

ANALISIS KEGAGALAN *POWER STEERING GEARBOX HOUSING* PADA MOBIL DIESEL 2500 CC

*Maulana Zaky Cahyadi¹, Sri Nugroho², Rifky Ismail²

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: zakylana9@gmail.com

Abstrak

Power steering gearbox housing merupakan salah satu komponen pada mobil yang berfungsi sebagai media penghubung (*couple*) dan perubah arah gaya antara setir kemudi dengan roda depan mobil, dimana komponen ini mengalami kegagalan berupa *fracture*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui mekanisme kegagalan, karakteristik material, serta mekanisme pembebahan melalui analisis kegagalan yang dilakukan berdasarkan pengamatan visual, pengujian komposisi kimia, pengujian metalografi, pengujian kekerasan, dan simulasi *Finite Element Method (FEM)* menggunakan perangkat lunak SOLIDWORKS 2020. Hasil pengamatan visual menunjukkan bahwa kegagalan yang terjadi mengarah pada fenomena *fatigue fracture*, yang ditandai dengan adanya *crack initiation*, *final crack zone*, serta *ratchet marks*. Pengujian metalografi menunjukkan material memiliki grafit berbentuk nodular dengan matriks ferrit + pearlit yang mengindikasikan bahwa material adalah *nodular cast iron*, uji kekerasan menunjukkan angka 194-221 HV, pengujian komposisi menunjukkan adanya komponen *nodulizer* yaitu Mg dan Ce, dan hasil simulasi FEM menunjukkan bahwa model ini tidak aman dikarenakan tegangan puncak memiliki nilai yang lebih tinggi dibanding dengan *fatigue margin* material.

Kata kunci: analisis kegagalan; *fatigue failure*; *power steering gearbox housing*

Abstract

The power steering gearbox housing is one of the components in a car that functions as a coupling and changes the direction of force between the steering wheel and the front wheels of the car, where this component experienced a fracture failure. This study aims to determine the failure mechanism, material characteristics, and loading mechanism through failure analysis based on visual observation, chemical composition testing, metallographic testing, hardness testing, and Finite Element Method (FEM) simulation using SOLIDWORKS 2020 software. Visual observation results indicate that the failure occurred due to fatigue fracture, characterized by crack initiation, final crack zone, and ratchet marks. Metallographic testing showed that the material had nodular graphite with a ferrite + pearlite matrix, indicating that the material was nodular cast iron. Hardness testing showed a value of 194-221 HV, composition testing showed the presence of nodulizer components, namely Mg and Ce, and FEM simulation results showed that this model was unsafe because the peak stress value was higher than the material's fatigue margin

Keywords: failure analysis; *fatigue failure*; *power steering gearbox housing*

1. Pendahuluan

Analisis kegagalan merupakan metode investigasi yang dilakukan dengan sistematis untuk mengidentifikasi penyebab terjadinya kegagalan dan mekanisme kegagalannya pada suatu komponen, serta memberikan saran rekomendasi yang dapat dilakukan guna mengatasi permasalahan yang muncul [1]. Penerapan *Failure Analysis* semakin luas digunakan untuk memecahkan berbagai permasalahan pada sistem yang beroperasi seiring perkembangan ilmu pengetahuan serta teknologi, sekaligus berperan sebagai langkah *preventive maintenance* guna mencegah terjadinya kegagalan lebih lanjut. Salah satu kasus kegagalan umum yang sering terjadi yaitu adalah kegagalan jenis patah (*fracture failure*).

Gearbox housing adalah komponen struktural utama dalam sistem transmisi kendaraan, yang dirancang untuk melindungi dan menopang komponen internal seperti roda gigi, poros, dan bearing. Fungsi utamanya adalah untuk memberikan perlindungan terhadap kontaminasi eksternal (seperti debu dan cairan), meredam kebisingan dan getaran, serta memastikan pelumasan komponen berjalan optimal [2].

Kegagalan pada *gearbox housing* memiliki penyebab yang dapat dibagi menjadi dua faktor utama, yaitu kegagalan statis dan kegagalan dinamis. Kegagalan statis biasanya terjadi akibat beban berlebih (*overloading*), pengencangan melebihi batas komponen (*over-tightening*), dan penggunaan komponen dengan spesifikasi tidak memenuhi standar.

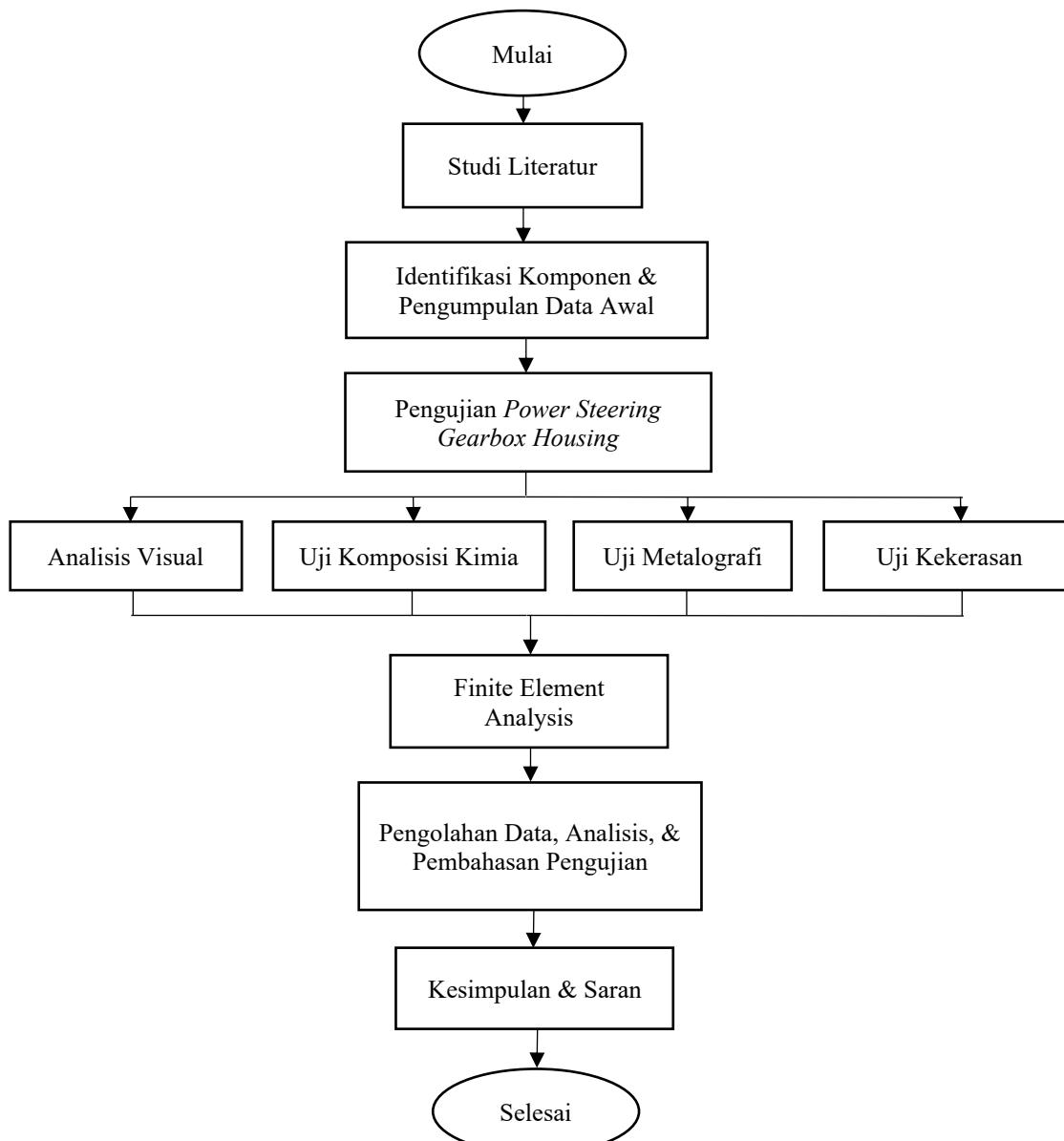
Sementara itu, kegagalan dinamis memiliki hubungan dengan kelelahan material yang terakumulasi selama masa pemakaian. Kondisi ini dapat disebabkan oleh kekencangan komponen penghubung antara *gearbox housing* dan rangka dudukan yang kurang optimal, serta kemungkinan terjadinya pelonggaran selama penggunaan (*self-loosening*). Retakan akan terbentuk dan berkembang karena beban dari luar dan beban siklus (*external and cyclic load*) [3].

Penelitian ini diambil topik mengenai analisa kegagalan *power steering gearbox housing* yang akan diuji penyebab kegagalannya untuk menentukan faktor mekanisme kegagalan, penyebabnya, serta memberikan rekomendasi untuk kasus serupa. Komponen ini berfungsi sebagai cover untuk *gearbox power steering* dan sebagai tumpuan ke rangka pada mobil Isuzu Panther.

2. Bahan dan Metode Pengujian

2.1 Tahapan Penelitian

Tahapan yang dilakukan untuk penelitian yang dilakukan ini akan digambarkan dalam bentuk diagram alir secara berurutan seperti yang dapat terlihat pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.2 Power Steering Gearbox Housing Mobil Diesel 2500 CC

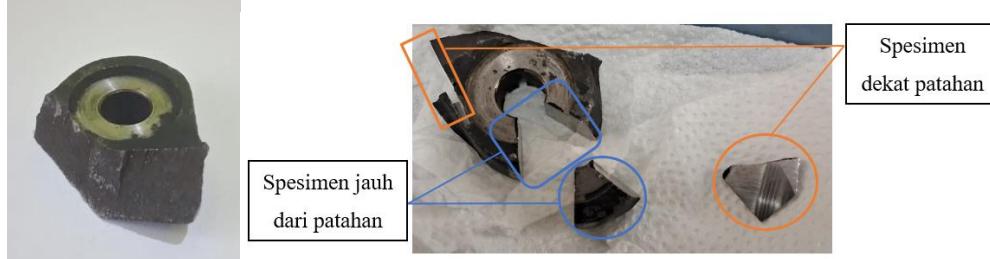
Penelitian ini menggunakan spesimen uji *power steering gearbox housing* dari mobil Isuzu Panther yang mengalami kegagalan. Dari spesimen tersebut diambil 2 sampel uji yaitu bagian dekat dengan patahan dan bagian yang

jauh dari patahan. Kedua sampel uji ini akan dilakukan proses pengujian yang sama. *Power steering gearbox housing* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Spesimen *power steering gearbox housing*

Spesimen patahan kecil *power steering gearbox housing* dipotong menggunakan *Electric Discharge Machining (EDM) wire cut machine* menjadi 2 bagian seperti yang dilihat pada Gambar 3. yang kemudian dilakukan mounting menggunakan resin. Sampel yang telah dimounting selanjutnya akan dilakukan pengujian.



Gambar 3. Hasil pemotongan dan pengambilan spesimen pada patahan kecil *gearbox housing* menggunakan EDM *Wire Cutting Machine*

2.3 Pengamatan Visual

Pengujian ini dilakukan dengan menganalisis area patahan dalam perbesaran skala rendah, untuk memberi gambaran awal investigasi pada *power steering gearbox housing*. Dengan melakukan pengamatan visual ini diharapkan tanda kegagalan awal yang dapat dilihat secara makro dari komponen dapat terlihat, seperti *crack initiation*, *crack propagation*, *final crack* dan lain-lain. Data pengamatan visual digunakan sebagai gambaran awal investigasi kasus kegagalan pada *power steering gearbox housing* mobil Isuzu Panther. Pengujian dilakukan di Laboratorium Material Teknik, Departemen Teknik Mesin, UNDIP menggunakan mikroskop optik, dengan pembesaran 6,7x.

2.4 Pengujian Metalografi

Pengujian ini memiliki tujuan untuk melihat struktur mikro yang terbentuk di material spesimen uji. Pengujian dilakukan pada dua spesimen, yaitu spesimen dengan potongan material dekat area patahan dan spesimen dengan potongan material pada area komponen yang jauh dari patahan. Pengujian metalografi dilakukan menggunakan alat mikroskop mikrografi optik di Laboratorium Material Teknik, Departemen Teknik Mesin, Universitas Diponegoro. Sebelum dilakukan pengujian, sampel uji dilakukan pengamplasan menggunakan amplas grit 240 sampai grit 5000 yang kemudian dilakukan pemolesan menggunakan kain beludru dan autosol. Setelah pemolesan, sampel uji di etsa menggunakan larutan campuran 5 ml HNO₃ dan 100 ml etanol selama kurang lebih 3 detik. Pengamatan struktur mikro serta pengambilan gambar dilakukan dengan lensa perbesaran 100x hingga 1000x.

2.5 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan komposisi serta unsur kimia penyusun material. Hasil dari pengujian tersebut digunakan untuk menilai kualitas material, dalam hal ini *power steering gearbox housing* mobil Isuzu Panther. Pengujian dilaksanakan sesuai dengan standar ASTM E415 menggunakan alat *Optical Emission Spectrometer (OES)* yang dilaksanakan di Laboratorium Material Teknik, Departemen Teknik Mesin, Universitas Diponegoro.

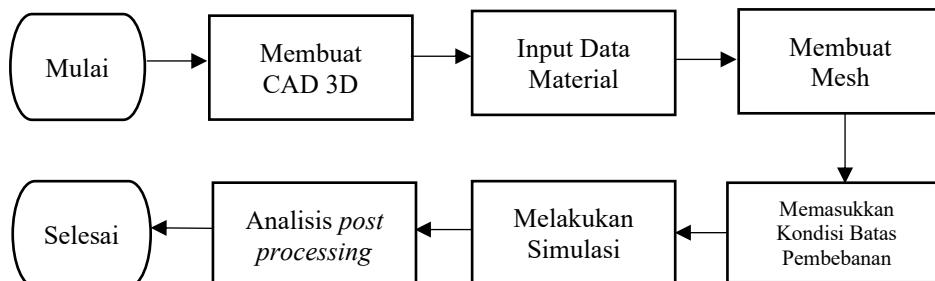
2.6 Pengujian Kekerasan (*Mikro Hardness Vickers*)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan pada spesimen uji. Metode pengujian kekerasan yang digunakan adalah *Vickers hardness tester*, mengacu pada standar ASTM E384, dengan beban sebesar 4,903 N (HV0.5)

dan waktu penekanan selama 15 detik. Indentasi dilakukan pada 5 titik dengan jarak antar titik sekitar 1 mm untuk memperoleh hasil pengukuran yang representatif.

2.7 Simulasi Numerik

Untuk mendukung data dari hasil pengujian, simulasi numerik dilakukan pada model 3D *power steering gearbox housing*. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software SOLIDWORKS 2020*. Langkah-langkah simulasi numerik metode elemen hingga dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Langkah-langkah simulasi numerik metode elemen hingga

Gaya maksimum yang diterima oleh *tie rod* pada kendaraan Lincoln MKX pada kecepatan 15 km/j adalah 3000 Nm [4]. Dengan menggunakan rasio berat kendaraan, dapat didapatkan estimasi beban pada *tie rod* mobil Panther kotak. Mobil Lincoln MKX memiliki berat kotor 1910 kg, sedangkan mobil Panther Kotak 2500 cc memiliki berat kotor 2150 kg.

$$\frac{\text{Berat Mobil Panther}}{\text{Berat Mobil Lincoln}} = \frac{\text{Rack Force Panther}}{\text{Rack Force Lincoln}}$$

$$\frac{2150 \text{ kg}}{1910 \text{ kg}} = \frac{\text{Rack Force Panther}}{3000 \text{ N}}$$

$$\text{Rack Force Panther} = 3377 \text{ N}$$

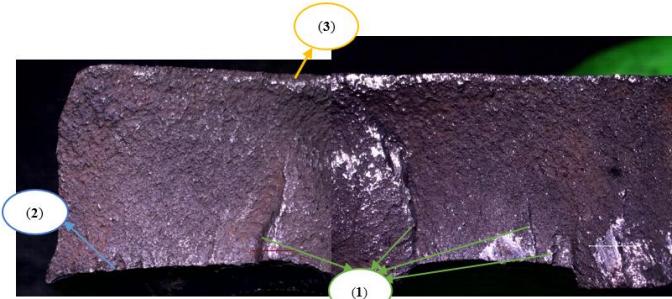
Adapun *apply* material yang digunakan terdiri dari 2 material yaitu material berdasarkan studi literatur dengan jenis yang sama yaitu *nodular (ductile) cast iron grade 80-55-06* serta material hasil pengujian mikrografi dan kekerasan dari material *power steering gearbox housing* dengan asumsi nilai sifat mekanik. Adapun sifat mekanik material untuk simulasi ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat mekanik material untuk simulasi

Properties	Material pengujian	Material Literatur [5]
Tensile strength	654 MPa	696,37 MPa
Yield strength	414 MPa	427,475 MPa
Elastic modulus	120000 Mpa	120000 Mpa
Shear modulus	77000 MPa	77000 MPa
Poisson's Ratio	0,31	0,31
Densitas	7100 kg/m ³	7100 kg/m ³

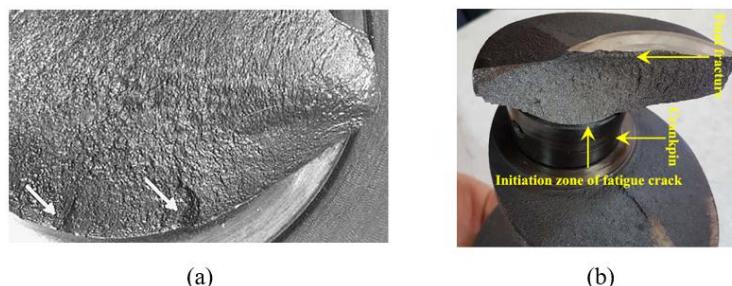
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengamatan Visual



Gambar 5. Pengamatan menggunakan mikroskop makrografi perbesaran 6,7x pada permukaan patahan *housing*, (1) Indikasi *ratchet marks*, (2) Indikasi *crack initiation*, (3) Zona *final crack*

Berdasarkan pengamatan visual yang dilakukan pada permukaan patahan *power steering gearbox housing* dapat dilihat permukaan patahan terlihat tidak beraturan, mirip kerikil, dengan banyak tonjolan kecil dan lubang seperti yang bisa dilihat pada Gambar 5. Terdapat indikasi *ratchet marks* dari beberapa titik permukaan patahan yang mengindikasikan adanya mekanisme lelah dengan beberapa titik inisiasi. Retakan dimulai dari fillet sisi bagian dalam *housing* dan menjalar sampai zona *final crack* di permukaan *housing* yang berkонтак langsung dengan rangka. Di sisi lain, karakteristik kelelahan material seperti *river marks*, garis radial, chevrons, striasi, dan *beachmarks* tidak terlihat dengan jelas di fraktografi. Perbandingan kasus kegagalan dengan gejala fatigue failure pada material *nodular cast iron* ditunjukkan Gambar 6.



Gambar 6. Kasus kegagalan dengan gejala *fatigue failure*, (a) Indikasi *ratchet marks* pada *crankshaft* dikarenakan *fatigue failure* [6], (b) *Crack initiation* dan *final crack zone* pada *crankshaft* truk dikarenakan *fatigue failure* [4].

3.2. Pengujian Kekerasan

Hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa nilai pada area dekat patahan (194–221 HV) dan jauh dari patahan (196–215 HV) berada dalam rentang yang hampir sama tanpa adanya perbedaan yang signifikan. Jika dikonversi ke skala Brinell, kekerasan berkisar antara 205–225 HB, yang sesuai dengan rentang kekerasan tipikal untuk nodular cast iron berdasarkan berbagai industri pengecoran logam dengan produksi logam sesuai standar *tensile* material ASTM A536 (179–255 HB). Hal ini mengindikasikan bahwa tidak ada perbedaan sifat mekanik yang signifikan di antara area dekat patahan dengan area jauh dari patahan. Dari kedua pengukuran didapatkan rata-rata kekerasan dari sampel yaitu 207 HV atau 218 HB.

$$\sigma = 3 \times HB$$

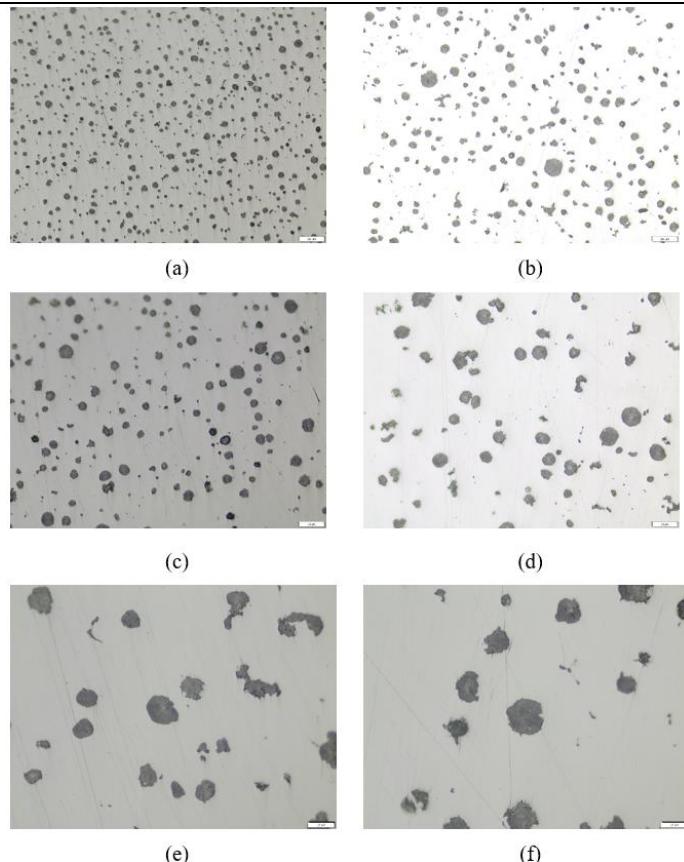
$$\sigma = 3 \times 218 HB$$

$$\sigma = 654 MPa$$

Estimasi untuk nilai *tensile strength* (σ) berdasarkan nilai kekerasan material adalah 3 kali dari nilai Hardness Brinell seperti perhitungan di atas. Maka estimasi nilai *tensile strength* material yang diuji adalah 654 MPa.

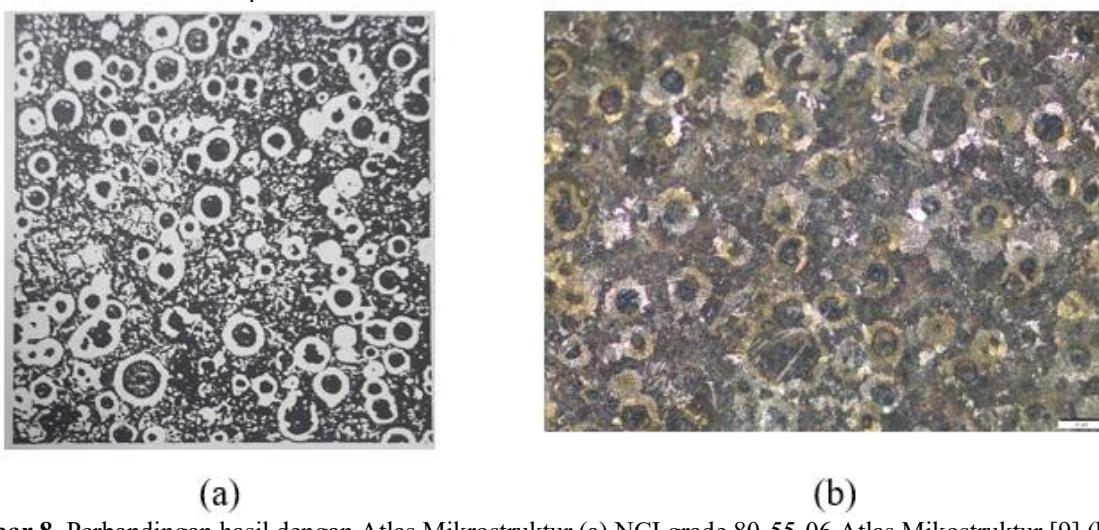
3.3. Pengujian Metalografi (mikrografi)

Hasil pengujian mikrografi menunjukkan partikel grafit berbentuk nodular dapat dilihat sebagai partikel gelap, bulat, dan bertepi halus yang tersebar di seluruh permukaan. Nodul grafit memiliki bentuk sferoidal atau melingkar yang merupakan ciri utama *nodular cast iron*. Pada bagian jauh dari patahan, nodul tersebar lebih merata dan memiliki bentuk yang lebih membulat daripada bagian dekat patahan seperti yang bisa dilihat pada Gambar 7.

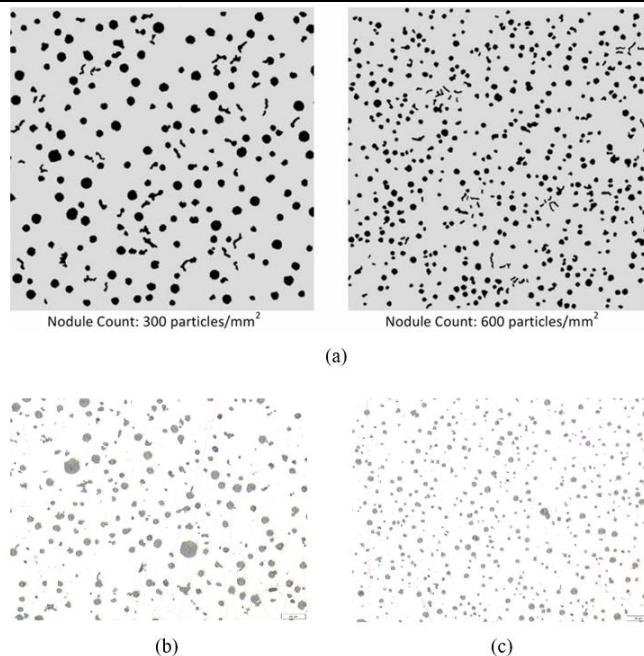


Gambar 7. Hasil foto non-etsa, (a) Housing jauh dari patahan perbesaran 100x, (b) Housing dekat patahan perbesaran 100x, (c) Housing jauh dari patahan perbesaran 200x, (d) Housing dekat patahan perbesaran 200x, (e) Housing jauh dari patahan perbesaran 500x, (f) Housing dekat patahan perbesaran 500x

Nodul memiliki bentuk yang sedikit lebih kasar serta tidak terlalu padat pada bagian dekat patahan yang mana hal ini dapat menyebabkan konsentrasi tegangan pada saat pemakaian komponen yang mengakibatkan pelemahan komponen pada bagian tersebut. Hal ini dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya *fatigue crack initiation* pada kondisi pembebangan siklik [7]. Matriks logam yang mengelilingi nodul grafit terdiri dari kombinasi ferit (daerah terang) dan pearlit (daerah gelap) [8]. Adanya ferit dengan struktur bull's-eye yang mengelilingi grafit yang memiliki bentuk nodular yang keduanya juga berada di dalam matriks pearlit mengindikasikan material pengujian adalah *nodular cast iron* dengan *grade* 80-55-06. Gambar 8. menunjukkan perbandingan hasil foto sample perbesaran 200 x dengan foto dari Atlas Mikrostruktur Grade 80-55-06 *pearlitic ductile iron*

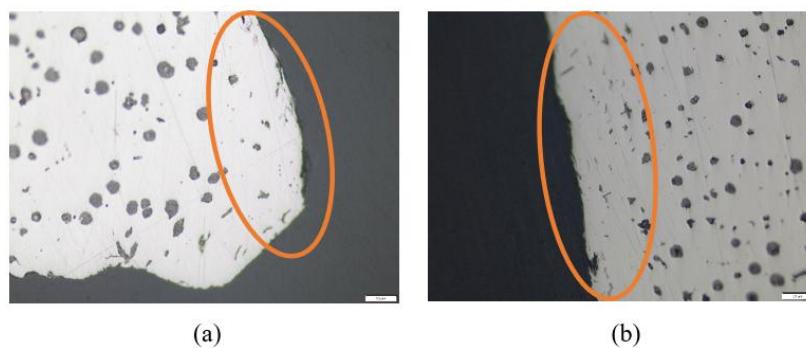


Gambar 8. Perbandingan hasil dengan Atlas Mikrostruktur (a) NCI grade 80-55-06 Atlas Mikrostruktur [9] (b) Hasil foto housing perbesaran 200x



Gambar 9. Perbandingan kepadatan nodul dengan ASTM A247, (a) Kepadatan nodul untuk nodularitas 90% *ductile iron* perbesaran 100x [10] (b) *Housing* dekat patahan perbesaran 100x, (c) *Housing* jauh dari patahan perbesaran 100x

Berdasarkan ASTM A247, material untuk *power steering gearbox housing* ini diklasifikasikan sebagai *nodular graphite* tipe 1 dengan 90% nodularitas dengan nilai kepadatan nodul sekitar 600 partikel /mm² (class 7) untuk bagian jauh dari patahan dan 300 partikel/mm² (class 6) untuk bagian dekat patahan. Perbandingan kepadatan nodul antara spesimen dengan ASTM A247 dapat dilihat dari Gambar 9.



Gambar 10. Perbandingan kepadatan nodul pada bagian permukaan (a) Bagian permukaan sampel dekat patahan (b) Bagian permukaan sampel jauh dari patahan

Pada bagian permukaan baik dari spesimen dekat patahan maupun spesimen yang jauh dari patahan, hanya terdapat sedikit nodul grafit seperti yang terlihat pada Gambar 10. Kurangnya nodul grafit pada bagian permukaan dapat meningkatkan konsentrasi tegangan di bagian permukaan spesimen. Hal ini dapat terjadi dikarenakan cacat produksi pada saat proses casting dimana permukaan logam mengalami penurunan suhu yang lebih cepat dibanding bagian dalam.

3.4. Pengujian Komposisi Kimia (Spektrometri)

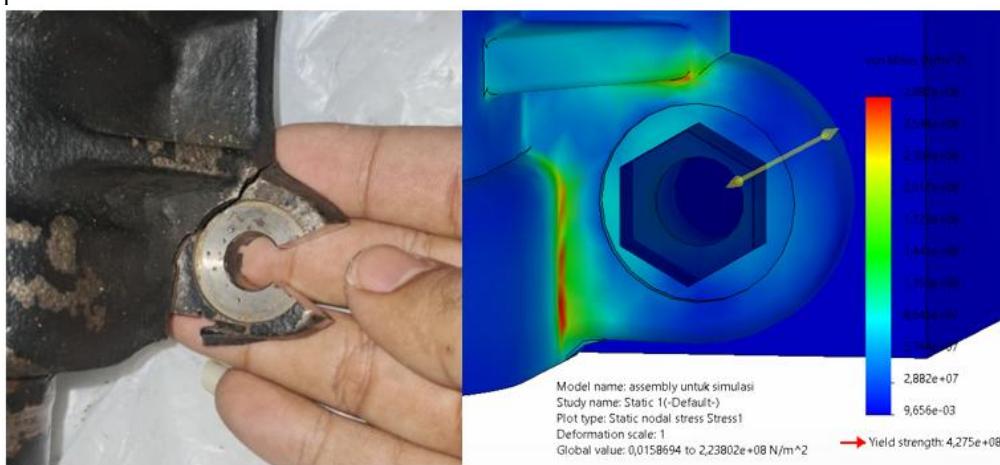
Berdasarkan hasil uji komposisi kimia, material menunjukkan kandungan karbon lebih dari 5% serta adanya unsur *nodulizer* seperti Mg dan Ce. Meskipun nilai karbon yang terukur lebih tinggi dari rentang tipikal *nodular cast iron*, perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh keterbatasan akurasi pengujian yang dapat meningkatkan nilai karbon terukur. Pengujian untuk material cast iron memerlukan sampel uji dilebur kembali dan dicetak menggunakan metode *chill casting* yang mana hal ini tidak memungkinkan untuk dilakukan karena ukuran sampel yang relatif kecil. Adanya grafit berbentuk *spheroid* atau melingkar pada struktur mikro serta nilai kekerasan yang sesuai dengan *nodular cast iron* mengindikasikan bahwa material ini adalah *ductile (nodular) cast iron*. Hasil uji komposisi kimia *power steering gearbox housing* dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil uji komposisi kimia *power steering gearbox housing*

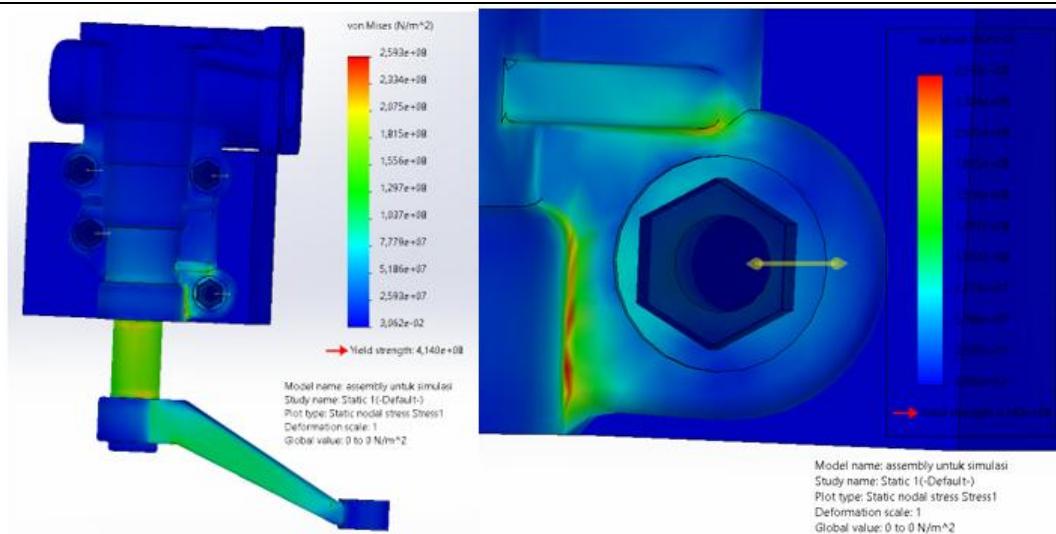
Unsur	Sample Uji	
	<i>Gearbox Housing (%)</i>	Standart deviasi
Fe	90.9	0.97
C	>5.00	0
Si	2.64	0.306
Mn	0.200	0.0107
P	0.0284	0.03531
S	0.130	0.0754
Cr	0.0643	0.02856
Mo	0.0781	0.05953
Ni	0.280	0.1951
Al	0.0797	0.04287
Co	0.0246	0.02018
Cu	0.0680	0.03904
Mg	0.125	0.0001
Nb	0,0597	0.04425
Ti	0,0401	0.02040
V	0.0363	0.02293
Pb	0.0393	0.02128
Sn	0.0176	0.00828
B	0.0024	0.00215
Ce	>0.0800	0
Zr	0.0229	0.01658
Zn	0.0044	0.00197
Bi	0.0116	0.00238
As	0.0023	0.00059
Se	<0.0040	0
Sb	0.0237	0.01299
La	0.00418	0.00869

3.5. Simulasi Numerik

Dari hasil simulasi dengan input pembebangan 3377 N dengan arah pembebangan di *pitman arm, housing* mengalami momen *bending* yang menyebabkan konsentrasi tegangan di dua titik (pada lokasi terjadinya patahan) yang ditandai dengan perbedaan kontur warna pada area tersebut. Perbandingan antara hasil simulasi dengan lokasi patahan spesimen dapat dilihat pada Gambar 11.

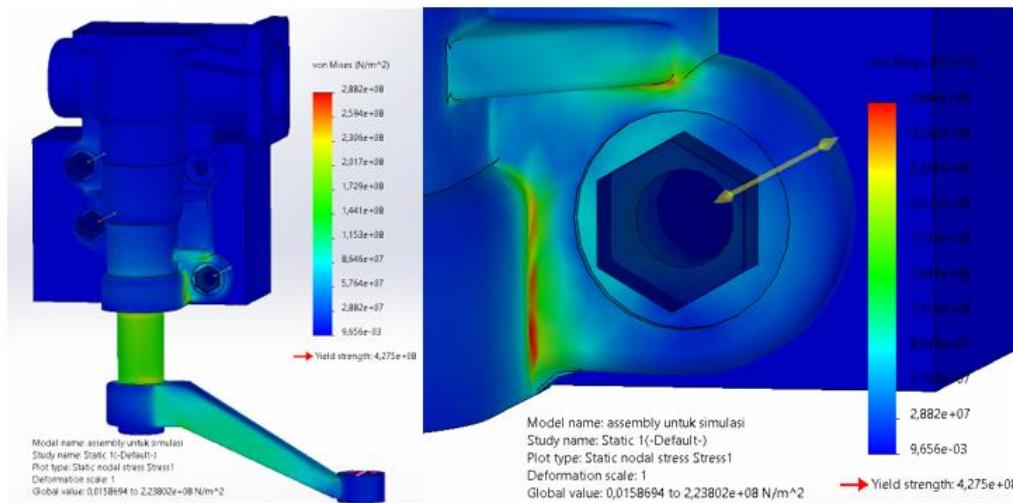


Gambar 11. Perbandingan lokasi patahan sampel dengan hasil simulasi



Gambar 12. Hasil simulasi Finite Element Methods gearbox housing 4 baut dengan arah gaya menjauhi rangka

Simulasi elemen hingga dengan 4 baut serta arah gaya menjauhi rangka menunjukkan tegangan puncak Von Mises adalah sebesar 259,3 MPa yang terlihat berada di daerah fillet dengan lokasi yang sama dimana patahan pada spesimen terjadi seperti dilihat pada Gambar 12. Estimasi nilai *tensile strength* material berdasarkan uji kekerasan adalah 654 MPa. Sementara nilai tensile strength material dari literatur adalah 696,37 MPa. Perkiraan konservatif industri *fatigue margin* untuk *ductile iron* adalah 40% dari nilai *ultimate tensile strength* yaitu 261,6 MPa untuk material hasil pengujian dan 278,5 MPa untuk material dari literatur. Hal ini mengindikasikan bahwa model ini masih dalam rentang aman dikarenakan tegangan puncak memiliki nilai yang lebih rendah dibanding dengan *fatigue margin* material.



Gambar 13. Hasil simulasi Finite Element Methods gearbox housing 3 baut dengan arah gaya menjauhi rangka

Gambar 13 menunjukkan simulasi dengan 3 baut serta arah gaya menjauhi rangka. Hasilnya adalah tegangan puncak Von-Mises naik menjadi 288,2 MPa. Hal ini mengindikasikan bahwa model ini tidak aman dikarenakan tegangan puncak memiliki nilai yang lebih tinggi dibanding dengan *fatigue margin* baik dari material hasil pengujian (261,6 Mpa) maupun material dari literatur (278,5 MPa). Tegangan yang lebih tinggi meningkatkan resiko inisiasi retak kelelahan dan penyebaran cepat secara signifikan. Hal ini dapat menjelaskan mengapa komponen mengalami kegagalan di umur masa pakai yang relatif lama (23 tahun).

4. Kesimpulan

- Berdasarkan hasil analisis kegagalan dan pengolahan data yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:
1. Pengujian mengindikasikan bahwa material *power steering gearbox housing* adalah besi cor nodular (*nodular (ductile) cast iron*) dengan grafit berbentuk nodular yang dikelilingi ferit dan pearlit. Besi cor dapat dikategorikan

- ke *Nodular Cast Iron* (NCI) grade 80-55-06 berdasarkan hasil pengujian mikrografi dan kekerasan. Terdapat kecacatan yang ditemui pada bagian permukaan housing yaitu kurangnya grafit nodular yang disebabkan karena penurunan suhu yang terlalu cepat. Hal ini mengakibatkan adanya konsentrasi tegangan di bagian permukaan.
2. Kegagalan yang dialami *power steering gearbox housing* merupakan kegagalan *fatigue*, ditandai dengan bentuk patahan tegak lurus dan adanya *crack initiation zone*, *final crack zone*, dan *ratchet marks*. Patahan yang terjadi mengikuti kategori matriks ulet (*ductile matrix*) karena retakan berbentuk zig-zag yang menghubungkan antara partikel grafit terdekat atau bagian terlemah dari partikel grafit terbesar.
 3. Dari simulasi FEM dapat dibandingkan lokasi kegagalan *power steering gearbox housing* tepat terjadi pada lokasi tegangan terkonsentrasi. Penyebab *crack initiation* pada *power steering gearbox housing* ini adalah tegangan maksimal yang terjadi melebihi *fatigue margin* untuk material *ductile iron*. Kegagalan dipicu oleh hilangnya salah satu baut yang menahan *housing* ke rangka kendaraan yang menyebabkan meningkatnya nilai tegangan maksimum yang diterima *housing*.

5. Daftar Pustaka

- [1] Aji, W. S., & Nugroho, S. (2014). Analisis Kegagalan Baut Pengikat Gearbox Pada Lokomotif Kereta Rel Diesel Elektrik (Krde). *Jurnal Teknik Mesin*, 2(4), 413-420.
- [2] Wei, C., Shi, J., Sun, Y., Yang, Y., Du, M., & Cao, H. (2025). Analysis of vibration signal transmission and power loss in complex nonlinear dynamics interfaces within gearbox systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 234, 112850.
- [3] Ihlas, A., Puspita, D. F., & Tjahjohartoto, B. (2018). Investigasi Fraktografi dan Analisa Tegangan pada Kerusakan Baut M64 Grade 10, 9 yang Mengalami Pengencangan Berlebih. *Jurnal Teknologi Bahan dan Barang Teknik*, 8(1), 9-18.
- [4] Bhardwaj, A., Slavin, D., Walsh, J., Freudenberg, J., & Gillespie, R. B. (2020). Rack force estimation for driving on uneven road surfaces. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 14426-14431.
- [5] Mason, P. W., Brandenburg, K. A., & Hornbach, D. J. (2016). Improving Fatigue Life of Ductile Cast Iron via Surface Enhancement.
- [6] Aliakbari, K., Nejad, R. M., Mamaghani, T. A., Pouryamout, P., & Asiabaraki, H. R. (2022). Failure analysis of ductile iron crankshaft in compact pickup truck diesel engine. In *Structures* (Vol. 36, pp. 482-492). Elsevier.
- [7] Hu, W., Liu, Z., Liu, D., & Hai, X. (2017). Fatigue failure analysis of high-speed train gearbox housings. *Engineering Failure Analysis*, 73, 57-71
- [8] Asi, O. (2006). Failure analysis of a crankshaft made from ductile cast iron. *Engineering Failure Analysis*, 13(8), 1260-1267.
- [9] Vander Voort, G. F., Lampman, S. R., Sanders, B. R., Anton, G. J., Polakowski, C., Kinson, J., ... & Scott Jr, W. W. (2004). ASM handbook. *Metallography and microstructures*, 9, 44073-0002.
- [10] Standard, A. S. T. M. (1985). A247. *Annual Book of ASTM Standards*, 1.