

ANALISA KEGAGALAN RODA GIGI MATAHARI SWING DRIVE PADA EXCAVATOR CATERPILLAR 349 D

Achmad Kusairi Samlawi dan Muhammad Zaini

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat

E-mail: kusairisam@ulm.ac.id

ABSTRACT

The study focused on analyzing the failure of the sun gear section of the swing drive excavator, where there has been a failure in operation. The gears are predominantly damaged in certain areas while other areas appear to have minimal failure. To answer the cause of failure of the gear, 3 stages of testing are carried out, namely; macro observation, chemical composition test and hardness test and loading simulation. The results of this test are that failure occurs due to case crushing caused by residual stresses under the surface of the gears, the detached surface and pinnion conditions exposed to the soft parts become more vulnerable so that scoring occurs causing macrowelding.

Keywords: failure analysis, sun gear, stress

1. PENDAHULUAN

Analisa kegagalan metalurgi merupakan salah satu metode pengidentifikasian terhadap gagal suatu sistem atau sistim permesinan ataupun unit dari mesin dengan pendekatan metalurgial material gagal. Pendekatan yang dilakukan umumnya mengarah pada bagian gagal tertentu (pada patahan atau gagal lainnya) dan menelisik kegagalan mulai dari potensi gagal perancangan, potensi gagal manufaktur, potensi gagal operasi hingga potensi gagal perawatan.

Kegagalan metalurgi umumnya terjadi pada material logam yang mengalami pembebanan secara kontinu ataupun kejut. Pembebanan menyebabkan kontraksi antar material/bagian mesin sehingga mengubah bentuk logam elastis ataupun permanen. Oleh karena itu kegagalan merupakan fenomena yang disebabkan oleh kontraksi akibat pembebanan yang tidak dapat di tahan oleh material logam (properties). Apabila kegagalan dibiarkan maka berpotensi menyebabkan gangguan pada kinerja unit mesin.

Penelitian difokuskan pada analisa kegagalan bagian roda gigi matahari swing drive excavator, dimana telah terjadi kegagalan dalam operasional. Roda gigi mengalami kerusakan dominan pada areal tertentu sedangkan areal lainnya terlihat memiliki kegagalan minimal. Penelitian akan berfokus untuk menyimpulkan penyebab

kegagalan, sehingga dapat menjadi bahan pertimbangan pengembangan pada produk maupun praktisi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Analisa Kegagalan Roda Gigi

Ketika roda gigi mendapatkan perlakuan yang baik dalam perancangan, manufaktur, penggunaan, instalasi, pengoperasian dan mendapatkan pengolitan yang baik serta tidak mengalami pembebanan berlebih, maka roda gigi akan mengalami adaptasi terhadap operasi yang disebabkan oleh kombinasi putaran dan gesekan dari roda gigi. Kombinasi tersebut menghaluskan ketidaksempurnaan manufaktur dan menghasilkan areal kerja roda gigi tanda kehalusan (*polish*), sehingga roda gigi hanya akan menghasilkan sedikit tanda keausan atau bahkan tidak sama sekali.

Analisa kegagalan roda merupakan sebuah proses yang kompleks. Proses dilakukan melalui pemetaan petunjuk petunjuk yang paling mungkin dari penyebab kegagalan seperti inspeksi visual, analisis metalurgi, mekanisme tribological, analisis sistem dinamik, review rancangan dari casing, bearing, poros dan seal, dan akhirnya analisis mendetail dari roda gigi itu sendiri. Subjek pendekatan analisa roda gigi yang dapat digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

1. Pertimbangan Awal

Langkah awal dalam analisa kegagalan roda gigi adalah pemeriksaan visual bagian yang mengalami malfungsi. Bagian bagian seperti roda gigi, poros, *bearing*, *casing*, sistem pelumas dan *seal* haruslah mendapat perhatian lebih. Data mengenai pembebanan pada saat operasional alat akan sangat membantu untuk membedakan jenis jenis kegagalan (Bloch, 1999).

2. Analisa Pengevaluasian dari Kemampuan Roda Gigi Secara Teoritis

Salah satu langkah penting dalam penganalisaan kegagalan adalah mengetahui kemampuan roda gigi secara teoritis. Pada beberapa kasus, data tersebut dapat membantu menentukan jenis kegagalan dan tingkat kerusakan yang telah terjadi dan sangat sering menjadi petunjuk awal dari kegagalan (Bloch, 1999).

Tabel 1. Keadaan gagal roda gigi dan sebab

		Fracture/Seperation					Wear			Deformation			
		Tooth		Flank									
Failure Cause		Fracture (Breakage) -	Fracture (Breakage) -	Cracking	Initial Pitting	Destructive Pitting	Spalling	Wear	Scuffing	Scoring	Corrosion	Plastic Flow	Warm Flow
Operating Condition Manufacture and Design	Manufacturing Problem												
	Overload through misalignment												
	Frequent load cycles												
	Fatigue design												
	Operating Condition (speed, loading)												
Lubrication	Viscosity												
	Quality												
	Quantity												
	Contamination												

3. Evaluasi Metalurgi

Salah satu aspek paling penting dalam investigasi kegagalan adalah analisis sifat metalurgi pada roda gigi. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan kemampuan sifat fisik dalam menjalankan pengoperasian.

Terdapat beberapa potensi cacat yang hanya dapat terjadi akibat kegagalan pada metalurgi spesimen. Cacat yang dimaksud adalah seperti ukuran bulir yang terlalu besar, inklusi non magnetik, pelapisan, retak dan lipatan (*fold*s), karbit yang tidak melebur, kelebihan sisa austenit, perubahan produk yang tidak sempurna, ikatan bulir (*grain boundary network*), dekarburisasi yang berlebihan, berlapis dan tidak meratanya transisi dari permukaan ke inti dan kelebihan lapisan putih (*nitriding*), tergantung dari jenis proses pekerjaan panas. Sangat disayangkan pekerjaan dingin dan finishing biasanya dilakukan secara lebih perhatian ketimbang pekerjaan panas (Bloch, 1999)

4. Desain Mekanikal

Produksi roda gigi sangat penting untuk memperhatikan derajat yang stabil untuk menghindari misalignment. Pada beberapa kasus, kegagalan disebabkan oleh kesalahan manufaktur ataupun cacat akibat pembebanan pada poros, *bearing* ataupun casing. Pada beberapa kasus, bukti visual mungkin dapat ditemukan dalam bentuk *polishig*, ataupun ketiadaan areal tersebut, pada permukaan kontak roda gigi, yang mana mengindikasikan error pada alignment (Bloch, 1999).

5. Pelumasan

Fungsi utama pelumas adalah untuk meminimalkan gesekan pada gigi roda gigi dan menjaga temperatur operasi. Ketika pelumas memiliki kekentalan yang baik dan bersih, maka akan meminimalkan keausan pada roda gigi. Kedua faktor tadi juga lah yang menentukan kualitas pelumas (Bloch, 1999)..

6. Cacat Akibat Komponen Lain

Roda gigi biasanya berdiri atas bagian lengkap *powertrain* termasuk penghubung komponen utama oleh poros dan kopling. Sistem semacam ini biasanya memiliki banyak daerah potensi masalah dari kecepatan kritis dan nodal point (Bloch, 1999)

7. Aus

Keausan pada roda gigi biasanya terjadi pada daerah lelah kontak operasi. Jenis keausan dapat ditentukan dengan mengevaluasi poin berikut :

- a. Tampak visual
- b. Ketebalan film pelumas
- c. Partikel yang terdapat pada pelumas
- d. Kekerasan permukaan roda gigi

e. Profil beban operasi

f. Lingkungan

Jenis tersebut akan dapat menentukan keausan roda gigi, yaitu :

a. Keausan normal (*Normal Wear*)

- *Polishing*
- *Moderate Wear*
- *Excessive Wear*

b. Keausan Abrasive (*Abrasive Wear*)

c. Keausan Korosif (*Corrosive Wear*)

Roda Gigi Planit (*Planetary Gear*)

Roda gigi planit terdiri atas perangkat roda gigi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, yaitu roda gigi matahari, roda gigi planit, roda gigi *ring* dan *carrier*. Roda gigi matahari dikelilingi oleh satu atau lebih roda gigi planit yang mana terpasang di dalam roda gigi *ring*. Roda gigi planit kemudian ditopang oleh *carrier*. Roda gigi planetary berguna karena dapat memberikan daya lebih dalam satu jalur pengaturan gigi inline rasio tinggi. Salah satu cara kerja roda gigi planetary adalah gerakkan roda gigi matahari, cincin roda gigi ditahan, dan lepas *carrier* berlawanan arah dari set roda gigi . Berikut ini adalah hubungan paling umum untuk menghitung kecepatan dengan set *gear planetary*:

$$n_c(1 + N_s/N_r) - n_s(N_s/N_r) = n_r \quad 1$$

Ket :

n_c = rpm *carrier*

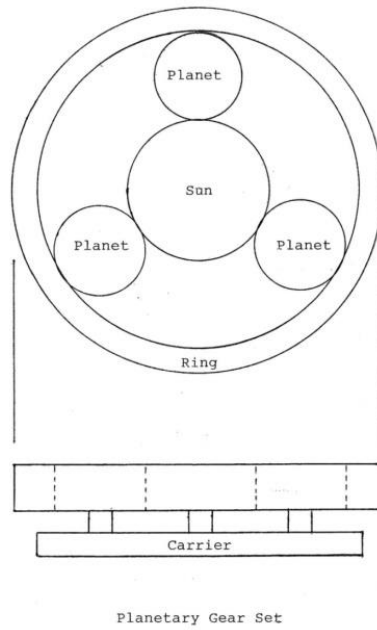
N_s = jumlah gigi roda gigi matahari

N_r = jumlah gigi roda gigi *ring*

n_s = rpm roda gigi matahari

n_r = rpm roda gigi *ring*

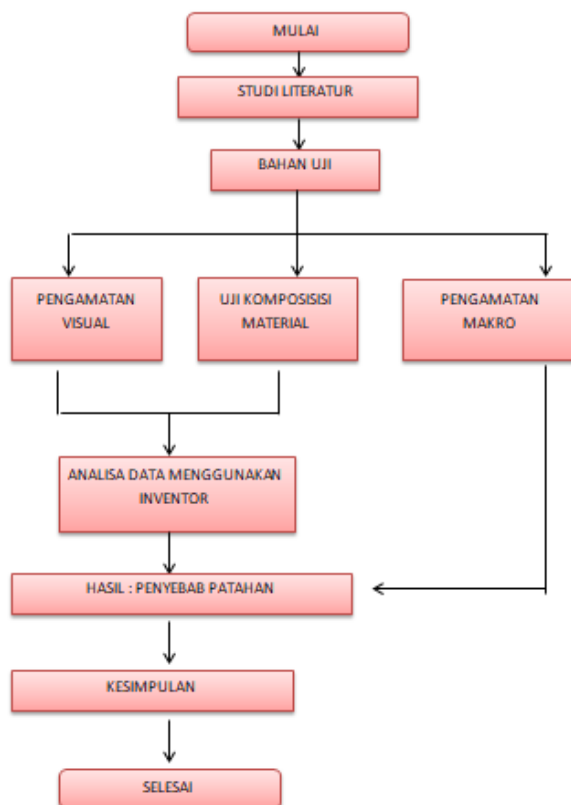
Set *gear planetary* pada Gambar 1 dapat menghasilkan pengurangan kecepatan 3/1 saat menggerakkan roda gigi matahari dan melepas *carrier*. Dapat ditunjukkan dengan menggunakan hubungan ini, bahwa ada kemungkinan lain yang dimiliki roda gigi planet dalam memberikan berbagai rasio kecepatan (Tata, 2012).



Gambar 1. Ilustrasi Roda Gigi Planitary

3. METODE PENELITIAN

Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

1. Studi Literatur

Studi literatur adalah pengumpulan data melalui media buku dan jurnal hasil penelitian yang sudah pernah dilakukan. Tahapan ini dilakukan sebagai tahap awal penelitian sebelum pengajuan proposal.

2. Pengumpulan Data

Data penelitian yang diambil berupa material gagal, spesifikasi material dan data pendukung lain.

3. Pengamatan Awal

Pengamatan awal dilakukan dengan mengidentifikasi roda gigi menggunakan mata telanjang dan foto makro digital. Tahapan pengamatan makro adalah sebagai berikut :

- a. Bagian roda gigi yang gagal diambil foto keseluruhan permukaan menggunakan kamera digital.
- b. Menggunakan foto hasil makro digital diperhatikan karakteristik gagal kemudian ditentukan titik sampel dan cacat krusial dari material.

4. Simulasi

5. Simulasi bertujuan untuk memeriksa kesalahan yang mungkin terjadi pada proses desain serta untuk mengetahui sifat tegangan pada roda gigi matahari.

Tahapan simulasi beban adalah sebagai berikut :

- a. Penentuan titik pembebanan.
- b. Simulasi pembebanan.
- c. Simulasi Deformasi dalam keadaan tanpa beban tambahan dan saat operasional.

6. Uji Komposisi Material

Uji komposisi material dilaksanakan di PT.Mohusindo Banjarasin dengan menggunakan ION BRUKER Ultra-Compact Metal Analyzer.

7. Penentuan Sebab Gagal

Setelah data terkumpul selanjutnya ditentukan sebab gagal. Penentuan sebab gagal ditentukan dengan menggunakan petunjuk petunjuk yang sudah terkumpul dan menentukan sebab gagal yang paling mungkin terjadi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Keluaran dari metode penelitian dan pengujian yang dilakukan adalah berupa : pengamatan visual geometri roda gigi, simulasi pembebanan dengan menggunakan software Autodesk Inventor 2015 Student Version, foto makro pada daerah gagal dan hasil analisa komposisi kimia dan kekerasan logam.

Pengamatan Makro

Pengamatan makro dilakukan demi penggalian informasi untuk memperoleh bukti penyebab kegagalan roda gigi berupa foto. Tahapan penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan gambaran besar terjadinya kegagalan pada material logam itu sendiri dan penentuan titik utama observasi yang akan dilakukan selanjutnya. Adapun parameter titik yang dimaksud disini adalah daerah dengan tingkat rusak tertinggi (*major destructive area*) dan titik titik sampel terjadinya area gagal. Pengamatan makro akan difokuskan pada dua metode utama yaitu dengan metode visual untuk geometri roda gigi dan metode fotografi (*photographycal methode*).

1. Titik Kegagalan

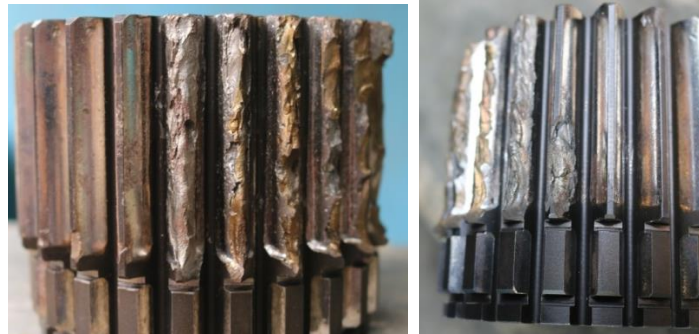


Gambar 3. Titik Kegagalan Dominan

Gambar 3 menunjukkan kondisi daerah roda gigi yang mengalami tingkat kegagalan tertinggi. Kegagalan sebagian besar berupa skoring di sepanjang 13 pinnion roda gigi hingga melewati kedalaman pitch circle.

Kegagalan roda gigi matahari yang terjadi, tidak merata pada keseluruhan pinnion seperti terlihat pada gambar 4, sebagian pinnion mengalami kegagalan yang sudah bersifat destructive dan sebagian lagi hanya berupa polishing, sehingga untuk memudahkan identifikasi daerah pengamatan pada roda gigi dibagi menjadi 2 (dua)

daerah yaitu daerah A dan daerah B. Daerah A merupakan daerah dengan tingkat kerusakan pinnion dominan dan daerah B dengan kerusakan pinnion sedang dan rendah.



(a)

(b)

Gambar 4. Kegagalan Roda Gigi

a. Kegagalan pada $0^\circ - 45^\circ$ b. Kegagalan pada $45^\circ - 90^\circ$

2. *Scoring*

Kegagalan yang paling mencolok terjadi pada roda gigi adalah *scoring* di sepanjang 12 gigi roda gigi dan sebagian pada satu buah roda gigi dari total 24 gigi roda gigi. *Scoring* terjadi hingga pada tingkat *macrowelding* pada sebagian permukaan roda gigi. *Scoring* pada roda gigi dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Skoring Gigi Roda Gigi

3. *Pitting*

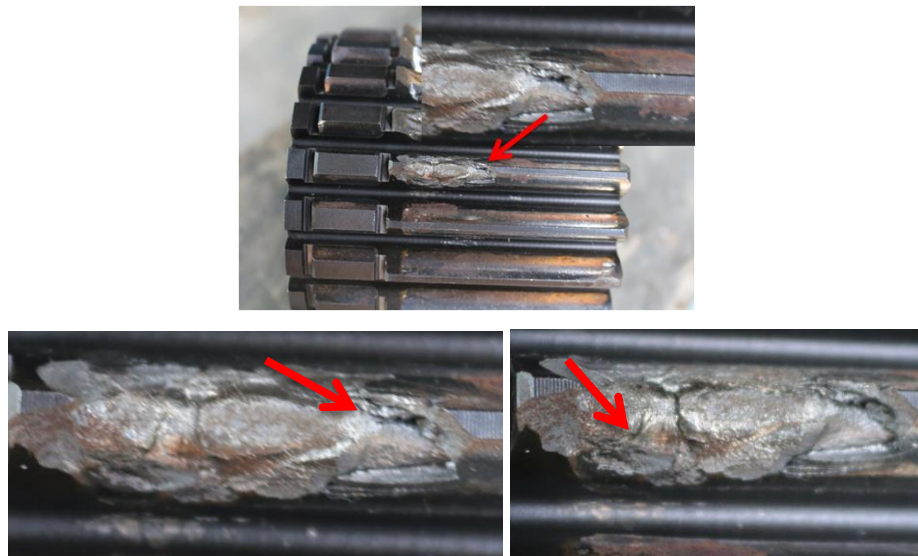


Gambar 6. Pitting

Gambar 6 menunjukkan pitting yang terjadi pada roda gigi. Pitting yang terlihat terjadi pada heel roda gigi pada gigi roda gigi yang tidak mengalami *macrowelding*.

4. *Secondary Crack*

Peningkatan beban disekeliling permukaan pitting pada roda gigi menghasilkan kerusakan lebih lanjut. Kerusakan pada spesimen hanya terjadi pada satu gigi roda gigi pada bagian *toe*. *Secondary crack and pitting* dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. *Secondary Crack*

Analisa Komposisi Logam

Pengujian roda gigi matahari dilaksanakan di PT.Mohushindo, Jalan Ahmad Yani, KM:22, Landasan Ulin Bar., Liang Anggang, Kota Banjar Baru, Kalimantan Selatan, sebagai bagian dari bantuan penelitian dari perusahaan tersebut. Sedangkan alat yang digunakan untuk analisa adalah Q2 ION Ultra-Compact Metal Analyzer BRUNKER, spesifikasi terlampir.

Analisa material difokuskan pada 2 bagian utama roda gigi matahari yaitu permukaan dan bagian dalam (*root gear*), sedangkan pembahasan hanya difokuskan pada material dengan kandungan

1. Analisis Komposisi Permukaan Roda Gigi

Berikut merupakan hasil uji komposisi permukaan roda gigi matahari.

Tabel 2. Hasil uji komposisi permukaan roda gigi matahari

Unsur	Presentase (%)		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata rata
C (%)	0.771	0.782	0.776
Si (%)	0.212	0.198	0.205
Mn (%)	0.885	0.871	0.878
P (%)	<0.100	<0.100	<0.100
Cr (%)	1.086	1.077	1.082
Mo (%)	0.300	0.305	0.302
Ni (%)	0.021	0.021	0.021
Cu (%)	0.016	0.016	0.016
Al (%)	0.020	0.018	0.019
Mg (%)	<0.0050	<0.0050	<0.0050
Co (%)	0.0052	<0.0050	0.0051
Nb (%)	<0.0050	<0.0050	<0.0050
Ti (%)	<0.0030	<0.0030	<0.0030
V (%)	<0.010	<0.010	<0.010
W (%)	<0.100	<0.100	<0.100
Fe (%)	96.46	96.48	96.47

Berdasarkan Tabel 2, maka dapat diketahui bahwa permukaan pada roda gigi matahari tidak hanya mengandung Karbon (C) dan Ferrou (Fe), namun juga memiliki beberapa komposisi kimia lain dalam jumlah yang tidak sedikit dan dapat mempengaruhi sifat mekanik permukaan roda gigi. Kandungan dari Si (sebesar 0.205%), Mn (sebesar 0.878%), Cr (sebesar 1,082%), Mo (sebesar 0,302%), Ni (sebesar 0.021%), dll.

2. Analisis Komposisi Bagian Dalam Roda Gigi

Berikut merupakan hasil uji komposisi bagian dalam roda gigi matahari.

Tabel 3. Hasil uji komposisi bagian dalam roda gigi matahari

Unsur	Presentase (%)		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata rata
C (%)	0.263	0.253	0.258
Si (%)	0.223	0.206	0.215
Mn (%)	0.885	0.859	0.872
P (%)	<0.100	<0.100	<0.100
Cr (%)	1.097	1.092	1.095
Mo (%)	0.322	0.310	0.316
Ni (%)	0.021	0.022	0.021
Cu (%)	0.016	0.016	0.016
Al (%)	0.024	0.021	0.022
Mg (%)	<0.0050	<0.0050	<0.0050
Co (%)	<0.0050	<0.0050	<0.0050
Nb (%)	<0.0050	<0.0050	<0.0050
Ti (%)	<0.0030	<0.0030	<0.0030
V (%)	<0.010	<0.010	<0.010
W (%)	<0.100	<0.100	<0.100
Fe (%)	96.92	96.99	96.95

Berdasarkan Tabel 3, maka dapat diketahui bahwa permukaan pada roda gigi matahari mengandung C (sebesar 0.258%), Fe (sebesar 96.95), Si (sebesar 0.215%), Mn (sebesar 0.872%), Cr (sebesar 1.095%), Mo (sebesar 0.316%) dan Ni (sebesar 0.021%) dll.

Jika dibandingkan kedua tabel, maka diketahui bahwa terdapat perbedaan wt% C pada permukaan dan root gear. Kandungan wt% C pada permukaan sangat tinggi jika dibandingkan dengan bagian root roda gigi matahari, yaitu 0.776% dan 0.258%. Hal ini mengindikasikan adanya proses pengerasan pada permukaan roda gigi, sedangkan pada root roda gigi adalah komposisi kimia awal roda gigi sejak dalam bentuk bahan baku.

Berdasarkan komposisi kimia yang terdapat pada roda gigi, maka diketahui bahwa bahan baku yang digunakan adalah Chromium Steel (Baja Krom) atau secara spesifik, AISI 5125, yang memang umum digunakan pada bagian otomotif yang memiliki

tegangan yang tinggi seperti camshaft dan roda gigi, gear shaft, bushing dan *connecting rod*.

3. Uji Kekerasan

Uji kekerasan dilaksanakan bersama uji komposisi material roda gigi. Berikut merupakan hasil uji kekerasan pada permukaan roda gigi dan pada inti roda gigi (kedalaman ± 1 cm) menggunakan atribut kekerasan brinell.

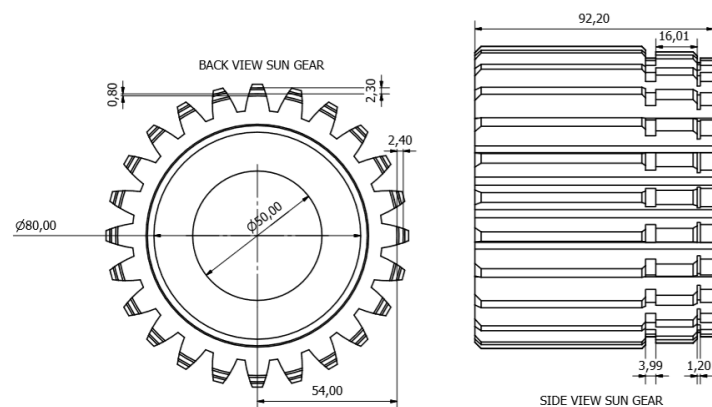
Tabel 4. Hasil kekerasan

Kekerasan (HBN)	Permukaan	Inti
	424	171
424	171	
Rata Rata	424	171

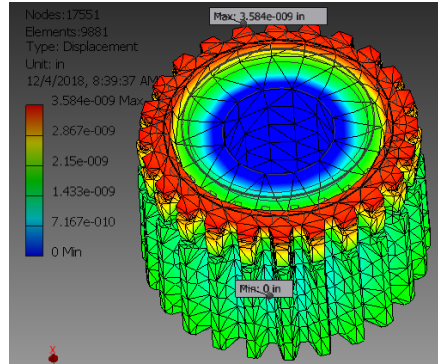
Kekerasan permukaan roda gigi dapat difahami terjadi akibat tingginya kandungan karbon pada permukaan, sehingga dapat disimpulkan roda gigi mengalami perlakuan *carburizing*. Adapun alasan peneliti tidak memasukan *corbunitriding*, adalah akibat tidak adanya perubahan kandungan nitrid pada inti maupun permukaan roda gigi.

Simulasi Kinerja Roda Gigi

Berikut merupakan hasil penggambaran roda gigi matahari menggunakan fungsi Design Accelerator pada aplikasi Autodesk Inventor 2015 Student Version.



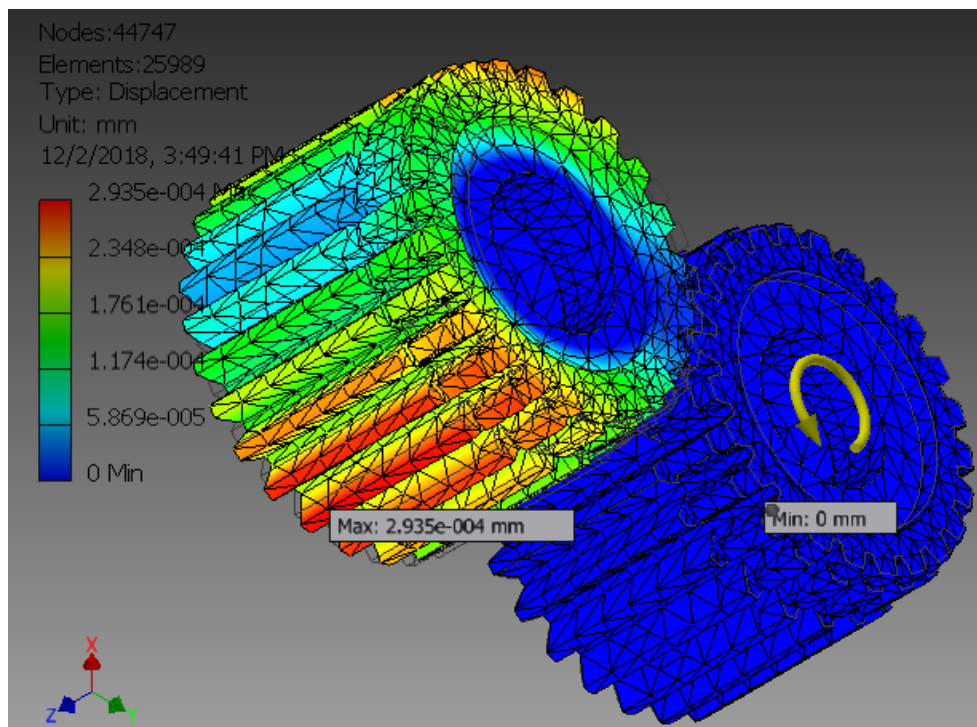
Gambar 8. Sun Gear



Gambar 9. Displacement Tanpa Pembebanan

Gambar 9 menunjukkan keadaan displacement tanpa pembebanan tambahan. Roda gigi diasumsikan berputar pada kecepatan 10000 deg/s atau 166.66 rpm dengan beban roda gigi itu sendiri.

Pada keadaan berputar, ternyata konsentrasi defleksi pada roda gigi utama melainkan terjadi *foot gear*. Pembebanan ini disebabkan oleh ketebalan root roda gigi pada bagian tersebut yang lebih tipis dan keadaan roda gigi yang lebih pendek. Displacement tertinggi terjadi pada seksi roda gigi dengan permukaan terkecil yaitu sebesar $3.584e-9$ in dan displacement sebaliknya terjadi pada lubang inti (*core*) roda gigi, karena bersentuhan langsung dengan poros drive.

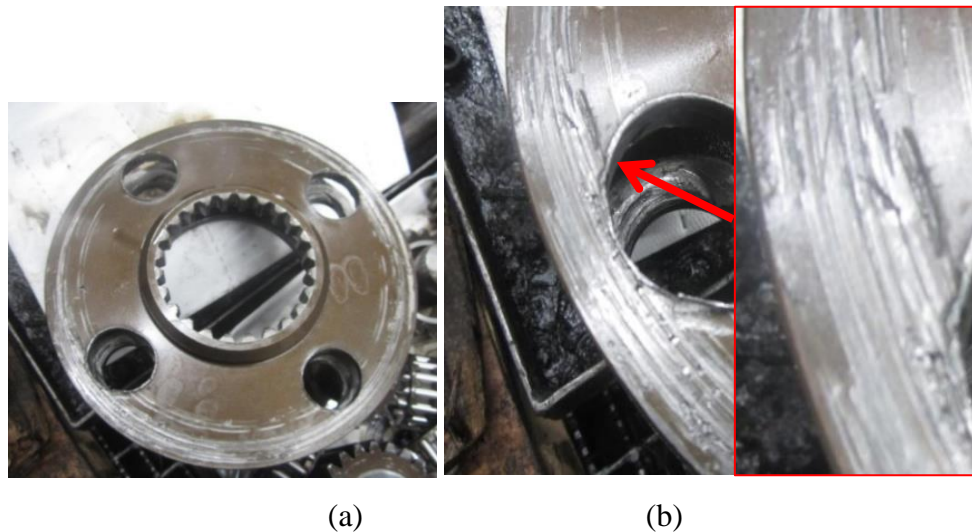


Gambar 10. Displacement Saat Operasi

Sedangkan ketika diperhatikan pada Gambar 10, daerah konsentrasi displacement berubah menjadi lebih merata. Perubahan ini disebabkan oleh geometri roda gigi yang bertemu merupakan bentuk penahan deformasi itu sendiri. Hal ini dapat dilihat dari rendahnya besaran displacement pada roda gigi yang mengalami kontak, dan sebaliknya displacement tertinggi justru terjadi pada areal sisi roda gigi, yaitu sebesar $2.935e-04$ mm sebagai daerah *stress release*.

Gambaran Kerusakan Bagian Lain

Berdasarkan data yang didapatkan dari keadaan lapangan kegagalan swing drive excavator, didapat beberapa petunjuk yang dapat menjadi petunjuk terhadap jenis kerusakan.



Gambar 11. (a) Aus pada Housing Planetary Gear tidak Uniform (b) Keausan Abrasive

Indikasi terjadinya kontak material keras dengan material keras sangat terlihat jelas pada Gambar 11.



Gambar 12. Cleavage Planet Gear & Dimple Rupture Pin

Patahan cleavage dan *dimple rupture* biasanya disebabkan akibat beban kejut pada benda material keras.

Proses Kegagalan

Kegagalan secara terjadi tidak merata pada permukaan roda gigi, sebagian permukaan mengalami *destructive scoring* yang berat hingga *crack* dan *secondary crack*, sedangkan sebagian lagi hanya mengalami pitting dan polishing. Kegagalan ini merupakan indikasi proses kegagalan yang tidak seragam dan terkonsentrasi.

Pengamatan pada patahan gigi ke-13 yang mengalami scoring, namun tidak di seluruh permukaan pinnionnya, menunjukkan terdapat secondary crack ke arah inti roda gigi. Patahan yang menjalar menuju ke bawah permukaan pinnion roda gigi dan mengindikasikan kegagalan case crushing pada pinnion ke-13. Hal tersebut kemudian didukung oleh keadaan scoring pada 12 pinnion yang mengalami macrowelding akibat overheating. Keadaan scoring ini terbilang unik karena hanya terkonsentrasi pada 13 pinnion roda gigi, sedangkan 11 roda gigi lainnya tidak mengalami kegagalan yang sama. Scoring sendiri dapat terjadi akibat kombinasi dari pembebanan operasi, kecepatan, kontaminasi pelumas dengan material asing dan temperatur operasi, sehingga terjadi alternate welding dan pelepasan material yang biasa disebut dengan scoring. Hal ini kemudian menjadi jelas setelah dilaksanakan pengujian komposisi material dan kekerasan pada roda gigi.

Pada pengujian komposisi material didapat hasil material pada roda gigi adalah AISI 5125 dengan perlakuan carbonizing untuk meningkatkan kekerasan permukaan. Sedangkan kekerasan pada permukaan roda gigi terlihat 424 HBN dan inti roda gigi 171 HBN. Perbedaan kekerasan ini lah menjadi sebab ketidakmerataan kegagalan pada permukaan pinnion roda gigi. Pinnion roda gigi yang 13 buah mengalami pelepasan material, sehingga mengekspos bagian roda gigi yang lebih lunak. Bagian roda gigi yang lebih lunak ini kemudian mengalami overheating akibat operasional roda gigi dan material sisa permukaan pinnion yang tercampus dengan pelumas. Akibatnya terjadi scoring pada daerah pinnion yang tidak memiliki permukaan keras lagi.

Terdapat beberapa kerusakan pada bagian lain swing drive. Berdasarkan pengamatan terdapat aus abrasif pada housing dan pin planetary dan breakage pada planetary. Dari sini dapat kita ketahui bahwa telah terjadi beban kejut pada housing dan planetary, sehingga menyebabkan patah dan aus. Sedangkan pada pin beban tersebut begitu besar sehingga beban puntir pin melewati kemampuan pin.

Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa kegagalan awal pinnion terjadi akibat beban kejut yang terjadi pada 13 pinnion roda gigi. Roda gigi matahari mengalami kegagalan dalam 2 fase. Fase pertama adalah terjadinya tegangan Hertzian akibat

tegangan kejut kontak pinion roda gigi sepanjang permukaannya. Daerah kontak yang lebar dan dalam menyebabkan terjadinya tegangan geser (shear stress) maximum yang mengakibatkan terlepasnya permukaan roda gigi secara perlahan, sehingga mengekspos bagian lunak inti pada 13 pinnion roda gigi. Fase kedua kegagalan adalah akibat 13 pinnion roda gigi yang terekspos dan sisa material permukaan pinnion yang tercampur dengan pelumas mengakibatkan terjadinya scoring hingga mencapai alternate welding.

Berdasarkan analisa simulasi geometri dan konsentrasi tegangan tidak terdapat kejanggalan baik dengan beban sendiri ataupun berkaitan dengan roda gigi lain dengan menggunakan beban.

5. KESIMPULAN

1. Kegagalan roda gigi dalam penelitian ini disebabkan oleh terjadinya beban kejut yang menyebabkan rambatan dibawah permukaan pinnion roda gigi kerusakan dominan, akibat adanya tegangan sisa dibawah permukaan.
2. Proses kegagalan roda gigi matahari melalui dua fase kerusakan, yaitu :
 - a. Fase pertama adalah terjadinya tegangan kejut pada tegangan Hertzian akibat kontak pinion roda gigi di sepanjang 13 permukaannya. Daerah kontak yang lebar dan dalam menyebabkan terjadinya tegangan geser (shear stress) maximum di bawah permukaan pinnion. Akibatnya permukaan roda gigi terlepas secara perlahan, sehingga mengekspos bagian inti pinnion yang lunak.
 - b. Fase kedua kegagalan adalah kegagalan adalah akibat 13 pinnion roda gigi yang terekspos dan sisa material permukaan pinnion yang tercampur dengan pelumas mengakibatkan terjadinya scoring hingga mencapai alternate welding.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya disampaikan kepada Yth. Dekan Fakultas Teknik ULM, Kaprodi. Teknik Mesin ULM, PT. Amanah, PT. Mohosindu, Pegawai PT. PLN alumni program Kelas B Prodi. Teknik Mesin ULM, Kalab. Perancangan dan Komputasi Prodi. Teknik Mesin ULM, Kalab. Material dan Fisika Prodi. Teknik Mesin ULM.

DAFTAR PUSTAKA

Bloch, H. P. (1999). *3rd Edition Practical Machinery Management for Process Plants, Machinery Failure Analysis and Troubleshooting Vol. 02*. United State of America: Gulf Publishing Company.

- Bringas, J. E. (2002). *Handbook of Comparative World Steel Standart*. USA: ASTM International Standards Worldwide.
- Broek, D. (1982). *Elementary engineering fracture mechanics*. Netherlands: Springer Netherlands.
- Brooks, C. R., & Choudhury, A. (2002). *Failure Analysis of Engineering Materials*. McGraw Hill Professional, 2002.
- Budynas, R. G. (1999). *Advanced Strength and Applied Stress Analysis, 2nd Edition*. McGraw-Hill Companies, Inc.
- EATON. (2011). *Service Manual ; Understanding Spur Gear Life TRSM0913*. USA: Eaton Cooperation.
- ISO53. (1998). Cylindrical gears for general and heavy engineering - Standard basic rack tooth profile. *ISO 53:1998*.
- Isworo, H. (2012). *ANALISIS KEGAGALAN PADA KOMPONEN GRIPPER BOTOL MINUMAN KAPASITAS 600 BOTOL PER MENIT*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Logan, D. L. (1991). *Mechanics of Materials*. Harpercollins College Div.
- Pavan, A. H., Vikrant, K., Swamy, M., & Jayaraman, G. (2013). Root cause analysis of bowl-mill pinion shaft failures. *Case Studies in Engineering Failure Analysis 1*, Volume 1, Issue 2, hal 103-109.
- Popov, E. (1978). *Mechanics of materials, SI version*. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall.
- R.Dhanasekaran, Kumar, D., & K.Santhi. (2010). Crack Failure of Planetary Gearbox Sun Gear. *International J. of Recent Trends in Engineering and Technology*, Vol. 3, No. 6.
- Rexnord-Industries. (1978). FAILURE ANALYSIS GEARS-SHAFT-BEARINGS-SEALS. *Failure Analysis. Instalation & Maintenance*, 108.
- Robert P. Tata, P. (2012). *Mechanical Power Transmission Fundamentals*. New York: Continuing Education and Development, Inc.
- Sularso, & Suga, K. (2004). *Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Timoshenko, S., & Gere, J. (1985). *Theory of Elastic Stability. 2nd Edition*. New York: McGraw-Hill Book, Inc.