



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การวิเคราะห์ความเสียหายของเพลากรองในรถบรรทุกขนาดเล็ก

Failure analysis of the counter shaft in the pickup truck

วิชญ์ บุญมาก¹ กนกอร รจนากิจ^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี 248 ซอยเพชรเกษม 110 ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี 16/10 ถนนเลียบคลองทวีวัฒนา เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10170

Visanu Boonmag¹ Kanok-on Rodjanakid^{2*}

¹ Division of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University, Bangkok 10160

² Division of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bangkokthonburi University, Bangkok 10170

* Corresponding author.

E-mail: kanokon.rodj@gmail.com; Telephone: 061-4738291

วันที่รับบทความ 25 ตุลาคม 2566; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 27 พฤศจิกายน 2566; วันที่ตอบรับบทความ 18 มกราคม 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสาเหตุความเสียหายของเพลากรองในรถบรรทุกที่มีกำลังขับ 144 Hp. มีการใช้งานมา 8 ปี โดยวัสดุเพลาคือ เหล็กกล้าผสมต่ำที่ผ่านการชุบแข็ง JIS-SCM 420 การวิเคราะห์ความเสียหายใช้เทคนิค 5 วิธีดังต่อไปนี้ 1) การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี 2) การทดสอบความแข็ง 3) การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) 4) การตรวจสอบลักษณะของรอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ 5) การวิเคราะห์ความเค้นด้วยการจำลองเชิงตัวเลข ผลสรุปพื้นผิวการแตกหักของเพลานี้เกิดจากความล้า และความล้านี้เป็นกลไกสำคัญของการแตกหักของเพลานี้เนื่องจากตรวจพบรอยขยายขาด (Beach marks) ที่มองเห็นได้ชัด ขอบเขตเส้นแบ่งระหว่างระนาบความเสียหาย (Ratchet mark) และ เส้นร้าวรอยจากการล้า (Fatigue striations) ซึ่งผลลัพธ์เหล่านี้บ่งชี้ว่า โหมดการแตกหักที่ผิวของผิวของเพลานี้เป็นการแตกหักแบบเปราะ บริเวณผิวของเพลามีโครงสร้างจุลภาคแบบเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ และ แกนกลางเพลามีโครงสร้างจุลภาคแบบเบนไนต์ช่วงบน ค่าความแข็งของเพลากรองที่มีการวัดทั้ง 2 เส้น โดยเส้นที่ 1 วัดค่าความแข็งใกล้เคียงกับพื้นที่บริเวณรอยแตก เส้นที่ 2 วัดค่าความแข็งพื้นที่บริเวณเพลานี้ไม่มีการแตกหัก ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวของเพลากลับบริเวณรอยแตกมีค่าต่ำกว่า ความแข็งบริเวณผิวเพลานี้ไม่มีรอยแตกถึง 160 HV ซึ่งมีความผิดปกติบริเวณใกล้เคียงรอยแตกนี้ การวิเคราะห์ความเค้นด้วยสมการของ Goodman และ การวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ค่าของแรงบิดเท่ากับ 356 Nm ผลของการวิเคราะห์สรุปได้ว่าความเค้นสูงสุดที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 1283 MPa และ ผลจากการจำลองเชิงตัวเลขด้วยแรงบิดสูงสุดได้ค่า Maximum equivalent von Mises stress เท่ากับ 1302.5 MPa ผลลัพธ์มีความแตกต่างกันไม่เกิน 2% ทำให้มั่นใจในการใช้งานโปรแกรมว่ามีค่าไม่แตกต่างกันมากเกินไป นอกจากนี้ยังพบว่า ความเค้นสูงสุดที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า Yield strength 3.5 เท่า เมื่อความเค้นสูงสุดมีค่ามากกว่าค่า Yield strength ที่วัสดุจะรองรับได้ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เพลากรองเกิดการแตกหักได้

คำสำคัญ

เพลากรอง การแตกหักแบบเปราะ โครงสร้างจุลภาค ความล้า ความเค้น

Abstract

The purpose of this research is to determine the cause of failure of the counter shaft in a pickup car with a power output of 144 Hp that has been in use for 8 years. The counter shaft material is JIS-SCM 420 hardened low-alloyed steel.

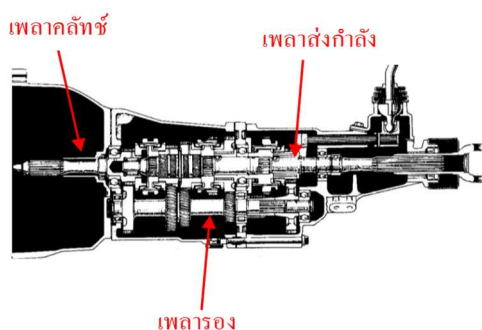
The following 5 techniques are used for failure analysis, 1) Composition (wt%) analysis with a spectrometer, 2) Vickers test, 3) Microstructural analysis with optical microscope, 4) The crack of surface layer using a scanning electron microscope and 5) Stress analysis by numerical simulation. The summary result of fracture surface of this counter shaft was caused by fatigue and that fatigue was the dominant mechanism of counter shaft failure due to obvious beach marks intergranular fracture and fatigue striations which these results indicate that the fracture mode of the outer surface is brittle fracture. The microstructure of the outer surface region is tempered martensite, and the central region is upper bainite. The hardness of the counter shaft was measured on both lines, the first line measuring the hardness near the broken shaft area, the second line measuring the hardness of the unbroken shaft area. It can be noted that the maximum surface hardness of the unbroken shaft is 160 HV higher than that at the broken shaft which is a very different value. Stress analysis using Goodman's equation and finite element analysis using a torque value of 356 Nm. The results of maximum stress analysis were 1283 MPa and the numerical simulation with maximum torque were Maximum equivalent von Mises stress equal to 1302.5 MPa, the results differ by no more than 2%, which ensures that when using the program there is not too much difference. In addition, it was also found that the maximum stress calculated was 3.5 times greater than the yield strength, when the maximum stress was greater than the yield strength that the material could support, it was the cause of the counter shaft breaking.

Keywords

counter shaft; brittle fracture; microstructure; fatigue, stress

1. คำนำ

เพลาคือชิ้นส่วนสำคัญของเครื่องจักรกล เพลาคำหน้าที่รับแรงบิด และส่งถ่ายกำลังไปยังชิ้นส่วนในชุดเกียร์ เพลาคำหน้าที่จากเหล็กกล้า เพื่อความทนทานต่อการใช้งาน โดยทั่วไปแล้วการรับภาระ (Load) ของเพลาคืออยู่ภายใต้แรงบิดและความเค้นดัดรวมกับความเข้มข้นของความเค้นในระดับต่างๆ บนเพลาคตามสภาวะการเปลี่ยนแปลงการรับแรงและการหมุนซ้ำวนไปวนมา (Dynamics Load) หรือแรงที่ทำการแบบซ้ำๆ (Cyclic loading) ตลอดช่วงเวลาที่ใช้งาน ส่งผลทำให้เกิดการแตกหักเสียหาย (Failure fracture) ก่อนเวลาอันควรในระหว่างการใช้งาน [1]



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเพลาดifferent ใดๆ ในกระปุกเกียร์รถยนต์ [2]

เพลารอง (Counter shaft) เป็นชิ้นส่วนที่อยู่ในเกียร์ดังแสดงในรูปที่ 1 และเป็นเพลาคำหน้าที่มีเฟืองเกียร์ติดอยู่ในเพลาคำหน้าที่ช่วยชุดเฟืองเพลาคำหลักถ่ายทอดอัตราทดในแต่ละความเร็วตามขนาดของเฟืองเกียร์ต่าง ๆ เพลารองยังมีเพลาคำเกียร์ถอยหลังมาต่ออยู่กับเฟืองถอยหลัง [2]

ในอดีตมีการศึกษาความเสียหายของเพลาคำ เช่น Santosh D และคณะ [3] ได้หาสาเหตุความเสียหายของเพลาลูกกลิ้งที่ทำมาจากเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 4140 ในโรงจักรไอน้ำ โดยตรวจพบความเค้นสะสมบริเวณผิวของรอยแตก และยังตรวจพบหลุมขนาดเล็กๆ (Microcrack) ในบริเวณจุดเริ่มต้นของรอยแตกตามส่วนต่อประสานในบริเวณขอบเกรนของเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้รอยแตกขยายตัวจนเกิดการแตกหักในขั้นตอนสุดท้าย Li-Hui Zhao และคณะ [4] ได้กล่าวไว้ว่าการแตกหักของเพลาคำนี้เกิดจากความล้าและความล้า นั้นเป็นกลไกสำคัญของการแตกหักของเพลาคำเนื่องจากตรวจพบการแตกหักแบบเหนียวและการแตกหักแบบเปราะ Carlos M. S Vicente และคณะ [5] ได้หาสาเหตุความเสียหายของเพลาคำในเครื่องทำลายเอกสาร ความเสียหายของเพลาคำเกิดจากแรงบิดและโมเมนต์ดัดที่สูงซึ่งเป็นผลมาจากการจัดวางแนวของเพลาคำที่ไม่ถูกต้อง และยังตรวจพบสารฝังในบริเวณรอยแตกด้วย ซึ่งเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้เพลาคำเกิดรอยแตกหัก Sajjad Seifoori และคณะ [6] ได้หาสาเหตุหลักของความเสียหายคือ

ความล้าที่เกิดจากการรับโหลดแบบซ้ำไปซ้ำมาซึ่งเป็นผลการรับแรงบิดแบบโหลดคงที่ที่เกิดกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เปลี่ยนแปลงต่ออายุความล้าของเพลารอบได้ความเค้นดัดแบบกลับไปกลับมา Jiang Chengjun และคณะ [7] ได้ตรวจสอบความเสียหายของเพลารอบในส่วนของข้อต่อเพลา ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่ามีการรวมตัวของแคลเซียมซิลิเกตและยังตรวจพบหลุมขนาดเล็กๆ (Microcrack) ที่บริเวณพื้นผิวของรอยแตก ซึ่งนำไปสู่การขยายของรอยแตกจากความล้าภายใต้โหลดแบบสลับ และเพลาก็เกิดการแตกหักของความล้าในขั้นตอนสุดท้าย Rodrigo S. Miranda และคณะ [8] ได้หาสาเหตุความเสียหายของเพลารอบที่ความเร็วที่ใช้งานในเมืองแร่ การตรวจสอบด้วยสายตาเผยให้เห็นรอยขยายขาด (Beach marks) ที่บริเวณผิวของรอยแตกของเพลารอบ นอกจากนี้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยังตรวจพบ Ratchet marks และ Fatigue striations หลักฐานทั้งหมดนี้ยืนยันว่าเพลารอบแตกหักเนื่องจากความล้า และยังตรวจพบสารฝังในจำนวนมากในเมทริกซ์โลหะบริเวณพื้นผิวของรอยแตกหัก S.K. Chaudhary และคณะ [9] ได้ตรวจสอบความเสียหายของเพลารอบในรถบรรทุกบริเวณพื้นผิวของรอยแตกตรวจพบการแตกแบบแยกออก (Cleavage fracture) ซึ่งอยู่ในโหมดของการแตกหักแบบเปราะ ผลลัพธ์ดังกล่าวระบุว่าความเสียหายเกิดขึ้นเนื่องจากการรับโหลดอย่างกะทันหันในบริเวณรอยแตกของเพลารอบ Qin Xiaofeng และคณะ [10] ได้ตรวจสอบความเสียหายของเพลารอบในปั๊มแบบสองทิศทาง การแตกหักของเพลารอบเกิดขึ้นในระหว่างทดสอบการทำงานบนแท่นทดสอบ หลังจากใช้งานไปประมาณ 60 ชั่วโมง ที่ความดัน 21 MPa และความเร็ว 2000 รอบ/นาที การตรวจสอบบริเวณพื้นผิวของรอยแตกเผยให้เห็นการแพร่กระจายของรอยแตกที่เกิดจากความล้า รอยแตกเฉือนที่ชัดเจนในส่วนโค้งส่งผลให้เกิดความเข้มข้นของความเค้น (Stress concentration) จนทำให้เกิดจุดการเริ่มต้นของรอยแตกและเกิดการแพร่กระจายของรอยแตกทั่วในพื้นที่นี้รุนแรงขึ้น Lixuan Zheng และคณะ [11] ได้ตรวจสอบความเสียหายของเฟืองเกียร์ที่ทำมาจากเหล็ก 20MnCr5S ผลการวิเคราะห์พบว่าชั้นความลึกของการชุบผิวแข็งในพื้นที่เฟืองมีความผิดปกติเนื่องจากการอบชุบด้วยความร้อนที่ไม่เหมาะสม และพบรอยแตกขนาดเล็ก (Microcrack) นั้นเกิดขึ้นบนพื้นผิวของฟันเฟือง

เนื่องจากการกระทำของแรงกระแทก นอกจากนี้ โครงสร้างจุลภาคของเบนไนต์ช่วงบนยังมีลักษณะที่ไม่เหมาะสมหลังผ่านกระบวนการบำบัดด้วยความร้อน ซึ่งมีส่วนช่วยลดความเหนียวในการรับแรงกระทำของวัสดุ และเร่งการเติบโตของรอยแตกเร็ว

เมื่อพิจารณางานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นสาเหตุหลักประการหนึ่งในความเสียหายของเพลาคือลักษณะของรอยแตกหักที่-



รูปที่ 2 ลักษณะของเพลารอบที่เสียหาย

เกิดจากความล้า และความล้าเป็นหนึ่งในเหตุการณ์ที่พบบ่อยที่สุดซึ่งเกิดขึ้นภายใต้การทำงานปกติ โดยที่ความเค้นสลับนั้นต่ำกว่าความเค้นที่ทำให้เกิดความเสียหาย ความเสียหายจากความล้ามักเริ่มต้นในบริเวณพื้นที่วิกฤตซึ่งมีข้อบกพร่องของโครงสร้างของวัสดุและกระบวนการผลิต และในกรณีศึกษาชิ้นส่วนเพลารอบที่เสียหายขณะขับเคลื่อนทำให้รถยนต์ใช้การไม่ได้ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งทำให้เกิดการขนส่งที่ล่าช้า และเสียโอกาสในการทำงาน ดังนั้นการศึกษาความเสียหายที่เกิดกับเพลารอบซึ่งมีความสำคัญ เพื่อทราบถึงสาเหตุ และนำมาสู่การป้องกันความเสียหายแบบเดิม ในการทดลองนี้ทำการตรวจสอบสมบัติทางกลและวิเคราะห์ความเค้นด้วยการจำลองเชิงตัวเลขตามกระบวนการว่ามีพฤติกรรมความเสียหายเป็นอย่างไรภายใต้แรงบิดและโมเมนต์ดัด

2. วัสดุและวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยคือชิ้นส่วนของเพลารอบที่เสียหายซึ่งได้มาจากรถบรรทุกขนาดเล็กที่เสียหาย เพลารอบทำจากเหล็กกล้าผสมต่ำที่ผ่านการชุบแข็ง JIS G 4053 ตามมาตรฐาน SCM 420 ที่มีโครเมียม-โมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมสำคัญ

ในการทดลองนี้มีการวิเคราะห์สาเหตุการแตกหักของเพลารองที่เสียหายโดยมีอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบดังนี้

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL: JSM-7800F prime) ตรวจสอบลักษณะของรอยแตก
2. เครื่องออฟติคอลอิมิตชันสเปกโตรมิเตอร์ (Thermo: ARL 3460) ตรวจสอบธาตุผสม
3. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Olympus laser microscopes: OLS 4000) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

4. เครื่อง ANTON PAAR: MHT-10 ตรวจสอบความแข็ง โดยได้ดำเนินการตรวจสอบใน 5 ลักษณะดังนี้คือ

1. การตรวจสอบผิวของรอยแตก
2. การตรวจสอบธาตุผสมของวัสดุ
3. การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ
4. การทดสอบสมบัติทางกล
5. การวิเคราะห์ความเค้นด้วยการจำลองเชิงตัวเลข

รายละเอียดในการตรวจสอบความเสียหายแยกวิเคราะห์ตามหัวข้อต่อไปนี้

2.2 การตรวจสอบผิวของรอยแตก

เพลารองที่เสียหายได้รับการตรวจสอบด้วยสายตาเพื่อให้ได้ภาพรวมของการแตกลักษณะทั่วไปของรอยแตกและพื้นผิวของการแตกหัก ขึ้นส่วนจากเพลารองที่เสียหายถูกนำมาเพื่อสำรวจลักษณะทั่วไปของรอยแตก จากนั้นจึงนำพื้นผิวที่แตกหักไปตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายมากขึ้นโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL: JSM-7800F prime)

2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเพื่อกำหนดองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคตามข้อกำหนดของวัสดุเพลารองที่เสียหายโดยใช้เครื่องออฟติคอลอิมิตชันสเปกโตรมิเตอร์ (Thermo: ARL 3460) ทำการตรวจสอบทางโลหะวิทยาในภาคตัดขวางของเพลารองถูกนำไปติดตั้งในแบบหล่อเรซินสังเคราะห์ที่หล่อเป็นแม่พิมพ์ขนาดเล็ก นำมาขัดเงาด้วยกระดาษทราย กัดผิวหน้าเพื่อให้ปรากฏโครงสร้างด้วยสารละลายไนตอล (Nital solution) ความเข้มข้น 5% โดย

ปริมาตร และการถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Olympus laser microscopes: OLS 4000)

2.4 การทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบสมบัติทางกล เป็นการวัดความแข็งแรงระดับไมโครโดยใช้เครื่อง ANTON PAAR: MHT-10 พร้อมมุมพีระมิดที่หัวกดเพชร 136° และโหลด 300 กรัม เริ่มกดจากบริเวณผิวด้านนอกของเพลาลงไปสู่แกนกลางของเพลาทันที 20 จุด เพื่อสร้างโปรไฟล์ความแข็งแรงจากผิวไปยังแกนกลางของเพลาลง

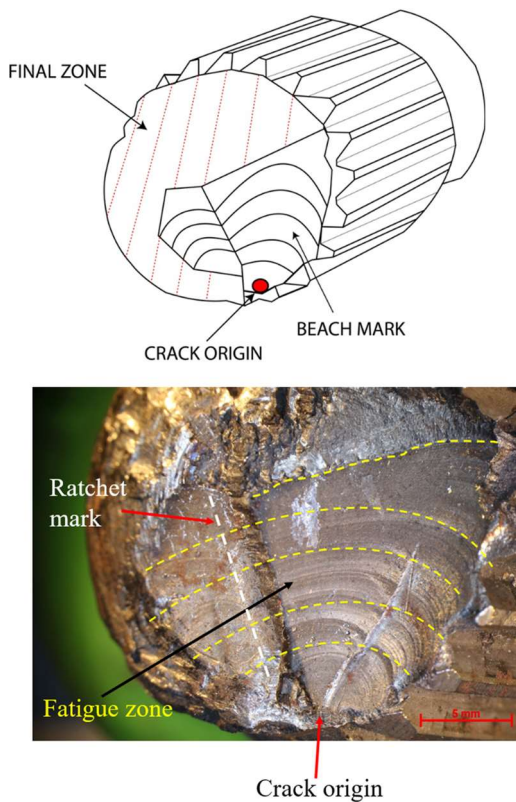
2.5 การวิเคราะห์ความเค้นด้วยการจำลองเชิงตัวเลข

การวิเคราะห์ความเค้นโดยการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าความเค้นที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐานของกฎัดแมน จะเริ่มจากการใช้โปรแกรม Solid Works 2016 ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ กำหนดเงื่อนไขขอบเขตต่าง ๆ รวมทั้งกำหนดชนิดของวัสดุเพลาลง กำหนดชนิดและขนาดของตาข่าย และแรงบิดที่เกิดขึ้นและทำการประมวลผลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้น เมื่อได้ผลของค่าความเค้นที่ได้จากการคำนวณและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แล้วก็นำมาวิเคราะห์เทียบกับค่า Ultimate tensile strength (S_{ut}) ของวัสดุที่ใช้ทำเพลารองแล้ววิเคราะห์ผลสรุป

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 การตรวจสอบผิวของรอยแตก

การตรวจสอบด้วยภาพถ่ายของเพลารองภาพขยายพื้นผิวรอยแตกหักของเพลารองที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ ดังรูปที่ 3 แสดงให้เห็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกร้าว (Crack origin) จากนั้นรอยแตกจะขยายตัวอย่างช้าๆ ผ่านพื้นที่ Fatigue zone หรือบริเวณที่ได้รับความเสียหายจากการรับแรงแบบคาบ ซ้ำไปซ้ำมา ในช่วงระหว่างการขยายตัวของรอยแตกอย่างช้าๆ จะมีความผันแปรของแรงที่กระทำและมีผลต่ออัตราการขยายตัวของรอยแตก มีลักษณะเป็นแบบ Beach marks ซึ่งเป็นแนวเส้นที่แสดงลักษณะการขยายตัวของรอยแตก เมื่อรอยแตกขยายตัวไปได้ระยะหนึ่งจะทำให้วัสดุเหลือพื้นที่ในการรับแรงน้อย และทำให้เกิดเป็นพื้นที่รับแรงเกินพิกัด (Final overload zone) ในพื้นที่ดังกล่าวพบว่ารอยแตกที่ขยายตัวส่วนใหญ่มีลักษณะทางมหภาคเป็นการแตกแบบเปราะ (Brittle fracture)



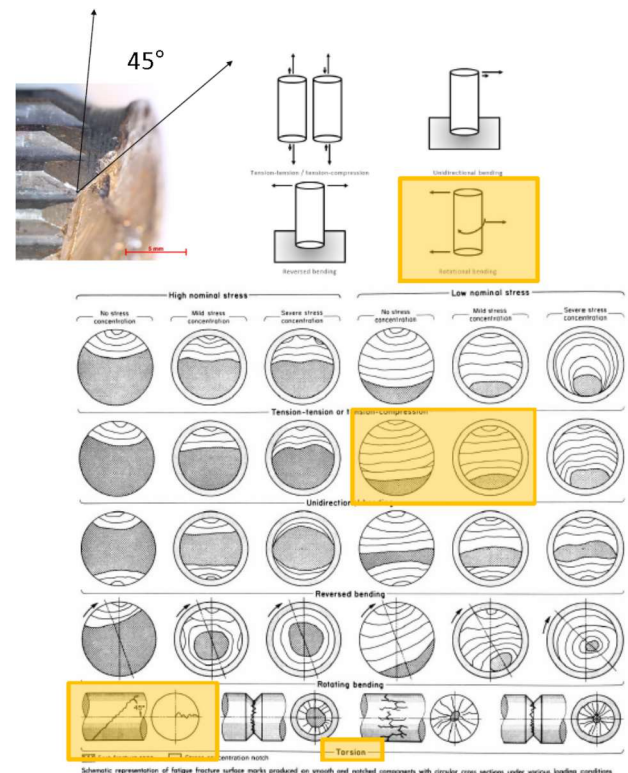
รูปที่ 3 ลักษณะการแตกของเพลารองที่เสียหาย

นอกจากนั้นยังมีลักษณะที่สำคัญปรากฏบนผิวหน้าแตกหักจากการล้าตัวคือ Ratchet mark (เส้นสีขาว) ดังแสดงในรูปที่ 3 รูปแบบดังกล่าวจะแสดงขอบเขตหรือเส้นแบ่งระหว่างระยะความเสียหาย 2 ระยะที่มาชนกัน จากภาพจะเห็นจุดเริ่มต้นของรอยแตก 2 จุด และมี Ratchet mark อยู่ระหว่างจุดเริ่มต้นทั้งสองนั้น การปรากฏของ Ratchet mark บนผิวหน้าแตกหักแสดงให้เห็นว่าการแตกหักมีจุดเริ่มต้นหลายจุด และเป็นผลจากชิ้นงานได้รับความเค้นรวมที่สูง (จากความเค้นที่กระทำ, ความเค้นตกค้าง, และเป็นจุดรวมความเค้น) Ratchet mark สามารถเกิดขึ้นได้จากความเค้นที่สูงกระทำต่อชิ้นงานหรือบริเวณนั้นๆเป็นจุดรวมความเค้นสูง จากการสังเกต Ratchet mark ทั้งคู่และขนาดพื้นที่ของบริเวณที่เกิดการแตกหักอย่างเฉียบพลัน สาเหตุหลักของความเสียหายที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดจากแรงที่กระทำ หรือไม่ก็บริเวณดังกล่าวเป็นจุดรวมความเค้น

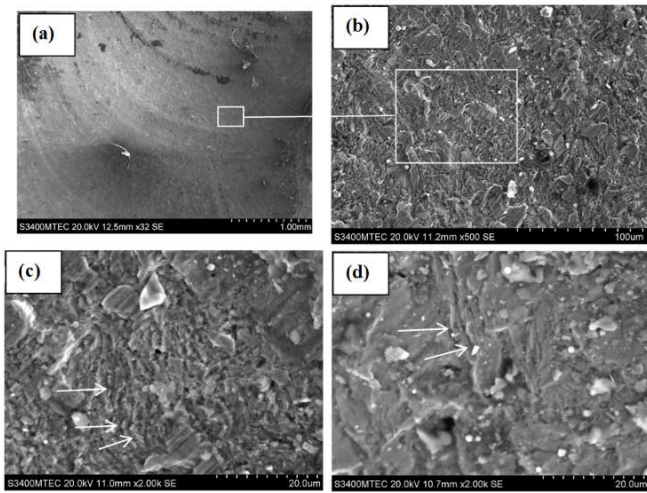
พิจารณารูปเปรียบเทียบบรอยแตกที่เกิดจากความล้าดังรูปที่ 4 ดูจากรูปด้านข้างของเพล่าที่แตกหักจะเห็นว่าลักษณะการแตกเป็นแบบ 45° เมื่อพิจารณาจากแผนผังแล้วพบว่าอยู่

ในโซนการแตกหักอย่างรวดเร็ว (Fast-fracture zone) ภายใต้ความเค้นดึงและความเค้นอัดน้อย (Tension-compression) ที่ได้รับผลกระทบจากแรงบิดและเกิดการดัดแบบหมุน (Rotational bending) [12]

การตรวจสอบรอยแตกหักของเพล่าโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด ถ่ายบริเวณรอยแตกของเพล่าในรูปที่ 5(a) ผิวหน้าแตกหักบริเวณที่แสดงแนวของการขยายตัวของ Beach mark เนื่องจากผิวหน้าแตกหักส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นคล้ายคลื่นที่ทิ้งร่องรอยไว้บนชายหาด และ รูปที่ 5(b) เป็นส่วนที่ขยายภาพออกมาจะมองเห็น Fatigue striations [8, 9] ส่วนรูปที่ 5(c) และ (d) แสดงให้เห็นทิศทางการเคลื่อนตัวระหว่างดิสโลเคชันของอะตอม โดย Fatigue striations ในแต่ละคาบของความเค้นหรือรอบของความเค้นแต่ละรอบที่กระทำกับชิ้นงาน ซึ่งเส้นเหล่านี้สามารถเห็นได้ด้วยการตรวจสอบในกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงเท่านั้น



รูปที่ 4 แผนผังของพื้นผิวแตกหักจากความล้าได้จาก ASM Metals Handbook [12]



รูปที่ 5 ภาพขยายพื้นผิวบริเวณรอยแตกของเพลลา (a) beach mark ที่กำลังขยาย 32x. (1m) (b) ภาพขยายบริเวณรอยแตกมองเห็น fatigue striations ที่กำลังขยาย 500x. (100 μm) (c-d) ทิศทางการเคลื่อนระหว่างดิสโลเคชันของอะตอม ที่กำลังขยาย 2.0kx. (20 μm)

3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ

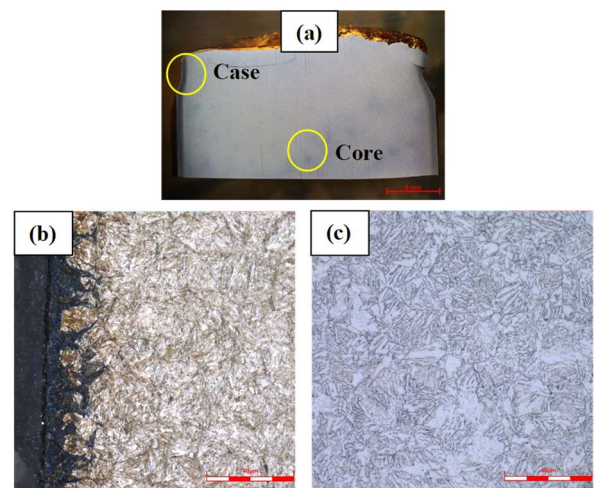
การตรวจสอบสมบัติทางเคมีของเพลารอง ผลที่ได้ออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ส่วนประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 เพลารองทำจากเหล็กกล้าผสมต่ำเกรด JIS-SCM 420 ที่มีโครเมียม-โมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมสำคัญ จะสังเกตได้ว่า โมลิบดีนัม (Mo) มีค่าเท่ากับ 0.14 ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.15-0.25 อยู่เล็กน้อย ซึ่งโมลิบดีนัมเป็นธาตุที่ทำให้เกิดคาร์ไบด์ ทำให้เหล็กมีเกรนที่ละเอียด ช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง เพิ่มความต้านทานการล้าตัว และยังช่วยเพิ่มความทนทานการกัดกร่อน [13]

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเพลารองที่เสียหายโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ ในรูปที่ 6(a) ถ่ายที่กำลังขยาย (1x) เป็นจุดที่ใช้กล้องตรวจสอบ 2 จุดที่ผิวและแกนกลางของเพลลา รูปที่ 6(b) ถ่ายบริเวณที่ผิวของเพลารองพบว่าโครงสร้างจุลภาคมีส่วนประกอบของมาร์เทนไซต์ซึ่งผ่านการเทมเปอร์ มีลักษณะเป็นเข็มเล็กๆ และละเอียด โครงสร้างมาร์เทนไซต์จะมีคุณสมบัติที่แข็งและแข็งแรงที่สุด รวมทั้งยังเปราะมากที่สุด จนไม่สามารถนำไปใช้งานได้ในทันที อีกทั้งความเค้นภายในที่เกิดขึ้นระหว่างการชุบยังเป็นจุดอ่อนของชิ้นงาน ความเหนียวและความแกร่งของมาร์เทนไซต์จะถูกเพิ่มขึ้น รวมทั้งลดความเค้นภายในโดยการนำไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนด้วยการอบ

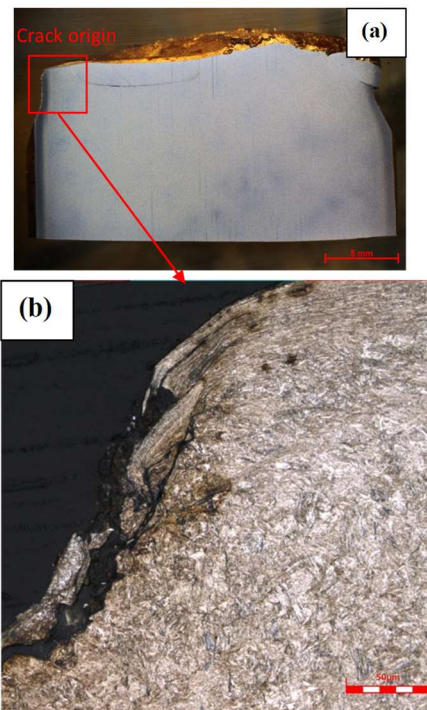
คืนตัว (Tempering) ที่จะทำให้เกิดการแพร่และเกิดปฏิกิริยาแปลงเป็นเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ ส่วนที่บริเวณใจกลางของเพลลาจะมีส่วนประกอบของโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเบนไนต์ช่วงบน ดังรูปที่ 6(c) พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีส่วนประกอบของเบนไนต์ช่วงบน [11, 14] มีลักษณะเป็นไม้ระแนงที่ต่อกันเป็นชั้น และดูคล้ายเพิร์ลไลต์หรือบางที่เรียกว่า เบนไนต์ 'ขนนก' ซึ่งก่อเป็นรูปร่างนิวเคลียสขึ้นมาโดยกลไกของแรงเฉือนที่บริเวณขอบเกรนของออสเทนไนต์

ตารางที่ 1 ผลการตรวจสอบทางเคมีของเพลารองที่เสียหาย SCM 420 steel (%wt) [13]

Material	Failed gear (Case)	Failed gear (Core)	SCM 420 [11]
C	0.26	0.20	0.18-0.23
Si	0.30	0.25	0.15-0.35
Mn	0.88	0.80	0.60-0.90
P	0.007	0.010	≤ 0.030
S	0.009	0.013	≤ 0.030
Ni	0.102	0.104	≤ 0.25
Cr	0.90	1.02	0.90-1.20
Mo	0.14	0.145	0.15-0.25



รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของเพลลาที่เสียหาย (a) ภาพถ่ายด้วยกำลังต่ำ 1x. 5 mm (b) ภาพถ่ายด้วยกำลังขยายสูงที่ผิวของเพลามีส่วนประกอบของมาร์เทนไซต์ กำลังขยาย 100x. 40 μm (c) รูปที่แกนกลางของเพลลาจะมีส่วนประกอบของเบนไนต์ช่วงบน กำลังขยาย 100x. 40 μm



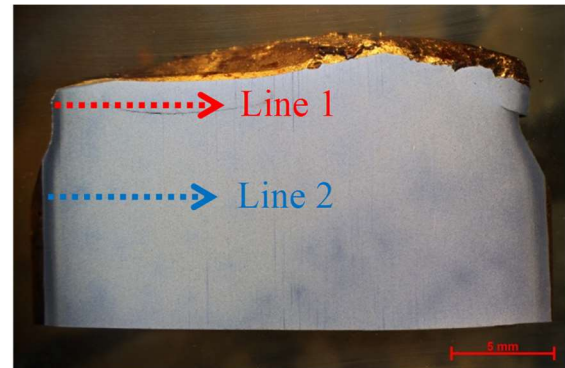
รูปที่ 7 (a) ภาพถ่ายจุดกำเนิดรอยแตกในเพลลา กำลังขยาย 1x. 5 mm (b) ภาพขยายจุดกำเนิดของรอยแตกแสดงโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ กำลังขยาย 50x. 50 μm

จากภาพขยายสามารถมองเห็นจุดกำเนิดรอยแตกที่ผิวบริเวณขอบของเพลลาดังรูปที่ 7(a) และเมื่อถ่ายภาพด้วยกำลังขยายที่สูงดังรูป 7(b) พบว่าในบริเวณจุดกำเนิดของรอยแตกในเพลลาที่ผ่านการชุบแข็งแบบเหนียวมาจากการสังเกตโครงสร้างทางโลหะวิทยามีลักษณะเป็นมาร์เทนไซต์ที่ดูเหมือนจะเป็นไม่ระแนงเรียงซ้อนกัน

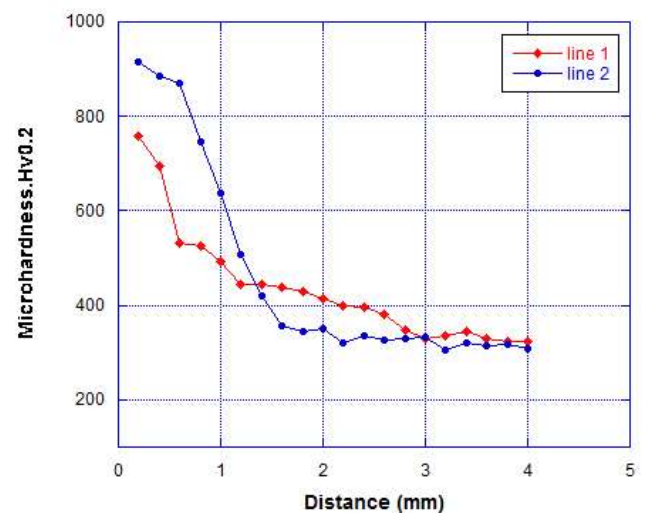
3.3 การทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบความแข็งของเพลารอง การวัดความแข็งตามแนวภาคตัดขวางบริเวณผิวใกล้รอยแตกและบริเวณผิวที่ไม่มีรอยแตกดังรูปที่ 8 ผลที่ได้ในการทดสอบความแข็งของเพลารองแสดงดังรูปที่ 9 เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมที่มีมุม 136° เริ่มกดจากบริเวณผิวด้านนอกของเพลลาเข้าไปสู่แกนกลางของเพลลาทั้งหมด 20 จุด ซึ่งจะมีการวัดค่าความแข็งที่ 2 ตำแหน่ง เส้นที่ 1 วัดค่าความแข็งใกล้กับพื้นที่บริเวณรอยแตก เส้นที่ 2 วัดค่าความแข็งพื้นที่บริเวณเพลลาที่ไม่มีการแตกหัก ผลที่ได้คือเส้นที่ 1 ใกล้รอยแตกค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวของเพลลาเท่ากับ 760 HV (62.5 HRC) และค่าความแข็งลดลงตามแนวรัศมี (2 mm) จนถึงค่าความ

แข็งต่ำสุดที่บริเวณใจกลางของเพลลาเท่ากับ 330 HV (33.5 HRC) ส่วนเส้นที่ 2 ในบริเวณที่ไม่แตก ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวของเพลลาเท่ากับ 920 HV (67.5 HRC) และค่าความแข็งต่ำสุดที่บริเวณใจกลางของเพลลาเท่ากับ 320 HV (32 HRC) จะสังเกตได้ว่าค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวของเพลลาใกล้รอยแตกมีค่าต่ำกว่าความแข็งบริเวณผิวเพลลาที่ไม่มีรอยแตกถึง 160 HV ซึ่งมีความผิดปกติบริเวณใกล้รอยแตกนี้ [8]



รูปที่ 8 การวัดความแข็งตามแนวภาคตัดขวางบริเวณผิวใกล้รอยแตกและบริเวณผิวที่ไม่มีรอยแตก



รูปที่ 9 ค่าความแข็งของเพลลาที่เสียหายโดยวัดจากขอบผิวด้านนอกไปถึงแกนกลางของเพลลา

3.4 การวิเคราะห์ความเค้นด้วยการจำลองเชิงตัวเลข

สมการความเค้นสลับและความเค้นเฉื่อยของ Von Mises [15]

$$\sigma'_a = \left[\left(\frac{32K_f M_a}{\pi d^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16K_{fs} T_m}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (2)$$

โดยที่

S_e = พิกัดการล้าของชิ้นงานจริง

S'_e = พิกัดการล้าของชิ้นงานทดสอบการหมุนดัด

มาตรฐานของ Moore

k_a = แฟกเตอร์แก้ไขผิว

k_b = แฟกเตอร์แก้ไขขนาด

k_c = แฟกเตอร์แก้ไขโหลด

k_d = แฟกเตอร์แก้ไขอุณหภูมิขณะใช้งาน

k_e = แฟกเตอร์แก้ไขระดับความน่าเชื่อถือ

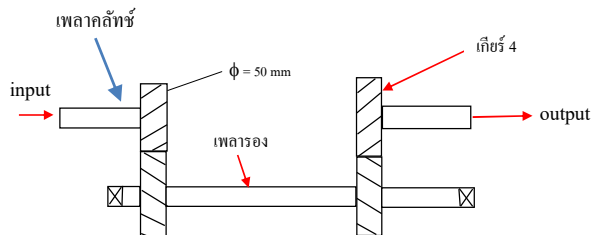
k_f = แฟกเตอร์แก้ไขค่าอิทธิพลอื่น ๆ ที่เหลือ

ค่า Safety factor

$$n_f = \frac{S_e}{\sigma'_a} \quad (3)$$

จากสมการของเฟืองเฉียงจะหามุมกดต้นได้จาก

$$\phi_t = \tan^{-1} \frac{\tan \phi_n}{\cos \phi} = \tan^{-1} \frac{\tan 20^\circ}{\cos 30^\circ} = 22.8^\circ$$



จากการรวมโมเมนต์รอบแกนเพลาค่า W_t หาได้โมเมนต์บิดสูงสุด $T_o = 356 \text{ Nm}$ (ได้จากคู่มือการซ่อมของรถรุ่นนี้) เส้นผ่านศูนย์กลางของเฟืองเกียร์ 4 เท่ากับ 50 mm.

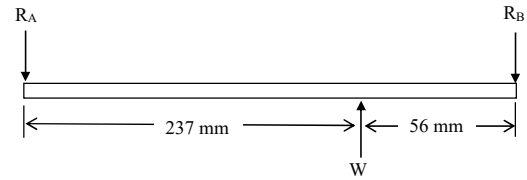
$$W_t = T/(d/2) = 356/(0.05/2) = 14,240 \text{ N}$$

ค่า W_r หาได้จาก มุมกดต้น

$$W_r = W_t \tan \phi = 14,240 \times \tan 22.8^\circ = 5,985.95 \text{ N}$$

$$W_o = 14,240 \tan 30^\circ = 8,221.47 \text{ N}$$

$$W = \sqrt{W_r^2 + W_t^2} = \sqrt{5985.95^2 + 14240^2} = 15,447 \text{ N}$$



หาแรงต้าน R_A และ R_B ที่รับโหลด W ดังรูป ด้วยการเทกโมเมนต์ในจุด A และ B ดังนี้

$$R_A = \frac{15447 \times 56}{293} = 2,952 \text{ N}$$

$$M_{max} = R_A (0.237) = 2,952 \times 0.237 = 700 \text{ N-m}$$

ตารางที่ 2 ค่าความเค้นหนาแน่นของความเค้น [13]

	Bending	Torsion	Axial
		al	
Shoulder fillet-sharp ($r/d = 0.02$)	2.7	2.2	3.0
Shoulder fillet-well rounded ($r/d = 0.1$)	1.7	1.5	1.9
End-mill keyseat ($r/d = 0.02$)	2.14	3.0	-
Sled runner keyseat	1.7	-	-
Retaining ring groove	5.0	3.0	5.0

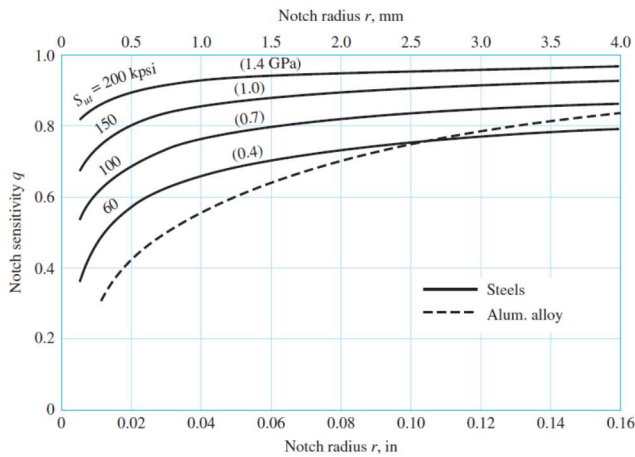
จากตารางที่ 2 ประมาณความเข้มข้นของความเค้นสำหรับ End-milled keyseat ได้ค่า $K_t = 2.14$ และ $K_{ts} = 3$ สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ JIS-SCM 420 ได้ค่า $S_{ut} = 655 \text{ MPa}$ และค่า $S_y = 365 \text{ MPa}$ [11] นำค่าที่ได้ทั้งหมดไปเปิดรูปที่ 10 และ 11 เพื่อหาค่า $q = 0.75$ และ $q_s = 0.82$ ตามลำดับ [15]

$$K_f = 1 + q (K_t - 1)$$

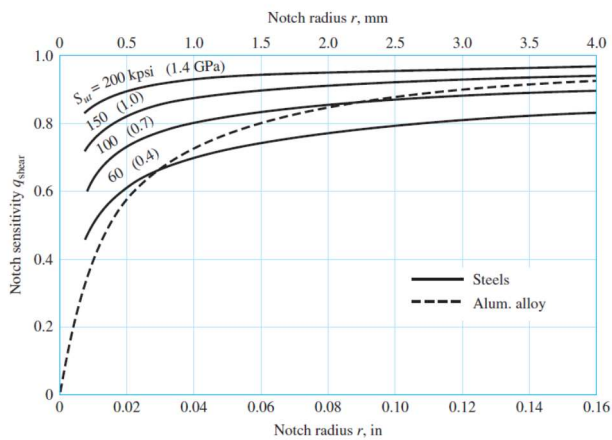
$$K_f = 1 + 0.75(2.14 - 1) = 1.855$$

$$K_{fs} = 1 + q_{shear} (K_{ts} - 1)$$

$$K_{fs} = 1 + 0.82(3 - 1) = 2.64$$



รูปที่ 10 ความไวรอยบากของเหล็กกล้าและอะลูมิเนียมอัลลอยด์ UNSA92024-T [15]



รูปที่ 11 ความไวรอยบากสำหรับวัสดุที่รับโหลดโมเมนต์บิด [15]

เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา 20 mm แทนค่า $M_o = 700$ Nm และ $T_o = 356$ Nm ในสมการที่ 1 [15]

$$\sigma'_a = \left[\left(\frac{32 \times 1.885 \times 700}{\pi \times 0.02^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16 \times 2.64 \times 356}{\pi \times 0.02^3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\sigma'_a = 1.283 \times 10^9 \text{ N/mm}^2 = 1283 \text{ MPa}$$

หาพิสัยการล้าของชิ้นงานจริงจากสมการที่ 2

แฟกเตอร์แก้ไข $k_a = 1$ [12]

แฟกเตอร์แก้ไขขนาด $k_b = 1.24d^{-0.107}$

$$= 1.24 \times 20^{-0.107} = 0.89 \text{ [15]}$$

แฟกเตอร์แก้ไขโหลด $k_c = 0.59$ [12]

แฟกเตอร์แก้ไขอุณหภูมิขณะใช้งาน $k_d = 1$ [14]

แฟกเตอร์แก้ไขระดับความน่าเชื่อถือ $k_e = 1 - 0.08 z_a$

$$k_e = 1 - (0.08 \times 2.326) = 0.82 \text{ [14]}$$

แฟกเตอร์แก้ไขค่าอิทธิพลอื่น ๆ ที่เหลือ $k_f = 0.5$ [15]

พิสัยการล้าของชิ้นงานทดสอบการหมุนตัด

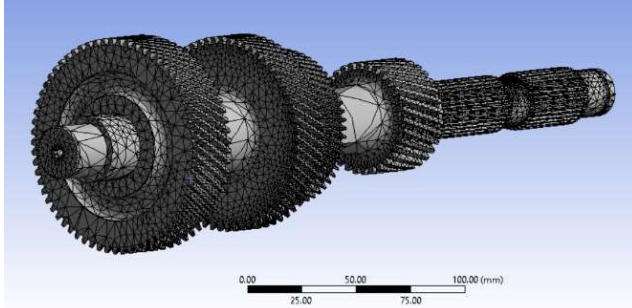
$$S'_e = 0.5 S_{ut} = 0.5 \times 655 = 327.50 \text{ MPa}$$

$$S_e = 1 \times 0.89 \times 0.59 \times 1 \times 0.82 \times 0.5 \times 327.5 = 70.51 \text{ MPa}$$

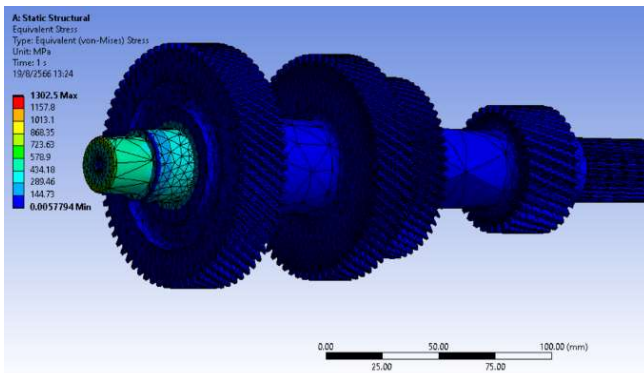
$$\text{ค่า Safety factor } n_f = \frac{S_e}{\sigma_a} = \frac{70.51}{12.83} = 5.49$$

การวิเคราะห์ความเค้นโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าความเค้นที่ได้จากการคำนวณตามหลักเกณฑ์การออกแบบของก๊าดแมน เพลารองได้รับการเขียนแบบจากขนาดจริงด้วยโปรแกรม Solid work 2016 และจำลองโดย Ansys Workbench ด้วยการปรับแต่งเมชและพื้นผิวสัมผัสของเพลลา โดยใช้ค่าของแรงบิดเท่ากับ 356 Nm (ได้จากคู่มือการซ่อมของรถรุ่นนี้) คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเพลารองโดยใช้ ค่า Young's modulus เท่ากับ 210 GPa ความหนาแน่น 7.85 g/cm^3 และอัตราส่วนปัวซอง 0.3 [13] เมช (Mesh) ถูกสร้างขึ้นด้วยเอลิเมนต์แบบสี่หน้าดังรูปที่ 12 แบบจำลองการทำงานของเมชที่สร้างขึ้นมีเอลิเมนต์ทั้งหมด 59,417 และโหนดทั้งหมด 111,124 ถูกเลือกสำหรับการควบคุมเมช แต่ละโหนดมี DOF เท่ากับ 59,490 เคลื่อนที่ไปตามทิศทางของแกน x, y และ z เท่านั้น โดยนำการวิเคราะห์ไปใช้กับเพลลาที่ต้องรับแรงบิด หลังจากนั้นจะได้รับการกระจายความเค้นเป็นตัวเลข ผลจากการจำลองเชิงตัวเลขของเพลารองด้วยแรงบิดสูงสุดได้ค่า Maximum equivalent von Mises stress เท่ากับ 1302.5 MPa ดังแสดงในรูปที่ 13 ความเค้นสลับและความเค้นเฉลี่ยของ Von Mises ที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 1283 MPa ผลลัพธ์มีความแตกต่างกันไม่เกิน 2% ซึ่งทำให้มั่นใจในการใช้งานโปรแกรมว่ามีค่าไม่แตกต่างกันมาก

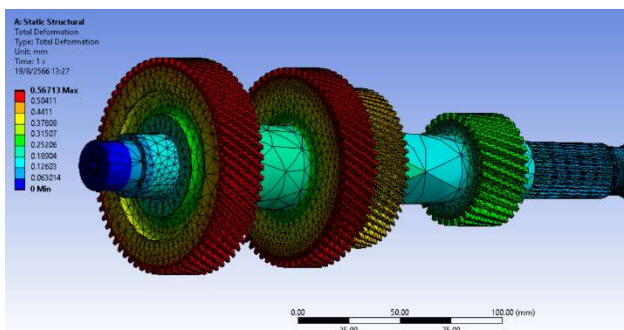
เกินไป รูปที่ 14 เป็นค่า Total deformation max เท่ากับ 0.56713 mm รูปที่ 15 เป็นค่าขีดจำกัดความทนทาน (Endurance limit max) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10^6 รอบ และ รูปที่ 16 เป็นค่า Safety factor max เท่ากับ 15 เท่า [16-18]



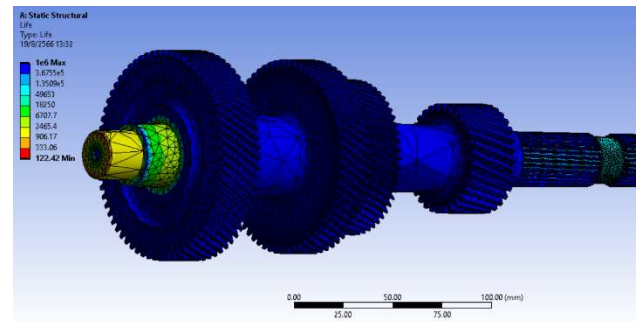
รูปที่ 12 เมช (Mesh) ที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลข



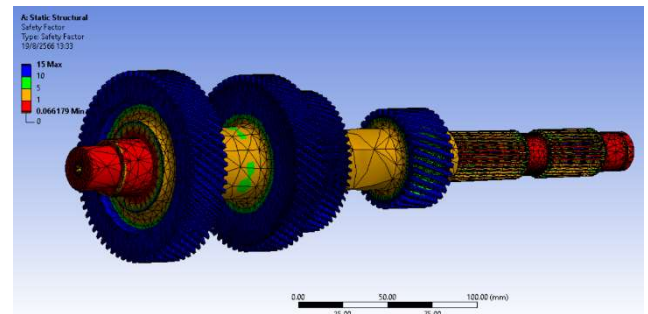
รูปที่ 13 ค่าความเค้นของ Von mises ที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลข



รูปที่ 14 ค่า Total deformation ที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลข



รูปที่ 15 ค่าพิภักความล้า Endurance Limit ที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลข



รูปที่ 16 ค่าความปลอดภัยที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลข

ความเค้นสูงสุดที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐานของ Goodman เท่ากับ 1,283 MPa และค่า Safety factor คือ 5.49 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขของโปรแกรม Ansys Workbench และค่า Yield strength ของวัสดุเท่ากับ 365 MPa [8] จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นจากการคำนวณมีค่ามากกว่า Yield strength 3.5 เท่า ซึ่งส่งผลให้เกิดการแตกหักของเพลานั่นในขั้นตอนสุดท้าย สรุปคือถ้าความเค้นมีค่ามากกว่าค่า Yield strength ที่วัสดุจะรองรับได้ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เพลารองเกิดการแตกหักได้ [16-18]

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ความเสียหายของเพลารอง ซึ่งจากการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. โครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวของเพลารองมีส่วนประกอบของมาร์เทนไซต์ ซึ่งผ่านการเทมเปอร์ และในบริเวณแกนกลางของเพลารองโครงสร้างจุลภาคมีส่วนประกอบ

ของเบนไนต์ ช่วงบนที่ไม่พบความผิดปกติในโครงสร้างจุลภาคของเพลารอง

2. บริเวณรอยแตกของเพลารองมีลักษณะเป็นแบบ Beach marks อย่างชัดเจนมองเห็นการแพร่กระจายของรอยแตกตามแนวขอบเกรน Intergranular fracture และเส้นริ้วจากการล้า Fatigue striations ซึ่งผลลัพธ์เหล่านี้บ่งชี้ว่าโหมมการแตกหักที่ผิวของขอบนอกเพลานั้นเป็นการแตกหักแบบเปราะ
3. รอยแตกจากความล้าได้เริ่มต้นเกิดขึ้นจากบริเวณที่อ่อนแรงทำให้เกิดความเค้นสูงจนทำให้เกิดการแตกร้าวและขยายบริเวณรอยแตกเข้าด้านในจนเกิดการแตกหักในขั้นสุดท้าย
4. ค่าความแข็งของเพลารองที่มีการวัดทั้ง 2 เส้น โดยเส้นที่ 1 วัดค่าความแข็งใกล้กับพื้นที่บริเวณรอยแตก เส้นที่ 2 วัดค่าความแข็งพื้นที่บริเวณเพลานี้ที่ไม่มีการแตกหัก จะสังเกตได้ว่าค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวของเพลานี้ที่ไม่แตกมีค่ามากกว่า บริเวณรอยแตกถึง 160 HV ซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันมาก
5. ความเค้นสูงสุดที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐานของ Goodman เท่ากับ 1,283 MPa และผลจากการจำลองเชิงตัวเลขด้วยแรงบิดสูงสุดได้ค่า Maximum equivalent von Mises stress เท่ากับ 1302.5 MPa ผลลัพธ์มีความแตกต่างกันไม่เกิน 2% ซึ่งทำให้มั่นใจในการใช้งานโปรแกรมว่ามีค่าไม่แตกต่างกันมากเกินไป
6. ความเค้นสูงสุดที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐานของ Goodman มีค่ามากกว่า Yield strength 3.5 เท่า ซึ่งเมื่อความเค้นที่เกิดขึ้นจริงมีค่ามากกว่าค่า Yield strength ที่วัสดุจะรองรับได้ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เพลารองเกิดการแตกหักได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์ในการทดลอง การให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ในระหว่างการทำงานจนส่งผลให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] MISUMI. *เพลาลูกส่งกำลังในเครื่องจักร*. เข้าถึงได้จาก: https://th.misumi-ec.com/th/pr/recommend_category/shaft201906/ [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 26 กรกฎาคม 2566]
- [2] หน่วยที่ 3. *เรื่อง กระบอกเกียร์ขับเคลื่อนล้อหลัง (Gearbox Rear wheel drive)*. เข้าถึงได้จาก: http://www.tatc.ac.th/files/09021213134814_16012510100131.pdf [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 20 มกราคม 2566]
- [3] Santosh DD, Hariom, Chandrababu D, Sunil S, Vijoykumar. Failure analysis of a carbon steel roller shaft of continuous pad steam machine. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2017;9: 118-128.
- [4] Li-Hui Z, Qing-Kun X, Jia-Yu W, Shen-Long L, Song-Lin Z. Failure and root cause analysis of vehicle drive shaft. *Engineering Failure Analysis*. 2019;13: 225-234.
- [5] Carlos MSV, Manuel S, Luís R. Failure analysis of a coupled shaft from a shredder. *Engineering Failure Analysis*. 2019;103: 1-13.
- [6] Sajjad S, Ahmad MP, Mojtaba K. A high-cycle fatigue failure analysis for the turbocharger shaft of BELAZ 75131 mining dump truck. *Engineering Failure Analysis*. 2020;116: 104752.
- [7] Jiang C, Tao K, Wang J, Wang W. Fracture failure analysis of the pump shaft. *E3 S Web of Conferences: 2nd International Conference on Applied Chemistry and Industrial Catalysis*. 2020; 213: 1-6.
- [8] Rodrigo SM, Clarissa C, Noe C, and Adilto PAC. Fatigue failure analysis of a speed reduction shaft. *Metals*. 2021;11: 1-20.
- [9] Chaudhary SK, Rajak AK, Ashish K. Failure analysis of rear axle shaft of a heavy vehicle. *Materials Today: Proceedings*. 2021;38: 2235-2240.
- [10] Qin X, Liu J, Zhao X, Feng L, Pang R. Fracture failure analysis of transmission gear shaft in a

- bidirectional gear pump. *Engineering Failure Analysis*. 2020;118: 104886.
- [11] Lixuan Z, Tao Y, Song X, Guangming L, Xuedong L. Fracture failure analysis of the teeth of conjunction gear made of 20MnCr5S steel. *Engineering Failure Analysis*. 2022;134: 106006.
- [12] *ASTM Handbook Volume 11*. New York: ASM International; 2021.
- [13] Otai Special Steel. 4130 Alloy steel. เข้าถึงได้จาก : <https://www.otasteel.com/wp-content/uploads/2017/03/New-4130-Alloy-Steel-.pdf> [เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน 2566]
- [14] William DC. *Materials Science and Engineering an Introduction*. New York: John Wiley & Sons; 2007.
- [15] Shigley JE. *Mechanical Engineering Design, 9th ed.* McGraw-Hill Book Company, 2008, pp. 733-775.
- [16] Boonmag V, Phukaoluan A, Wisesook O, Pluphrach G. Comparison of bending stress and contact stress of helical gear transmission using finite element method. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2019;8: 99-103.
- [17] Engel B, Sara SHA. Failure analysis and fatigue life estimation of a shaft of a rotary draw bending machine. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*. 2017;11: 1763-1768.
- [18] Goran V, Pastorcic D, Vizentin G. Failure analysis of a crane gear shaft. *25th International Conference on Fracture and Structural Integrity*. 2019;18: 406-412.