

Analisis Kegagalan *Fatigue* dan Evaluasi Material Pengganti *Shaft delumper* Berbasis Elemen Hingga

Jagodang Harahap^{*1}, Bukhari², Syahrul Fathi³ Iqbal Tanjung⁴

Andri Afrizal⁵

^{1,2}Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Politeknik Negeri Lhokseumawe

³Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Teuku Umar

⁴Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

⁵Program Studi Teknik Mesin, STTIT Banda Aceh

e-mail: ^{*2}jagodang@pnl.ac.id

Abstrak

Kegagalan berupa retak yang berkembang menjadi patah pada bagian tengah shaft delumper di PT Pupuk Iskandar Muda, tepatnya di dekat kedudukan bearing tengah, mengakibatkan terhentinya proses produksi. Penelitian dilakukan dua tahap: mengidentifikasi akar penyebab kegagalan melalui pemeriksaan visual dan fraktografi permukaan patahan, dilanjutkan evaluasi kelayakan AISI 1045 dan AISI 4140 sebagai kandidat pengganti Carbon 1114 menggunakan simulasi metode elemen hingga pada SolidWorks Simulation, dengan geometri dan beban yang disamakan agar ketiga material dapat diperbandingkan. Hasil analisis menunjukkan titik kritis tegangan tertinggi berada pada shaft di samping kedudukan bearing tengah, memicu konsentrasi tegangan yang diperparah oleh beban siklik tarik-tekan berulang, gesekan mikro pada antarmuka poros-bearing, serta rendahnya ketahanan lelah Carbon 1114 akibat inklusi mangan sulfida, mengindikasikan kegagalan bersifat fatigue failure. Pada beban torsi 4.726 N-m, Carbon 1114 menghasilkan tegangan von Mises 206,31 MPa, deformasi 4,58 mm, faktor keamanan 1,939, dan kerusakan lelah 14,152%. AISI 1045 mencatat tegangan-deformasi terendah (204,70 MPa; 4,53 mm) dengan SF 2,589 dan kerusakan 5,195%, sementara AISI 4140 justru bertegangan-deformasi tertinggi (209,03 MPa; 4,65 mm) akibat variasi modulus elastisitasnya, namun tetap unggul pada faktor keamanan (3,542) dan ketahanan lelah (4,440%) berkat kekuatan luluh yang jauh lebih tinggi. Temuan ini menegaskan bahwa keandalan material lebih ditentukan oleh kekuatan luluh dan kekuatan lelah, bukan besar tegangan nominal, sehingga AISI 4140 terbukti sebagai material pengganti terbaik. Penelitian ini membuktikan bahwa investigasi akar penyebab dikombinasikan simulasi elemen hingga multi-material efektif menjawab persoalan kegagalan shaft delumper

Kata kunci— Analisis Kegagalan, Shaft delumper, Metode Elemen Hingga, Fatigue, AISI 4140.

Abstract

A failure originating from a crack that propagated into a fracture occurred in the middle section of a shaft delumper at PT Pupuk Iskandar Muda specifically near the center bearing seat resulting in a production stoppage. This study was conducted in two stages: identifying the root cause of the failure through visual inspection and fractography of the fracture surface, followed by evaluating the suitability of AISI 1045 and AISI 4140 steels as replacement candidates for Carbon 1114 using Finite Element Method (FEM) simulation in SolidWorks Simulation software, with standardized geometry and loading to ensure result comparability. Analysis results indicate that the critical peak stress point was located on the shaft near the center bearing seat, triggering stress concentrations exacerbated by cyclic tensile-compressive loading, micro-friction at the shaft-bearing interface, and the low fatigue resistance of the Carbon 1114 material due to the

presence of manganese sulfide inclusions; all these factors point to fatigue failure. Under a torsional load of 4,726 N-m, Carbon 1114 exhibited a von Mises stress of 206.31 MPa, a deformation of 4.58 mm, a safety factor of 1.939, and Kerusakan lelah of 14.152%. AISI 1045 recorded the lowest stress and deformation values (204.70 MPa; 4.53 mm) with a safety factor of 2.589 and a damage level of 5.195%, whereas AISI 4140 showed the highest stress and deformation (209.03 MPa; 4.65 mm) due to variations in its modulus of elasticity; however, this material outperformed the others in terms of safety factor (3.542) and fatigue resistance (4.440% damage) thanks to its significantly higher yield strength. These findings confirm that material reliability is determined more by yield strength and fatigue resistance than by the magnitude of nominal stress, thereby establishing AISI 4140 as the optimal replacement material. The study demonstrates that a root cause analysis combined with finite element simulation for various materials is an effective approach to addressing the failure of the shaft delumper

Keywords— *Failure Analysis, Shaft delumper, Finite Element Method, Fatigue, AISI 4140.*

1. PENDAHULUAN

Industri pupuk merupakan salah satu sektor strategis nasional yang menuntut keandalan operasional tinggi pada setiap unit produksinya, termasuk PT Pupuk Iskandar Muda (PT PIM) yang bergerak dalam produksi pupuk urea dan amonia. Salah satu komponen kritis dalam lini proses penanganan bahan baku adalah delumper, yaitu peralatan mekanis yang berfungsi menghancurkan gumpalan (*lump*) material padat agar diperoleh ukuran partikel yang seragam sebelum masuk ke proses selanjutnya[1]

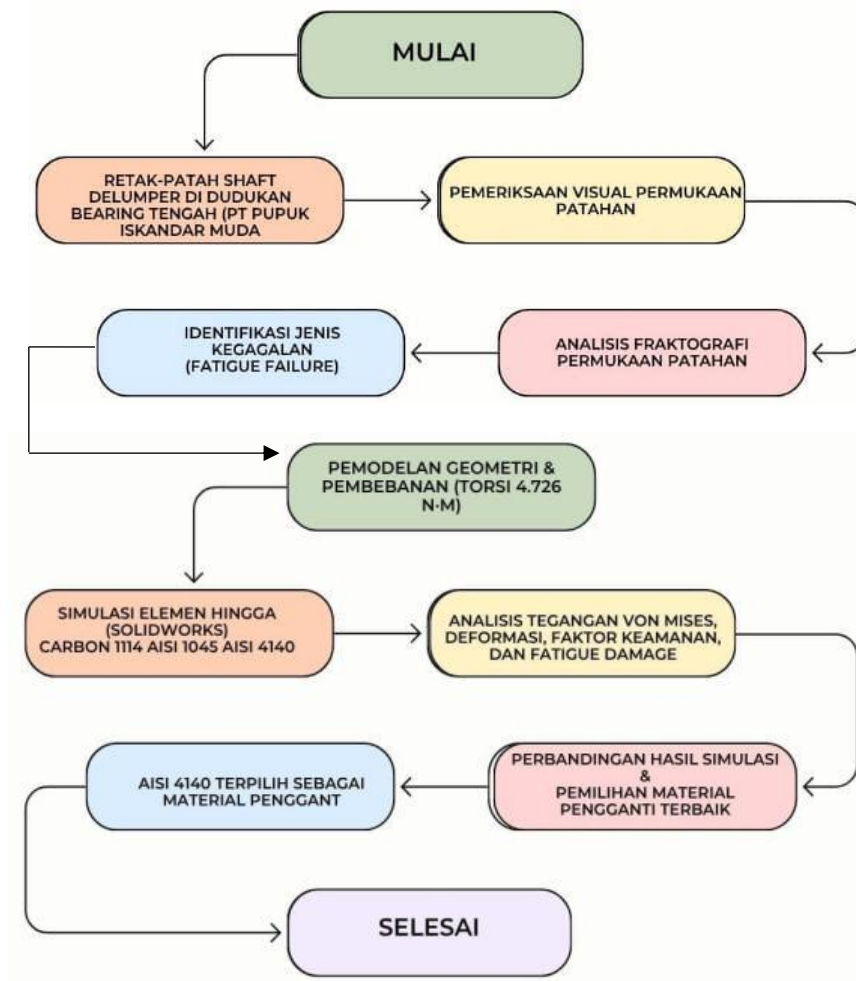
Kajian pada berbagai studi kegagalan poros menunjukkan bahwa daerah di sekitar dudukan *bearing* merupakan salah satu titik yang secara statistik paling rawan menjadi lokasi awal retak, karena perubahan penampang (*shoulder/fillet*) pada area tersebut membentuk konsentrasi tegangan yang signifikan[2]. Poros yang berputar di bawah beban lentur mengalami tegangan bolak-balik penuh pada setiap putaran, sehingga titik dengan konsentrasi tegangan tertinggi menjadi lokasi paling kritis terhadap inisiasi retak lelah.

Selain itu, pada sambungan poros dengan cincin dalam *bearing* yang menggunakan suaian tekan, gerakan mikro relatif akibat lenturan poros dapat memicu *fretting fatigue*, yaitu kombinasi antara keausan gesek dan retak lelah yang menurunkan kekuatan lelah material secara signifikan[3]. Beberapa studi kasus kegagalan poros pada peralatan berputar lain turut mengonfirmasi bahwa kombinasi antara konsentrasi tegangan geometris dan pembebanan siklik secara konsisten menjadi penyebab dominan kegagalan lelah pada komponen serupa[2], [4]. Kegagalan pada poros delumper dapat menimbulkan downtime produksi, biaya perbaikan, serta risiko keselamatan kerja, sehingga diperlukan analisis mendalam terhadap akar penyebab kegagalan tersebut sebelum menentukan langkah perbaikan. Penelitian ini disusun dengan alur dua tahap. Tahap pertama adalah analisis kegagalan (*failure analysis*) untuk mengidentifikasi dan menganalisis akar penyebab terjadinya retak hingga patah pada bagian tengah shaft di samping *bearing* tengah, melalui pengamatan visual, fraktografi, serta kajian terhadap kondisi desain dan operasional di lokasi kegagalan[5], [6], [7]

Penelitian ini memberikan kebaruan dengan memadukan analisis akar penyebab kegagalan aktual di lokasi retak dengan simulasi elemen hingga terhadap tiga material sekaligus (Carbon 1114, AISI 1045, dan AISI 4140) pada geometri dan pembebanan yang identik, mencakup evaluasi tegangan, regangan, deformasi, faktor keamanan, dan analisis *fatigue* berbasis kurva S-N, sehingga menghasilkan rekomendasi material pengganti yang didukung bukti kuantitatif dari dua sisi: bukti lapangan dan bukti simulasi[8], [9], [10], [11]. Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi akar penyebab kegagalan *shaft delumper*, dan mengevaluasi serta merekomendasikan material pengganti yang paling layak di antara AISI 1045 dan AISI 4140 berdasarkan simulasi elemen hingga

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode studi kasus, dilaksanakan dalam dua tahap berurutan. Tahap pertama adalah analisis akar penyebab kegagalan (root cause analysis) melalui pengamatan visual dan fraktografi pada permukaan patahan *shaft delumper* untuk mengidentifikasi mekanisme dan lokasi awal retak. Tahap kedua adalah simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga berbasis software *SolidWorks Simulation* untuk membandingkan performa material eksisting (Carbon 1114) dengan dua material usulan pengganti (AISI 1045 dan AISI 4140) pada geometri dan kondisi pembebanan yang identik, merepresentasikan kondisi kritis di lokasi kegagalan actual



Gambar. 1 diagram penelitian

2.1. Data dan Spesifikasi Material

Sifat mekanik material *C-1114*, AISI 1045, dan AISI 4140 yang digunakan sebagai input simulasi ditunjukkan pada Tabel 3.1. Nilai ini merupakan acuan awal dan perlu diperbarui sesuai

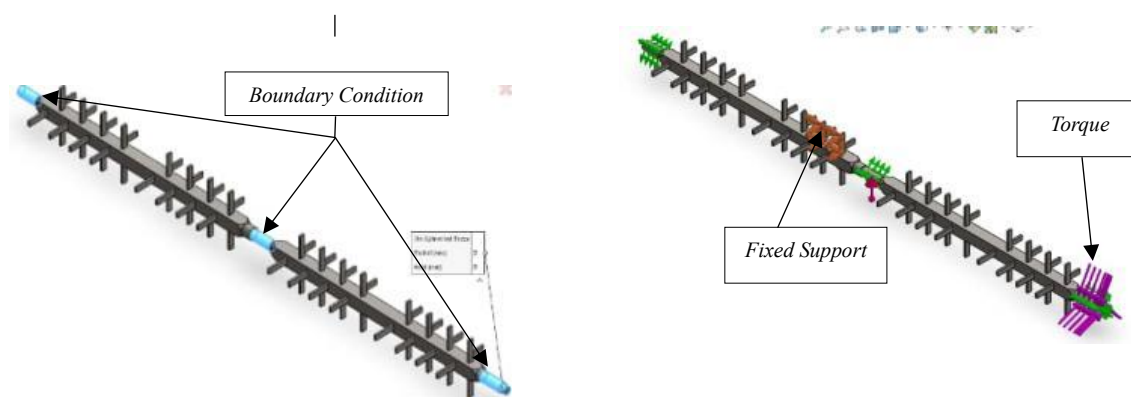
hasil uji tarik/kekerasan aktual atau data material properties pada *software* simulasi yang digunakan[12][13], [14].

Tabel. 1. Material Properties dari ketiga Material

Sifat Mekanik	C-1114	AISI 1045	AISI 4140	Satuan
Kekuatan tarik (UTS)	430 – 480	570 – 625	655 – 1020	MPa
Kekuatan luluh (Yield)	285 – 320	310 – 530	415 – 900	MPa
Elongasi	20 – 33	12 – 16	12 – 25	%
Kekerasan	137 – 143	170 – 210	197 – 300*	HB
Modulus elastisitas	200	200	200 – 210	GPa
Rasio Poisson	0,29	0,29	0,28 – 0,29	-

2.2. Pemodelan, pembebanan dan kondisi batas

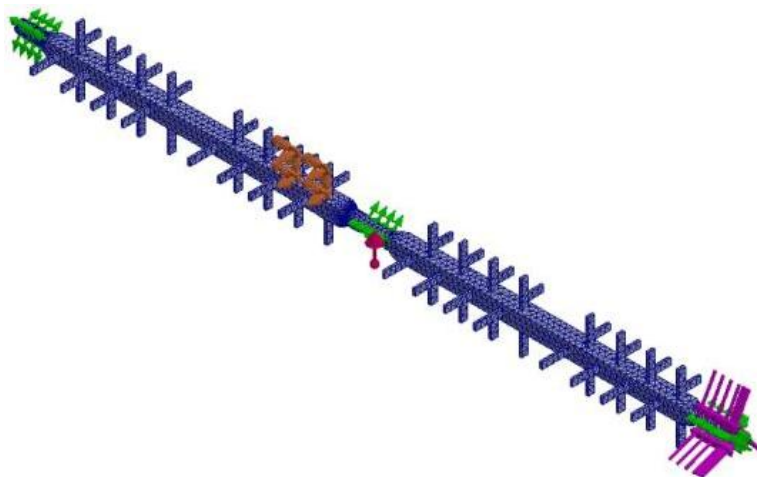
Model geometri shaft dibuat dalam bentuk 3D solid sesuai dimensi aktual, dengan perhatian khusus pada radius fillet dan shoulder di dudukan *bearing* tengah sebagai lokasi kegagalan aktual. Kondisi batas diterapkan pada tiga dudukan *bearing* sebagai Advanced Fixtures (On Cylindrical Faces), dengan translasi radial dan aksial dikunci pada 0 mm sementara arah sirkumferensial dibiarkan bebas agar poros tetap dapat berputar.[15], [16] Skenario kondisi ekstrem (worst-case) turut disimulasikan melalui Fixed Geometry pada permukaan pisau pencacah yang macet. Beban torsi sebesar 4.726 N·m diterapkan pada ujung poros yang tersambung ke gearbox, dan beban gravitasi 9,81 m/s² diterapkan pada arah vertikal untuk merepresentasikan berat sendiri poros pada orientasi pemasangan mendatar.



Gambar 2. Posisi pembebanan dan kondisi batas

2.3. *Meshing* dan Kriteria Evaluasi

Proses *meshing* menggunakan tipe *curvature-based mesh* dengan kerapatan menengah, divalidasi melalui uji konvergensi hingga selisih tegangan antar-iterasi di bawah 5%. Hasil simulasi dievaluasi terhadap tiga kriteria: tegangan von Mises maksimum terhadap kekuatan luluh material, deformasi total maksimum dengan batas toleransi desain $\leq 0,5$ mm, dan faktor keamanan ($SF = \sigma_{yield}/\sigma_{max}$) dengan target minimum 2,0–3,0.



Gambar 3. Setelah dilakukan proses *meshing*

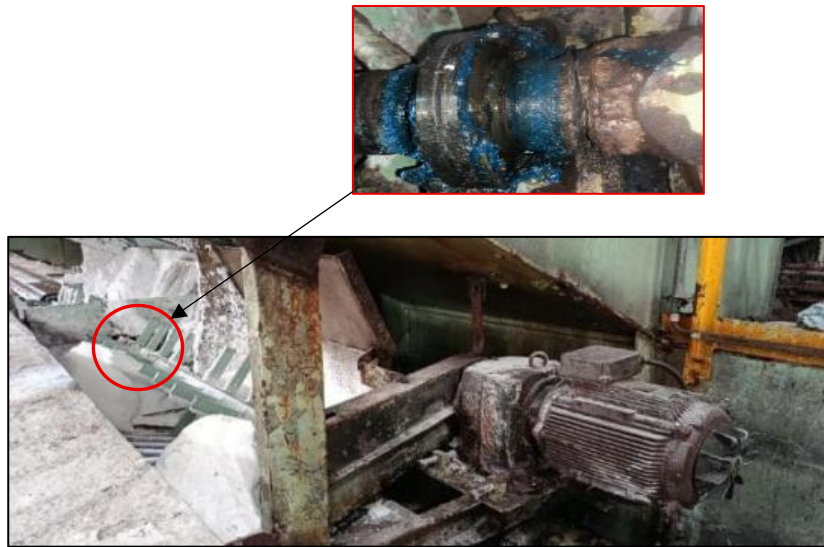
2.4. Analisis *Fatigue*

Analisis *fatigue* dilakukan pada modul *Fatigue Tool* berbasis pendekatan stress-life (kurva S-N) yang diturunkan otomatis dari modulus elastisitas material menggunakan basis data ASME Carbon Steel curve. Jenis pembebanan siklik yang diterapkan adalah fully reversed ($R = -1$), merepresentasikan kondisi poros berputar kontinu, dengan target siklus desain sebesar 1.000.000 siklus. Keluaran analisis berupa persentase kerusakan (Kerusakan lelah) dan estimasi umur *fatigue* (*fatigue life*) dalam satuan siklus, mengikuti pendekatan yang juga digunakan pada studi prediksi umur *fatigue* poros berbasis elemen hingga [2], [5], [17].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis Penyebab Kegagalan

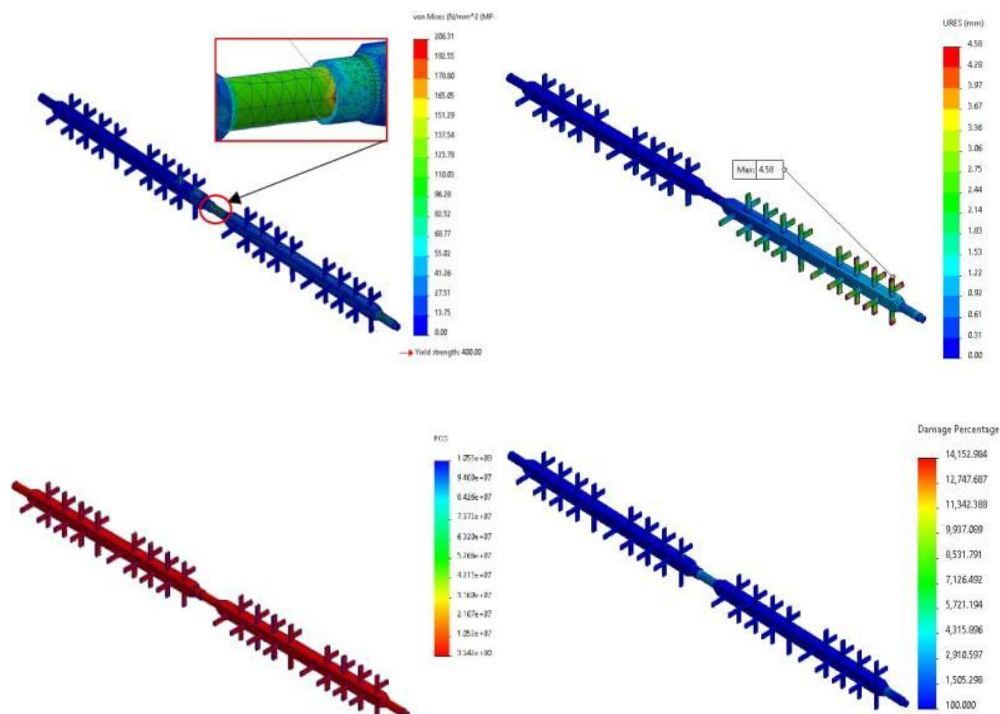
Pemeriksaan visual dan fraktografi terhadap *shaft delumper* yang gagal menunjukkan bahwa retak bermula pada shoulder/filletudukan *bearing* tengah dan berkembang hingga patah total. Berdasarkan lokasi tersebut, kegagalan diidentifikasi sebagai *fatigue failure* yang diinisiasi oleh konsentrasi tegangan pada perubahan penampang, diperberat oleh tegangan lentur bolak-balik akibat rotasi poros (*rotating bending fatigue*), potensi *fretting fatigue* pada antarmuka poros-*bearing* serta kemungkinan ketidaksejajaran (*misalignment*) pada *bearing* tengah. Faktor-faktor tersebut diperberat oleh rendahnya kekuatan lelah material Carbon 1114 akibat inklusi mangan sulfida pada struktur mikronya, sejalan dengan pola kegagalan pada studi kasus poros berputar lain yang juga diinisiasi oleh konsentrasi tegangan geometris pada kondisi pembebanan siklik [18], [19].



Gambar.4. *Shaft delumper* yang patah

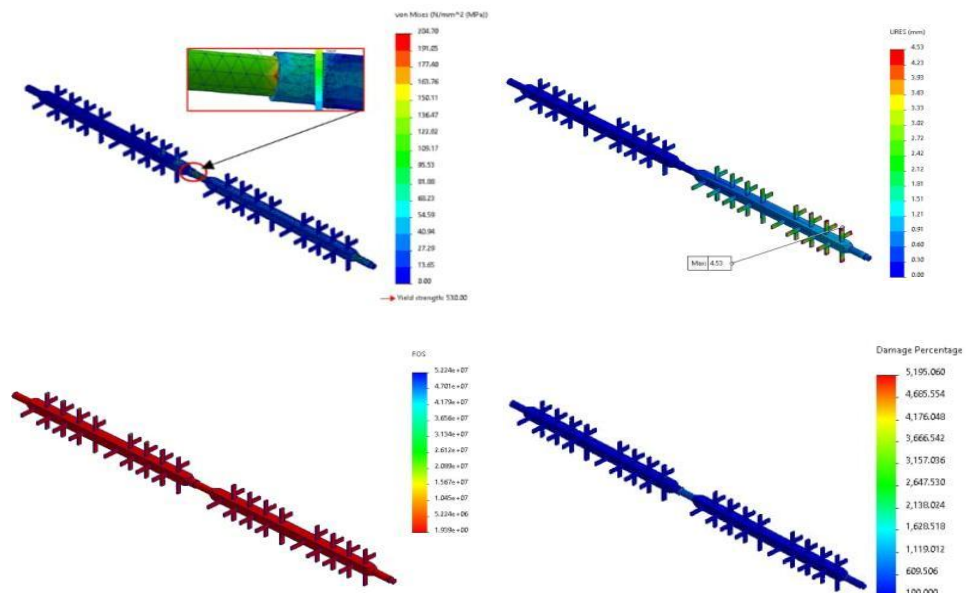
3.2. Hasil Simulasi Elemen Hingga

- a) Hasil simulasi pada shaft berbahan *C-1114* dengan kondisi pembebanan sesuai Tabel 3.2 menunjukkan tegangan *von Mises* maksimum terjadi pada daerah *shaft* bagian Tengah tepat disamping *bearing*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.



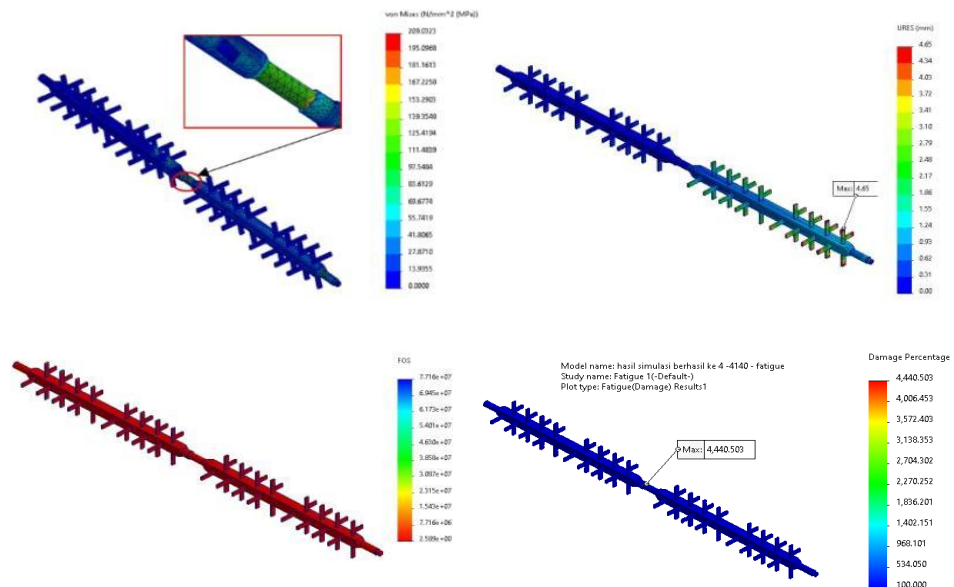
Gambar 5. Hasil Simulasi Material C-1114

- b) Dengan geometri dan kondisi pembebanan yang identik, simulasi pada material AISI 1045 menghasilkan distribusi tegangan dan deformasi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hasil Simulasi Material AISI 1040

- c) Dengan geometri dan kondisi pembebanan yang identik, simulasi pada material AISI 4140 menghasilkan distribusi tegangan dan deformasi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Hasil Simulasi Material AISI 4140

d) Tabel 2 Perbandingan hasil Simulasi dari 3 material

Parameter	C-1114	AISI 1045	AISI 4140	Satuan
Tegangan <i>von Mises Stress</i>	206,31	204,70	209,03	MPa
Deformasi Total	4,58	4,53	4,65	mm
Faktor Keamanan	1,939	2,589	3,542	-
Kerusakan lelah	14,152	5,195	4,440	%

3.3. Pembahasan

Tabel perbandingan hasil simulasi elemen hingga pada tiga material menunjukkan pola yang menarik dan sedikit berbeda dari asumsi awal bahwa tegangan dan deformasi ketiga material akan seragam akibat modulus elastisitas yang berdekatan. Pada data ini, AISI 4140 justru mencatat tegangan von Mises tertinggi (209,03 MPa) dan deformasi terbesar (4,65 mm) di antara ketiga material melebihi baik Carbon 1114 (206,31 MPa; 4,58 mm) maupun AISI 1045 (204,70 MPa; 4,53 mm, yang justru menjadi yang terendah).

Perbedaan ini kemungkinan dipengaruhi oleh variasi modulus elastisitas AISI 4140 yang sedikit lebih tinggi dan bervariasi pada rentang 200–210 GPa tergantung kondisi perlakuan panasnya, sehingga responsnya terhadap beban yang sama tidak sepenuhnya identik dengan AISI 1045 meskipun keduanya berasal dari keluarga baja karbon/paduan menengah. Meskipun demikian, keunggulan AISI 4140 tetap tampak jelas dan bahkan lebih meyakinkan pada dua parameter yang benar-benar menentukan keandalan struktural, yaitu faktor keamanan dan ketahanan *fatigue*.

Faktor keamanan meningkat progresif dan signifikan dari Carbon 1114 (1,939) ke AISI 1045 (2,589, naik 33,5%) hingga tertinggi pada AISI 4140 (3,542, naik 82,7% dari Carbon 1114). Pola serupa terlihat pada Kerusakan lelah, yang menurun tajam dari Carbon 1114 (14,152%) ke AISI 1045 (5,195%, turun sekitar 63%) hingga terendah pada AISI 4140 (4,440%, turun sekitar 68,6% dari Carbon 1114). Temuan ini menegaskan satu prinsip penting dalam pemilihan material elemen mesin: faktor keamanan dan ketahanan lelah ditentukan oleh kekuatan luluh dan kekuatan lelah (*fatigue strength*) material bukan semata oleh besar-kecilnya tegangan aktual yang terjadi.

Sekalipun AISI 4140 mengalami tegangan dan deformasi yang secara nominal sedikit lebih tinggi, kekuatan luluhnya yang jauh lebih besar (655 MPa, dibandingkan 300–395 MPa pada Carbon 1114 dan 450 MPa pada AISI 1045) membuat margin keamanannya tetap yang terbaik di antara ketiganya. Carbon 1114 secara konsisten menjadi material dengan performa terlemah pada seluruh parameter yang dievaluasi: faktor keamanan di bawah 2,0 (ambang minimum desain umum untuk komponen berbeban dinamis) dan Kerusakan lelah lebih dari tiga kali lipat AISI 4140. Kombinasi faktor keamanan rendah dan laju kerusakan lelah yang tinggi ini secara kuantitatif menjelaskan mengapa material eksisting mengalami kegagalan dini berupa retak yang berkembang menjadi patah pada kondisi operasional aktual.

4. KESIMPULAN

Kegagalan *shaft delumper* di PT Pupuk Iskandar Muda, berupa retak yang berkembang menjadi patah pada bagian tengah poros di samping dudukan *bearing* tengah, teridentifikasi sebagai *fatigue failure* yang diinisiasi oleh konsentrasi tegangan pada titik tersebut. Kondisi tersebut diperparah oleh beban siklik dan gesekan mikro pada antarmuka poros-*bearing*, serta rendahnya ketahanan lelah Carbon 1114 akibat inklusi mangan sulfida.

Simulasi pada beban torsi 4.726 N·m menunjukkan Carbon 1114 memiliki performa paling lemah, dengan faktor keamanan hanya 1,939 dan kerusakan lelah tertinggi 14,152%. AISI 1045 mencatat tegangan-deformasi terendah (204,70 MPa; 4,53 mm) dengan SF 2,589 dan kerusakan 5,195%, sedangkan AISI 4140 justru bertegangan-deformasi tertinggi (209,03 MPa; 4,65 mm) akibat variasi modulus elastisitasnya, namun tetap unggul pada faktor keamanan (3,542) dan ketahanan lelah (4,440%) berkat kekuatan luluh yang jauh lebih tinggi.

Temuan ini membuktikan bahwa keandalan material lebih ditentukan oleh kekuatan luluh dan kekuatan lelah, bukan besar tegangan nominal, sehingga AISI 4140 direkomendasikan sebagai pengganti Carbon 1114 yang paling layak. Penelitian ini menegaskan bahwa investigasi akar penyebab dikombinasikan simulasi elemen hingga multi-material efektif menjawab persoalan kegagalan *shaft delumper* secara komprehensif.

5. SARAN

Disarankan PT Pupuk Iskandar Muda mengganti material *shaft delumper* dari Carbon 1114 ke AISI 4140, disertai peninjauan ulang radius fillet padaudukan *bearing* tengah untuk menekan konsentrasi tegangan, penerapan perlakuan panas *quenching-tempering*, serta kalibrasi kesejajaran *bearing* secara berkala guna meminimalkan *fretting*. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan validasi eksperimental melalui pengujian *fatigue* fisik pada AISI 4140 untuk mengonfirmasi akurasi simulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Managemen PT. PIM, “Laporan Tahunan PT Pupuk Iskandar Muda Tahun 2025,” Indonesia, Dec. 2025.
- [2] M. Badaruddin, Sugiyanto, H. Wardono, Andoko, C. J. Wang, and A. K. Rivai, “Improvement of low-cycle fatigue resistance in AISI 4140 steel by annealing treatment,” *Int. J. Fatigue*, vol. 125, pp. 406–417, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.04.020.
- [3] M. H. Hong and H. Choi, “Three-Dimensional Finite Element Analysis of Stress Distribution in Dental Implant Prosthesis and Surrounding Bone Using PEEK Abutments,” *Biomimetics*, vol. 9, no. 8, Aug. 2024, doi: 10.3390/biomimetics9080472.
- [4] D. Croccolo, M. De Agostinis, S. Fini, G. Olmi, F. Robusto, and C. Scapecchi, “Fretting Fatigue in Mechanical Joints: A Literature Review,” Apr. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/lubricants10040053.
- [5] S. O. Afolabi, B. I. Oladapo, C. O. Ijagbemi, A. O. M. Adeoye, and J. F. Kayode, “Design and finite element analysis of a fatigue life prediction for safe and economical machine shaft,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 105–111, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2017.10.007.
- [6] S. Zangeneh, M. Ketabchi, and A. Kalaki, “Fracture failure analysis of AISI 304L stainless steel shaft,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 36, pp. 155–165, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.09.013.
- [7] S. Netpu and S. Buapool, “Fatigue Failure of the Input Shaft Used in Gearbox,” *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 23, no. 5, pp. 1958–1966, 2023, doi: 10.1007/s11668-023-01735-3.
- [8] S. Singh, S. Samir, K. Kumar, and S. Thapa, “Effect of heat treatment processes on the mechanical properties of AISI 1045 steel,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 5097–5101. doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.590.
- [9] M. A. Sabtu, A. E. Admi, M. M. Salleh, S. A. Osman, and S. A. Osman, “Finite Element Analysis of Stress Distribution in AL6061 Frame Structures Under Varying Applied

-
- Loads,” *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 259–269, 2024, doi: 10.30880/ijie.2024.16.02.027.
- [10] H. Shi, R. Wang, Y. Lu, Z. Wang, and W. Yang, “Flexible shaft failure analysis,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 157, p. 107919, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107919>.
- [11] N. Hou *et al.*, “Failure modes, mechanisms and causes of shafts in mechanical equipment,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 136, p. 106216, 2022, doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106216>.
- [12] azom, “AISI 1114 Carbon Steel.” [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6562>
- [13] MW Components, “AISI 1045.”
- [14] Gravity Group of Company, “AISI 4140 heat treatment”.
- [15] H. Jagodang, Husaini, E. P. Teuku, and S. Dieter, “Stress analysis on an automotive coil spring driven on flat, uphill, and downhill road surfaces,” in *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd, 2021, pp. 124–128. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.892.124.
- [16] J. Harahap, T. E. Putra, and A. R. Nasution, “Analisis Mesh Size Untuk Konvergensi Coil Spring Roda Depan Minibus Menggunakan Metode Elemen Hingga,” *Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 11, no. 1, 2025.
- [17] M. Badaruddin, Sugiyanto, H. Wardono, Andoko, C. J. Wang, and A. K. Rivai, “Improvement of low-cycle fatigue resistance in AISI 4140 steel by annealing treatment,” *Int. J. Fatigue*, vol. 125, pp. 406–417, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.04.020.
- [18] C. M. S. Vicente, M. Sardinha, and L. Reis, “Failure analysis of a coupled shaft from a shredder,” 2023.
- [19] Y. Liu, Z. Lian, C. Xia, L. Qian, and S. Liu, “Fracture failure analysis and research on drive shaft of positive displacement motor,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 106, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.08.011.
-