดถ่านดังนี้

- ให้ภาระที่บริเวณแกนกลางของล้อโดยให้แรงกระจายตามทิศทางของแรงกด
 - ให้รับแรงกดขนาด 152,000 นิวตัน ซึ่งเป็นแรงสูงสุดที่ล้อรับภาระจริงในขณะหยุดนิ่ง
 - ให้ทิศทางแรงในแนวตั้งตั้งฉากกับราง
 - ให้รางยึดติดอยู่กับที่ ไม่มีการเคลื่อนไหว
- ซึ่งสรุปภาระและเงื่อนไขขอบเขตที่กระทำกับแบบจำลองได้ดังแสดงในรูปที่ 12.



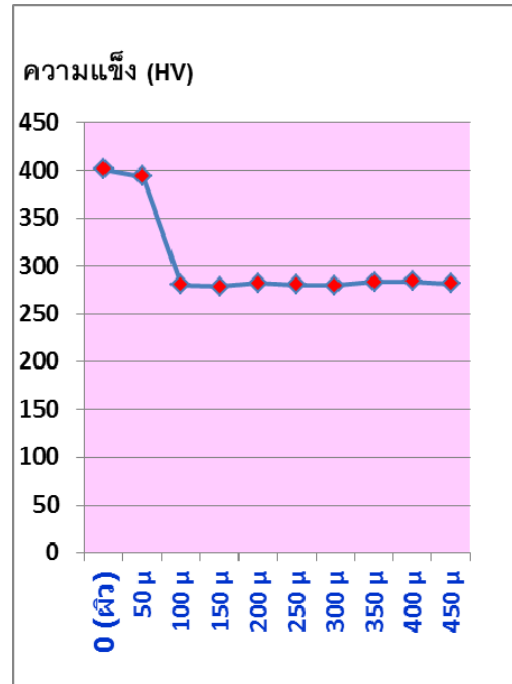
รูปที่ 12. ภาระและเงื่อนไขขอบเขตที่กระทำกับแบบจำลอง

4. ผลและการวิเคราะห์

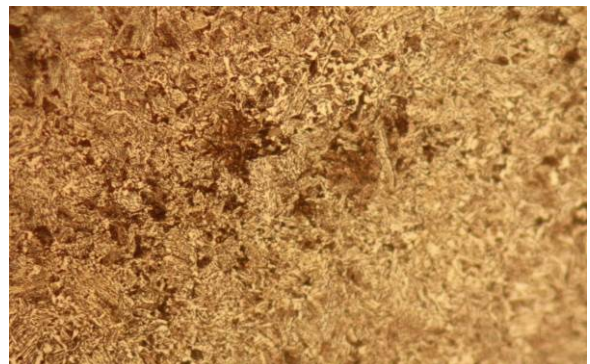
การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทำล้อแสดงได้ดังตารางที่ 1. ค่าความแข็งเฉลี่ย 280 HV. และมีค่าความแข็งมีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่

CST-269

13. และผลการตรวจสอบส่วนผสมของวัสดุตั้งแสดงตามตารางที่ 2. พบว่าเป็นเหล็ก Low Alloy Medium Carbon มีส่วนผสมใกล้เคียงกับเหล็กตามมาตรฐาน AISI 4140, การตรวจสอบโครงสร้างแสดงให้เห็นว่าเหล็กได้ผ่านกระบวนการทางความร้อนมาแล้วคือการชุบแข็ง (Hardening) และการอบคืนตัว (Tempering) เพื่อลดความเครียดที่ตกค้างในชิ้นงาน โครงสร้างจึงเป็น Temper Bainite ดังแสดงในรูปที่ 14. และจากการตรวจสอบร่องรอยของการเสียหายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง แสดงให้เห็น Pitting ใต้ผิวล้อย และมีการลุกลามออกมาที่ผิวดังแสดงในรูปที่ 15. ซึ่งเป็นการเสียหายที่สอดคล้องกับทฤษฎีของเฮิร์ท และการล้าแบบผิวสัมผัสที่มีการเคลื่อนที่สัมผัสพบทำให้เกิดความเค้นสูงภายใต้ผิวและมีการขยายลุกลามออกสู่ผิวดังแสดงในรูปที่ 16. และรูปที่ 16. และจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านพบว่าลักษณะผิวย่อยแตกเกิดจากกลไกของการเกิดความเค้นแบบซ้ำๆ ดังแสดงในรูปที่ 17. เป็นผลมาจากการรับภาระที่เป็นวัฏจักร ที่มีกลไกการแตกเฉพาะที่การลุกลามของการเสียหาย และเมื่อพื้นที่รับแรงเหลือน้อยลงก็จะเกิดการเสียหายแบบฉับพลัน



รูปที่ 13. การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งตามความลึกจากผิวล้อ



รูปที่ 14. โครงสร้างของล้อเครื่องตัดถ่าน (200X)

ซึ่งจะแตกต่างจากการเสียหายแบบเกินกำลัง ซึ่งจะมีรอยเป็นหลุมลึกจากการหลุดของเม็ดเกรน เมื่อนำผลของการวิเคราะห์ความเค้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 18. แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุดอยู่ใต้ผิวของชิ้นงานลึกเข้าไปประมาณ 2 มิลลิเมตร มีค่าความเค้น 295 MPa. สอดคล้องกับทฤษฎีของเฮิร์ทและรอยแตกจากชิ้นงานจริงที่เกิดขึ้น แม้ว่าค่าที่ได้จะมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการคำนวณที่จะได้

CST-269

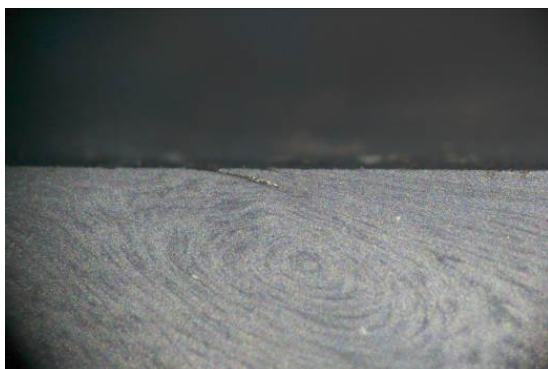
กล่าวถึงต่อไป ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการไม่ได้รวมผลจากแรงเฉือนที่ผิวล้อที่ได้จากการใช้งานจริงมีโอกาสเกิดขึ้นเนื่องจากการไถล

จากการคำนวณขีดจำกัดความล้าผิวของวัสดุที่ใช้ทำล้อที่ 10^8 รอบจากสมที่ได้จากการทดลองของบักกิงแฮมได้ค่าขีดจำกัดความล้าผิว S_c เท่ากับ 661.4 MPa. และจากการคำนวณการเกิดความเค้นจากการใช้งานจริงของล้อตามสมการ Hertzian Contact Stress ได้ค่าความเค้นสูงสุด 494.1 MPa. พบว่าค่าความเค้นจากการใช้งานจริงต่ำกว่าขีดจำกัดความล้าผิว ทำให้เห็นว่าล้ออาจจะใช้งานมากกว่า 10^8 รอบ หรือค่าความเค้นที่ได้จากทฤษฎีต่ำกว่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้น เนื่องจากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีของเฮิร์ตไม่ได้รวมผลจากแรงเฉือนที่ผิวล้อที่ได้จากการใช้งานจริงมีโอกาสเกิดขึ้นเนื่องจากการไถล

ตารางที่ 1. ผลการทดสอบแรงดึง

ผลการทดสอบแรงดึงวัสดุทำล้อเครื่องตักถ่าน	
Diameter (mm.)	12.7
Tensile Strength (MPa)	744
Yield Strength (MPa)	513
Elongation (%)	6.5

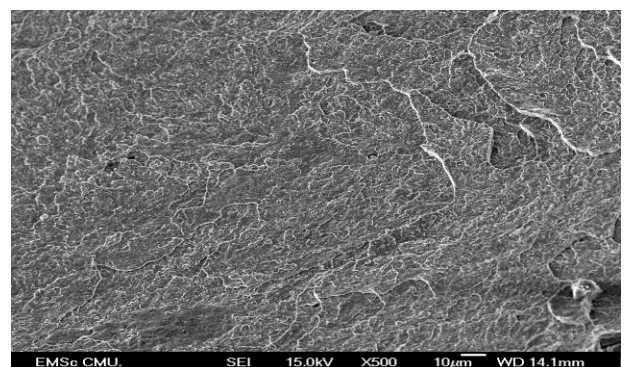
ตารางที่ 2. ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมี



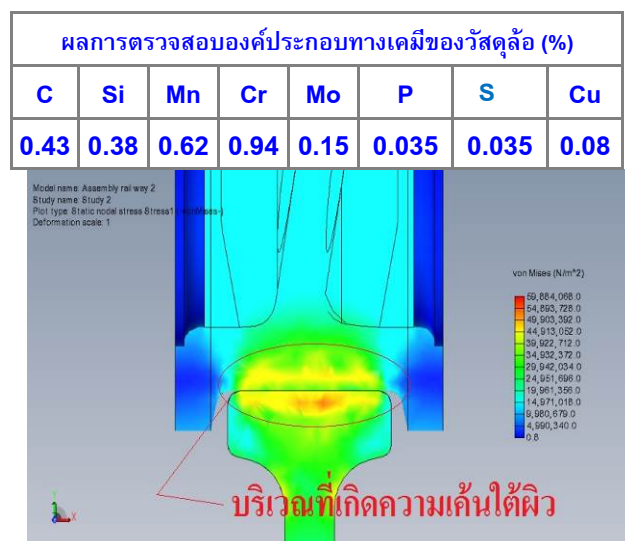
รูปที่ 15. ลักษณะการแตกที่เกิดบริเวณใต้ผิว



รูปที่ 16. การเกิดความเค้นสูงสุดบริเวณใต้ผิวและขยายไปที่ผิว



รูปที่ 17. ผลตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน



CST-269

รูปที่ 18. แสดงการเกิดความเค้นสูงสุดบริเวณใต้ผิว

ชำรุดเบื้องต้น, ศูนย์ฝึกอบรมแม่เมาะ, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบพบว่าวัสดุเป็นเหล็กในกลุ่มเหล็กความแข็งแรงสูงตามมาตรฐาน AISI 4140 มีโครงสร้างเป็น Temper Bainite จากการตรวจสอบรอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ทำให้เห็นรอยร้าวและการลุกลามสอดคล้องกับทฤษฎีการเสียหายโดยการล้า และได้นำสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบมาใช้คำนวณทางทฤษฎีและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลจากทฤษฎีทำให้ทราบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากการคำนวณต่ำกว่าค่าขีดจำกัดความแข็งแรงล้าของวัสดุ ผลจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นตำแหน่งความเค้นสูงสุดอยู่ใต้ผิวสัมผัสของล้อกับรางสอดคล้องกับทฤษฎีและจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย(กฟผ.) ที่ให้การสนับสนุนทุนในการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบภาควิชาเครื่องกลมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณอาจารย์ณรงค์ฤทธิ์ โทรรัตน์ จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย(เหมืองแม่เมาะ) ที่ให้การปรึกษาในทุกๆ เรื่องด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ (2553). กลศาสตร์การแตกหัก, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] ปราโมทย์ เดชะอำไพ (2555). ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [3] ณรงค์ฤทธิ์ โทรรัตน์ (2555). การวิเคราะห์การ

- [4] K.L. Johnson (1999). contact of Elastic Solid Hertz theory, Contact Mechanics, Cambridge University
- [5] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett Contact Stress, Shigley's Mechanical Engineering Design, 9th Edition in SI Unit
- [6] Miodrag A. Arsic, Zoran D. Odanovic (2012), Analysis of the spreader track wheels premature damages, Engineering Failure Analysis
- [7] Johan Sandstrom, Subsurface rolling contact Fatigue damage of railway wheels, International Journal of Fatigue
- [8] ASM Handbook (1997) Fatigue and Fracture Volume 19 ASM , OH
- [9] Robert F.Allen (1998) Metals Test Methods and Analytical Procedures : Annual Book of ASTM Standard