
ANALISA KEGAGALAN SWING DRIVE WHEEL EXAVATOR M 322 C DAN USAHA PENCEGAHANNYA

Andika Syofyan, D.N.Adnyana, Isnanda
Program Studi Magister Teknik Mesin- Fakultas Teknik- Institut Sains Dan Teknologi Nasional
Email : teknikindustri@universitaspahlawan.ac.id

Abstract

There has been a breakdown and failure of Swing Drive Wheel Exavator M 322 C is not yet known the exact cause, it is necessary to study scientific and laboratory testing for the event can be clearly known cause, by identifying, inventegasi include systems and procedures for the operation, maintenance, testing laboratory on style and material (macrostruktur, mikrostruktur), based on data analysis of the causes of damage and failure can be revealed.

Visually test shows that the defective object is pinion gear suffered damage types: surface damage (wear / wear and deformation). Furthermore, through testing fraktografi, metallographic, hardness, chemical composition and SEM, then we can determine the factors causing damage to the pinion gear, whether because of metallurgy (material and / or manufacturing), or because of assembly / installation, the factors of operation, or because maintenance factor. The results obtained from these tests can provide recommendations and suggestions were appropriate and safe in the use of materials as well as efforts to prevent damage to the more fatal the following steps - steps appropriate care to anticipate failure event at the Pinion Gear Swing Drive Wheel Exavator M 322 C in particular ,

Main cause of failure (wear and tear) on the pinion gear is the fault of operations conducted by the operator, that there has been a shock loads when the operator operate exavator when conducting swing. Shock loads occur due to collisions between the bucket with rocky ground. The incident repeated - again occur so slewing ring bearing experience rocking. Wear and tear experienced by pinion gear starts from wear adhesive (adhesive wear) followed by abrasive wear (abrasive wear). Changes in the condition of wear and tear will cause phase transformation of the material that rotates and rub against each other, it is this which causes the pinion gear wear out.

Keywords: *Swing drive, pinion gear, surface damage, failure, maintenance*

I. PENDAHULUAN**1.1 Latar Belakang.**

PT. X Cabang Pekanbaru mempunyai standar operasional prosedur dalam mencegah terjadinya kerusakan dan kegagalan komponen-komponen mesin berpedoman pada jam operasional. Kerusakan dan Kegagalan pada Swing Drive wheel exavator dianalisa penyebab terjadinya didukung data material dan pengujian pada komponen tersebut. Studi analisis pada kejadian di atas dapat menjawab peristiwa kerusakan dan kegagalan sehingga tidak ada pihak tertentu yang dirugikan baik dari segi biaya perawatan penggantian suku cadang dan nama baik merek dagang produk tertentu yang biasa digunakan. Analisa kerusakan dilakukan untuk mencari penyebab kerusakan tersebut agar dapat ditentukan langkah – langkah penanggulangan kerusakan yang sejenis.

II. ANALISA DATA DAN HASIL PENELITIAN

Slewing ring bearing mengalami kerusakan (pasangan dari roda gigi planetary gear dan pinion gear yang mengalami kerusakan / keausan (rompal).



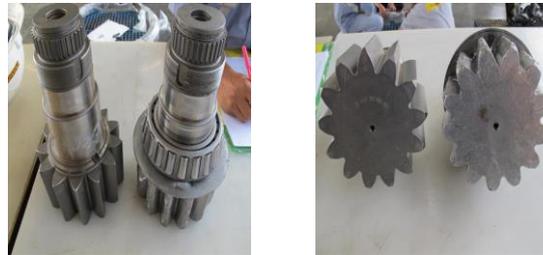
Gambar 4.1. Slewing ring bearing yang mengalami kerusakan / keausan

Berdasarkan analisa kerja dari swing drive telah terjadi beban kejut pada saat pengoperasian exavato melakukan swing. Beban kejut terjadi dikarenakan benturan antara bucket dengan tanah yang berbatu. Kejadian tersebut berulang – ulang sehingga slewing ring bearing mengalami kebalingan seperti terlihat pada gambar 4.1. Gear slewing ring bearing yang mengalami keausan hanya pada posisi sudut putar / swing 75^0 kearah kanan dan sudut putar / swing 150^0 kearah kiri seperti terlihat pada gambar 4.1. Hal ini juga membuktikan bahwa pengoperasian exavator saat melakukan swing dan menggali material dilakukan pada arah sudut putar / swing 75^0 kearah kanan dan sudut putar / swing 150^0 kearah kiri.

4.1. Analisa hasil pemeriksaan visual terhadap bentuk dan dimensi pinion gear

Measuring:

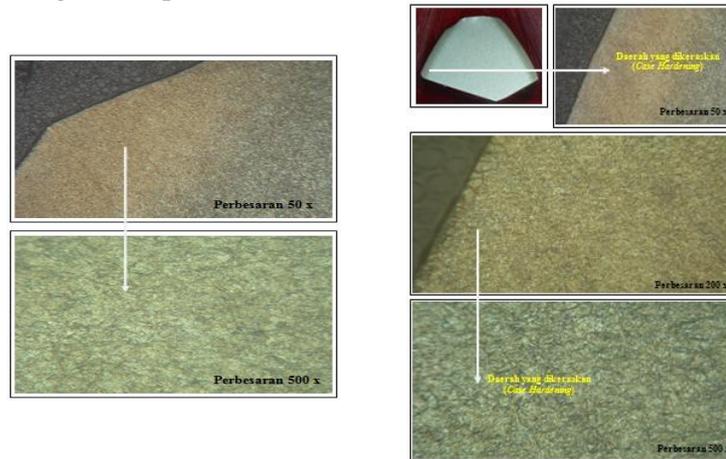
- ✓ Drive Gp Swing (PN 152-7372)
 - Pinion - PN 155-0867



Gambar 4.2. Roda gigi pinion baru dan yang rusak/ failure

Pengujian visual/ makro dilakukan dengan mengamati permukaan / puncak gigi pinion yang mengalami kerusakan / keausan (rompal), dengan hasil sebagai berikut :

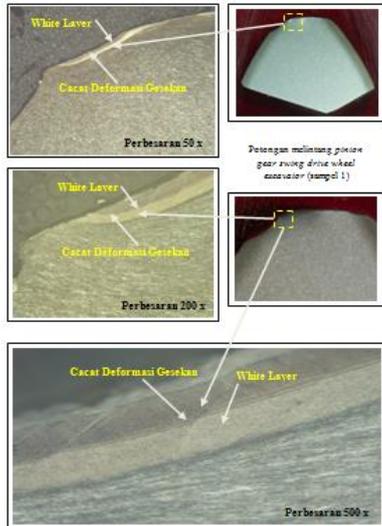
Hasil pengujian makrografi sampel 1



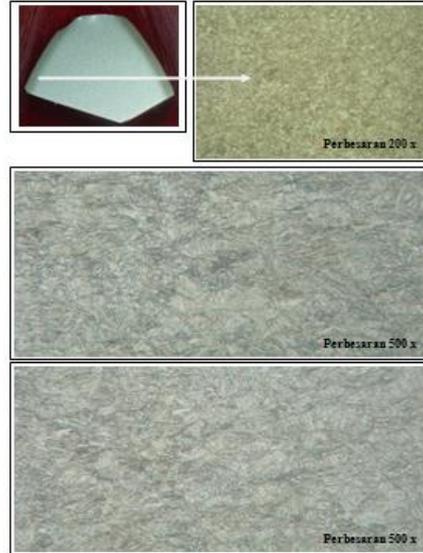
Gambar 4.5. Bentuk struktur mikro daerah cacat deformasi gesekan pada puncak gigi. nilai kekerasan daerah yang mengalami pengerasan berkisar 767 - 795 HV dan daerah tengah 391- 472. Etsa: nital 2%

Berdasarkan hasil pengujian struktur mikro seperti terlihat gambar 4.5. diatas (perbesaran 50, 200 dan 500 x) dengan mengacu pada tabel cairan etsa yang digunakan untuk metalografi pada logam baja dan paduan etsa nital 2 % HNO₃ didalam air atau *ethanol* diidentifikasi pada puncak gigi terjadi

karburisasi, dan bentuk struktur mikro baja karbon dengan nilai kekerasannya berkisar antara 767 – 795 HV, butiran struktur yang nampak adalah *Martensit* halus.



Gambar 4.6. Struktur mikro daerah yang dikeraskan berupa *Martensit* halus. Etsa: nital 3%



Gambar 4.8. Struktur mikro berupa *Martensit* halus dengan butir karbida chrome menyebar merata. Etsa: nital 3%

Pada gambar 4.8. (pembesaran 50, 200 dan 500 x) terlihat bahwa struktur mikro yang terjadi berupa *Martensit* halus dengan butir karbida chrome menyebar merata pada daerah yang dikeraskan. Lapisan permukaan terdapat tegangan sisa yang berupa tegangan tekan (tahan terhadap kelelahan, fatigue limitnya naik) dan secara keseluruhan material tersebut masih ulet⁽¹³⁾.

Peningkatan temperatur (suhu tinggi) pada permukaan baja diperoleh akibat terjadinya gesekan dan benturan antara gear slewing ring, planetary gear dan pinion gear pada saat beroperasi sehingga menimbulkan transformasi fasa. Dari gesekan dan suhu yang tinggi tersebut diperoleh sumber panas utama yang memunculkan *white layer* pada puncak gigi seperti terlihat pada gambar 4.5.

Hasil pengujian makrografi sampel 2

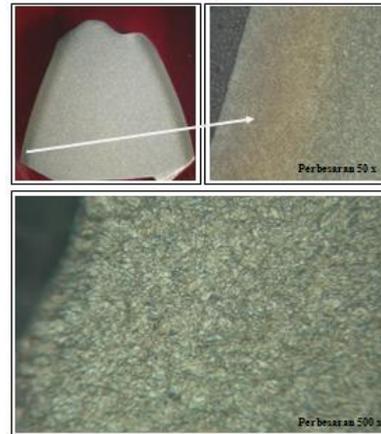


Gambar 4.9. Struktur mikro akibat benturan, terjadi retak mikro dan lipatan pada daerah permukaan puncak roda gigi. Bentuk retakan berupa transgranular yang diawali adanya deformasi struktur. Nilai kekerasan daerah yang mengalami pengerasan berkisar 725 - 810 HV dan daerah tengah berkisar 425-465 HV. Etsa: nital 2%

Berdasarkan hasil pengujian struktur mikro seperti terlihat gambar 4.9. diatas (perbesaran 50 dan 200 x), diidentifikasi pada puncak gigi terjadi benturan dan gesekan yang sangat tinggi sehingga terjadi retak mikro dan lipatan pada daerah yang mengalami pengerasan. Permukaan retakan berbentuk *transgranular* yang ditandai garis slip pada bidang permukaan retakan, yang disebabkan adanya gaya yang datang secara terus menerus (gaya bekerja secara periodik), sehingga retak melalui butiran⁽¹⁶⁾.



Gambar 4.10. Bentuk cacat akibat gesekan dan benturan.



Gambar 4.11. Struktur mikro berupa martensit – austenit (putih) dengan butir karbida chrome menyebar merata.



Gambar 4.12. Struktur mikro berupa martensit – austenit (putih) dengan butir karbida chrome menyebar merata.

Untuk meningkatkan kekerasan baja, diantaranya yaitu perlakuan panas (*heat treatment*) dan deformasi plastis. Struktur mikro baja terbentuk bergantung pada kecepatan pendinginannya dari suhu daerah austenit sampai ke suhu kamar. Karena perubahan struktur dengan sendirinya sifat-sifat mekanik yang dimiliki juga berubah⁽¹⁶⁾.

Karburisasi adalah suatu proses penambahan kandungan unsur karbon pada permukaan baja. Baja yang dikarburisasi adalah baja karbon rendah dengan kandungan karbon kurang dari 2%. Baja dan zat penambah karbon dipanaskan sampai suhu austenit (di atas suhu Ac1). Besi pada suhu sekitar suhu kritis mempunyai afinitas terhadap karbon. Karbon akan menyusup ke dalam rongga rongga besi membentuk larutan padat dengan besi

Dari hasil foto struktur mikro spesimen karburisasi seperti terlihat pada gambar 4.11. dan 4.12. dapat diamati bahwa pada bagian permukaan material pengarbonan tersusun atas fasa martensit dan austenit sisa setelah mengalami proses karburisasi dengan berbagai variasi temperatur. Pada permukaan terdapat fasa martensit yang berwarna gelap. Fasa martensit merupakan fasa yang terbentuk karena pendinginan yang sangat cepat. Didalam matrik martensit terdapat fasa ferit tetapi jumlahnya sedikit, warnanya putih agak kelihatan kusam. Fasa martensit sifatnya sangat keras, faktor inilah yang menyebabkan nilai kekerasan pada permukaan baja menjadi meningkat⁽¹⁵⁾. Dari hasil foto struktur mikro juga dapat dilihat adanya difusi karbon yang berbeda sesuai variasi waktu tahan masing-masing material.

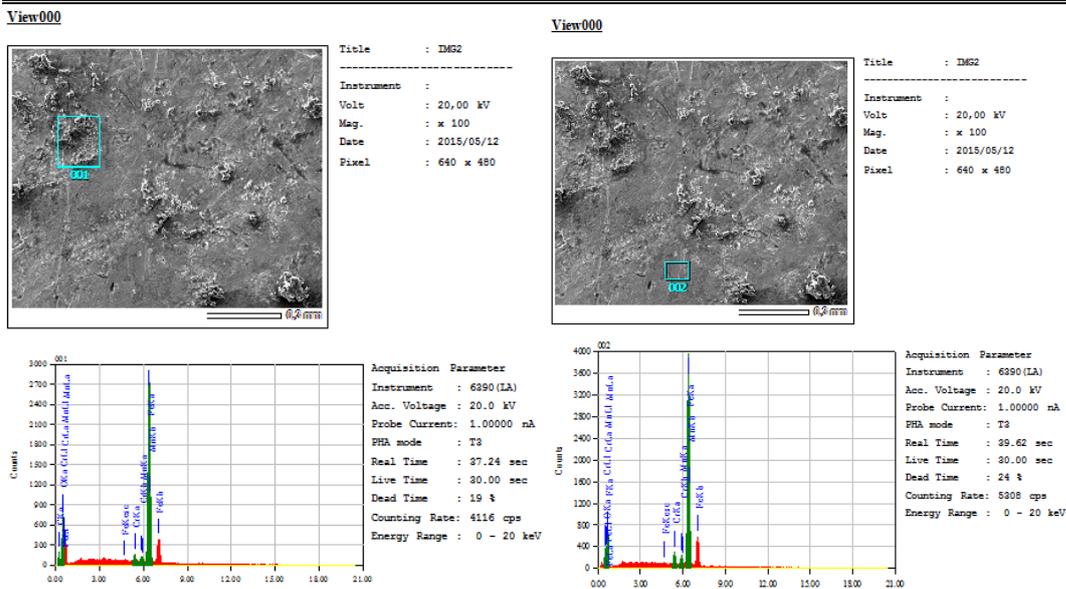
Pembentukan lapisan putih (*white layer*) terbentuk oleh karena hasil dari pemanasan yang sangat tinggi (suhu kisaran austenitik) kemudian disertai oleh deformasi yang kuat (cacat kisi), dan diikuti dengan langsung pendinginan, biasanya untuk suhu kamar. Dalam area lapisan putih ini, bahan ini biasanya dianggap sebagai *martensit nanokristalin*. Pembentukan lapisan putih menghasilkan kekerasan yang sangat tinggi juga (diatas 1000 HV) dan kerapuhan yang sangat tinggi juga (Pacyna et. al., 2005).

Dari hasil pengujian *Makrografi* tersebut dapat disimpulkan bahwa Pinion gear mengalami keausan karena adanya penguraian ketebalan permukaan akibat gesekan yang terjadi pada pembebanan dan gerakan. Keausan umumnya dianalogikan sebagai hilangnya materi sebagai akibat interaksi mekanik dua permukaan yang bergerak *sliding* dan dibebani. Ini merupakan fenomena normal yang terjadi jika dua permukaan saling bergesekan, maka akan ada keausan atau perpindahan materi yang terjadi antara dua benda yang bergesekan⁽¹³⁾.

Keausan yang dialami oleh pinion gear dimulai dari keausan adhesif (*adhesive wear*) kemudian diikuti dengan keausan abrasif (*abrasive wear*)⁽⁶⁾. Keausan adhesif disebabkan oleh terikat atau melekat (*adhesive*) atau berpindahannya partikel dari suatu permukaan material yang lemah ke material yang lebih keras serta deformasi plastis dan pada akhirnya terjadi pelepasan / pengoyakan salah satu material. Proses bermula ketika benda dengan kekerasan yang lebih tinggi menyentuh permukaan yang lemah kemudian terjadi pengikatan⁽⁶⁾. Pengikatan ini terjadi secara spontan dan dapat terjadi dalam suhu yang rendah atau moderat. Salah satu faktor penyebab terjadinya keausan adhesif pada pinion gear adalah tidak bersihnya pelumas / grease dikarenakan bercampurnya komponen logam / chip akibat gesekan dan benturan yang terjadi pada roda gigi sehingga mengakibatkan komponen logam / chip menempel pada pelumas / grease.

Sementara keausan abrasif (*abrasive wear*) terjadi dikarenakan partikel keras (*asperity*) dari puncak gigi pinion, gigi planet serta gigi slewing ring saling bergesekan sehingga terjadi penetrasi atau pemotongan material yang lebih lunak. Tingkat keausan pada mekanisme ini ditentukan oleh derajat kebebasan (*degree of freedom*). Jenis keausan yang dialami oleh pinion gear termasuk dalam katagori keausan *three body abrasion* yaitu keausan yang disebabkan proses *galling* sehingga serpihan hasil gesekan yang terbentuk (*debris*) mengeras serta ikut berperan dalam hilangnya material karena proses gesekan yang terjadi secara berulang-ulang⁽⁶⁾. Permukaan pinion gear mengalami keausan (*wear*) karena terbentuk goresan / crack abrasi, keausan terjadi pada arah gerakan pinion pada saat pinion gear bekerja / berputar.

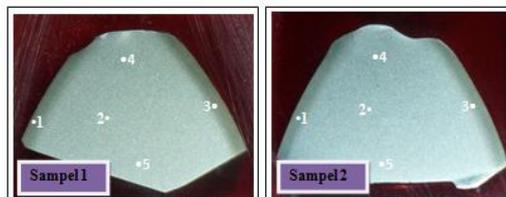
4.2. Hasil pengujian SEM (*scanning electron microscopy*)



Dari hasil pengujian dan analisa SEM dapat disimpulkan bahwa tidak ada kontribusi terhadap terjadinya unsur korosi pada pinion gear, hal ini dapat dilihat pada kandungan unsur kimia yang terdapat pada hasil pengujian SEM tersebut.

4.3. Hasil pengujian kekerasan (hardness test)

Objek : Pinion Gear
 Swing Drive
 Wheel Excavator
 Bahan : Steel
 Mesin Uji : Frank Finotest
 Standar Uji : SNI 19-0405
 1989
 Permukaan : Etching
 Metode Uji : Vickers (HV)
 $P = 5 \text{ kgf}$
 $\alpha = 136^{\circ}$



Gambar 4.13. Sampel pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan bahan sampel 1 dan 2 masing – masing penampang pada 5 (lima) titik pengujian dilakukan dengan metode Micro Vickers dengan beban $P = 5 \text{ Kgf}$, dan didapat hasil sebagai berikut :

Tabel 9. Hasil uji kekerasan

No	Nilai Kekerasan HV	
	Pinion Gear Swing Drive Wheel Exavator	
	Sampel 1	Sampel 2
1	767	725
2	412	441
3	795	810
4	472	465
5	391	429

Rata – rata kekerasan pada permukaan puncak gigi pinion (kulit luar) dan isi (dalam) yaitu :

Untuk Sampel 1

- Posisi pengujian 1 dan 3 $(767 + 795) = 1562/2 = 781$ HV (*Case Hardening*)
- Posisi pengujian 2,4 dan 5 $(412 + 472 + 391) = 1275/3 = 425$ HV

Untuk Sampel 2

- Posisi pengujian 1 dan 3 $(725 + 810) = 1535/2 = 767,5$ HV (*Case Hardening*)
- Posisi pengujian 2,4 dan 5 $(441 + 465 + 429) = 1335/3 = 445$ HV

Nilai kekerasan bahan pada sampel 1 disisi area penerima beban pada puncak gigi (yang mengalami keausan) adalah dengan rata – rata 781 HV, sementara disisi yang tidak menerima beban dengan rata – rata 425 HV

Nilai kekerasan bahan pada sampel 2 disisi area penerima beban pada puncak gigi (yang mengalami keausan) adalah dengan rata – rata 767,5 HV, sementara disisi yang tidak menerima beban dengan rata – rata 445 HV.

Dari hasil analisis distribusi kekerasan bahan pada masing – masing titik dapat dijelaskan bahwa nilai kekerasan bahan pinion gear pada sampel 1 dan 2 didaerah yang menerima beban (puncak gigi) berkisar 767,5 - 781 HV dengan rata – rata 774,25 HV, setara dengan (62,8 HRC)⁽³⁾.

Dari literatur diketahui bahwa standard kekerasan Baja Paduan Rendah (*Low Alloy Steel*) termasuk dalam kelas Case Hardening Alloy Steel Bar 6587 dengan kekerasan permukaan 62 HRC, dengan demikian nilai kekerasan bahan pinion gear memenuhi standar kekerasan yaitu 770 HV (mendekati rata – rata kekerasan 774,25 HV) (equivalent dengan 62,8 HRC)⁽³⁾. Baja AISI 6587 telah melalui proses Heat Treatment (*Carburizing, Hardening dan Tempering*) untuk memperoleh kekerasan permukaan (*Case Hardening*) yang tinggi untuk aplikasi penggunaan pada roda gigi dalam kondisi beban / tekanan yang tinggi dan tahan terhadap gesekan / keausan⁽²⁾. Jadi dapat disimpulkan bahwa kekerasan pada pinion gear baik karena pengaruh panas maupun deformasi menunjukkan bahwa tidak terjadi perubahan sifat mekanik bahan selama pemakaian. Dengan demikian nilai kekerasan bahan pinion gear memenuhi standard kekerasan baja AISI 6587.

4.4. Hasil pengujian komposisi kimia (*chemical composition*)

- Objek : Pinion Gear
Swing Drive
Wheel Exavator
- Bahan : Steel
- Mesin Uji : Arc-Spark
Spektrometer
- Standar Uji : ASTM A 751

Tabel 10. Hasil Pengujian Komposisi Kimia.

No.	Unsur	Kandungan unsur (% berat)
1	Fe	96.6
2	C	0.166
3	Si	0.243
4	Mn	1.17
5	Cr	1.62
6	Ni	0.155
7	Mo	0.0581
8	Cu	0.169
9	Al	0.0235
10	V	0.0043
11	W	< 0.0250
12	Ti	0.0017
13	Nb	0.0197
14	B	< 0.0010
15	S	0.0329
16	P	0.0316
17	Pb	0.0253
18	Co	0.0114

Dengan komposisi kimia seperti tabel diatas diketahui bahwa pinion gear terbuat dari Baja Paduan Rendah (*Low Alloy Steel*), termasuk dalam kelompok Baja AISI 6587 (*Case Hardening Alloy Steel Bar 6587*)⁽²⁾. Hal ini sesuai dengan hasil pada uji metalografi.

4.8. Analisis penyebab dan mekanisme kegagalan

Dari hasil pengujian visual bentuk dan dimensi, pengujian metalografi, pengujian kekerasan, pengujian komposisi kimia bahan, SEM pada pinion gear, serta analisis tegangan dan kerja yang terjadi pada slewing ring bearing, dapat dirumuskan hal sebagai berikut :

Penyebab utama terjadinya kegagalan (keausan) pada pinion gear adalah karena kesalahan operasi yang dilakukan oleh operator, yaitu telah terjadi beban kejut pada saat operator mengoperasikan exavator pada waktu melakukan swing. Beban kejut terjadi dikarenakan benturan antara bucket dengan tanah yang berbatu. Kejadian tersebut berulang – ulang terjadi sehingga slewing ring bearing mengalami kebalangan.

Balingnya slewing ring bearing menyebabkan pada saat melakukan swing terjadi gesekan dan benturan yang sangat tinggi yang menimbulkan hot spot yang sangat tinggi pada komponen pinion gear dan planetary gear. Hasil gesekan dan benturan yang terjadi antara komponen logam tersebut berupa kotoran / chip yang menempel pada pelumas / grease sehingga menyebabkan terjadinya *knocking*. Pada saat operator melakukan swing dalam kondisi slewing ring bearing baling akan menyebabkan gear pada slewing ring akan bergesekan dan berbenturan dengan planetary gear pada posisi dimana diameter slewing ring bearing cekung (kedalam), sehingga bagian yang bergesekan dan berbenturan hanya pada posisi yang sama (posisi sudut putar / swing 75⁰ kearah kanan dan sudut putar / swing 150⁰ kearah kiri), sementara pada arah sudut putar / swing 75⁰ kearah kiri serta sudut putar / swing 150⁰ kearah kanan tidak mengalami gesekan dan benturan.

Keausan yang dialami oleh pinion gear dimulai dari keausan adhesive (*adhesive wear*) kemudian diikuti dengan keausan abrasif (*abrasive wear*). Terjadinya perubahan kondisi keausan ini akan menimbulkan transformasi fasa terhadap material yang saling berputar dan bergesekan, hal inilah yang menyebabkan pinion gear mengalami keausan.

4.9. Penanggulangan dan usaha pencegahan pinion gear mengalami keausan

1. Alat / mesin harus dioperasikan oleh operator yang memiliki keahlian serta keterampilan yang baik sesuai dengan peralatan yang dioperasikannya ditandai dengan memiliki SIO (Surat Izin Operator) dari DEPNAKERTRANS RI.
2. Mengendalikan lingkungan kerja seperti: temperatur kerja, tekanan / tegangan kerja, kontaminan / pengotor, konsentrasi lingkungan korosif, dll.
3. Untuk mengurangi keausan adhesive, operator maupun mekanik harus memperhatikan metode pelumasan yang baik, penggunaan pelumas / grease dan senantiasa melakukan pengecekan / pemeriksaan terhadap kondisi pelumas pada saat mesin beroperasi.
4. Untuk mengurangi keausan abrasive, kekerasan permukaan harus lebih tinggi dibandingkan dengan partikel – partikel abrasif.
5. Perawatan berkala dilakukan seminggu sekali untuk memeriksa kondisi semua komponen-komponen.
6. Inspeksi secara terus-menerus efisiensi output mesin. Penurunan efisiensi output dapat merupakan indikasi akan terjadinya kerusakan / kegagalan.
7. Melakukan *assembly* (perakitan / pemasangan) yang benar sesuai petunjuk pada manual book.

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan dan analisis data yang telah dilakukan diatas dapat dijelaskan bahwa :

1. Berdasarkan hasil pengukuran terhadap pinion gear yang baru dan yang mengalami kerusakan / *failure* serta dari part number pinion gear tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa pinion gear merupakan komponen asli pabrikan
2. Dari hasil pengujian *Makrografi* dapat disimpulkan bahwa pinion gear mengalami keausan karena adanya penguraian ketebalan permukaan akibat gesekan yang terjadi pada pembebanan dan gerakan.
3. Keausan yang dialami oleh pinion gear dimulai dari keausan adhesive (*adhesive wear*) kemudian diikuti dengan keausan abrasif (*abrasive wear*). Terjadinya perubahan kondisi keausan ini akan menimbulkan transformasi fasa terhadap material yang saling berputar dan bergesekan.
4. Dari hasil pengujian dan analisa SEM dapat disimpulkan bahwa tidak ada kontribusi terhadap terjadinya unsur korosi pada pinion gear.
5. Dari hasil analisis distribusi kekerasan bahan pada masing – masing titik dapat dijelaskan bahwa nilai kekerasan bahan pinion gear pada sampel 1 dan 2 didaerah yang menerima beban (puncak gigi) berkisar 767,5 - 781 HV dengan rata – rata 774,25 HV, setara dengan (62,8 HRC). Dari literatur diketahui bahwa standard kekerasan baja paduan rendah (*low alloy steel*) termasuk dalam kelas *case hardening alloy steel bar 6587* dengan kekerasan permukaan 62 HRC, dengan demikian nilai kekerasan bahan pinion gear memenuhi standar kekerasan yaitu 770 HV (mendekati rata – rata kekerasan 774,25 HV) (equivalent dengan 62,8 HRC). Baja AISI 6587 telah melalui proses *heat treatment (Carburizing, Hardening dan Tempering)* untuk memperoleh kekerasan permukaan (*Case Hardening*) yang tinggi untuk aplikasi penggunaan pada roda gigi dalam kondisi beban / tekanan yang tinggi dan tahan terhadap gesekan / keausan.
6. Dari hasil pengujian komposisi kimia diketahui bahwa pinion gear terbuat dari baja paduan rendah (*low alloy steel*), termasuk dalam kelompok Baja AISI 6587 (*case hardening alloy steel bar 6587*), baik karena pengaruh panas maupun deformasi menunjukkan bahwa tidak terjadi perubahan sifat mekanik bahan selama pemakaian.

Jadi kesimpulan yang didapat dari hasil pengujian yang dilakukan adalah untuk mengkonfirmasi serta menjawab penyebab terjadinya kegagalan dari pinion gear swing drive wheel excavator M 322 C yaitu : Penyebab utama terjadinya kegagalan (keausan) pada pinion gear adalah karena kesalahan operasi yang dilakukan oleh operator, yaitu telah terjadi beban kejut pada saat operator mengoperasikan excavator pada waktu melakukan swing. Beban kejut terjadi dikarenakan benturan antara bucket dengan tanah yang berbatu. Kejadian tersebut berulang – ulang terjadi sehingga slewing ring bearing mengalami kebalingan.

Keausan yang dialami oleh pinion gear dimulai dari keausan adhesive (*adhesive wear*) kemudian diikuti dengan keausan abrasif (*abrasive wear*). Terjadinya perubahan kondisi keausan ini akan menimbulkan transformasi fasa terhadap material yang saling berputar dan bergesekan, hal inilah yang menyebabkan pinion gear mengalami keausan.



DAFTAR PUSTAKA

- American National Standar, “*Gear Materials and Heat Treatment Manual*”, AGMA 2004 – B89, Revision of AGMA 240.01.
- Atlas Specialty Metals, “*Case Hardening Alloy Steel Bar 6587*” Revised April 2006.
- Atlas Specialty Metals, “*Technical Handbook of Bar Product*” copyright @Atlas Specialty Metals, Revised Januari 2005.
- ASM Metal Handbook Volume 11, “*Failure Analysis and Preventive*”.
- ASM Metal Handbook Volume 18, “*Friction, Lubrication, and Wear Technology*”.
- Ahmad Zainuri, ST, M.Eng., *Diktat Elemen Mesin III*, Teknik Mesin Universitas Mataram, 2011.
- Caterpillar, *Operation and Maintenance Prosedur*, Caterpillar Inc.
- Caterpillar, *Buku Petunjuk Pengoperasian dan perawatan Motor penggerak*, Caterpillar Inc. 1992
- Caterpillar, *Buku pengoperasian dan Perawatan*, Caterpillar Inc. April 1992.
- Caterpillar, Service training, *Basic Hydroulic System*, Juni 2004
- Caterpillar Performance Handbook, Edition 29
- G. Blake, M. Margetts and W. Silver Thorne, *Gear Failure Analysis Involving Grinding Burn*.
- Heru Danarbroto, *Analisa Patah Lelah pada Roda Gigi*, Fakultas Teknik Universitas Pandanaran.
- Imam Syafa’at, *Permodelan keausan Steady State*, Universitas Diponegoro Semarang, 2010.
- Ir. Teguh Raharjo, MT., *Diktat Analisa Kegagalan Material*, Institut Teknologi Nasional Malang, 2010.
- Ilham Hatta, *Aplikasi Mikro Analisis dan Fraktografi untuk menentukan Kualitas Produk dan Penyebab Kerusakan Suatu Komponen*, Prosiding Pertemuan Ilmiah Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bahan, Serpong, 2012