Jurnal Teknik Mesin S-1, Vol. 14, No. 3, Tahun 2026
Online: https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm

ANALISIS KEGAGALAN PATAH PADA POROS AISI D2 DI LINI *PRE-TREATMENT* INDUSTRI OTOMOTIF

***Hasna Rahma Mahirawati[1], Sri Nugroho[2], Mohammad Tauviqirrahman[2]**
[1]Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
[2]Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059
*E-mail: hasnarahmam@gmail.com

Abstrak

Poros (*shaft*) pada rakitan Assy Lifter di lini pre-treatment industri otomotif berfungsi sebagai penopang beban struktural utama yang menerima beban lentur statis dan dinamis secara berulang. Baru-baru ini dilaporkan terjadi kegagalan fatal berupa patah getas (*brittle fracture*) pada komponen tersebut tanpa disertai sertifikat material resmi, sehingga diperlukan prosedur *reverse engineering* untuk mengidentifikasi jenis material dan akar penyebab kegagalannya. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi karakteristik metalurgi material poros, mode dan mekanisme kegagalan, lokasi konsentrasi tegangan, serta akar penyebab kegagalan (*root cause*) melalui pendekatan eksperimental terintegrasi dengan simulasi numerik. Metode penelitian meliputi pengamatan makroskopik, pengujian komposisi kimia (*Optical Emission Spectrometry*), pengujian kekerasan *Micro-Vickers*, pengamatan metalografi, serta simulasi *Finite Element Method* (FEM) menggunakan ANSYS *Workbench* pada model rakitan *Multi-Body System*. Hasil pengujian komposisi kimia mengonfirmasi bahwa material poros adalah baja perkakas paduan tinggi AISI D2 dengan kadar karbon 1,53% dan kromium 11,6%. Pengamatan fraktografi menunjukkan morfologi patah getas dengan titik inisiasi retak pada sisi atas poros, sementara pengujian kekerasan menunjukkan gradien signifikan dari 633 HV di permukaan hingga 382 HV di inti akibat *mass effect*. Struktur mikro memperlihatkan matriks *tempered martensite* dengan karbida kromium primer ($\boldsymbol{M_7C_3}$) yang mengalami fragmentasi pada zona dekat patahan. Simulasi elemen hingga menunjukkan konsentrasi tegangan tarik maksimum sebesar 55,573 MPa pada batas jepitan kaku, sinkron dengan lokasi inisiasi retak aktual. Kombinasi antara korosi celah (*crevice corrosion*) pada antarmuka jepitan dan sifat getas material AISI D2 disimpulkan sebagai akar penyebab kegagalan patah lelah (*fatigue failure*) pada poros tersebut.
Kata kunci: aisi d2; analisis kegagalan; korosi celah; metode elemen hingga; patah getas

Abstract

The shaft in the Assy Lifter assembly of the automotive pre-treatment line functions as the main structural support that repeatedly experiences static and dynamic bending loads. A fatal failure in the form of brittle fracture was recently reported on this component without an accompanying material certificate, requiring a reverse engineering procedure to identify the material type and root cause of failure. This study aims to identify the metallurgical characteristics of the shaft material, the failure mode and mechanism, the location of stress concentration, and the root cause of failure through an integrated experimental and numerical simulation approach. The research methods include macroscopic observation, chemical composition testing using Optical Emission Spectrometry, Micro-Vickers hardness testing, metallographic observation, and Finite Element Method (FEM) simulation using ANSYS Workbench on a Multi-Body System assembly model. The chemical composition test confirmed that the shaft material is AISI D2 high-alloy tool steel with a carbon content of 1.53% and chromium content of 11.6%. Fractographic observation revealed a brittle fracture morphology with the crack initiation point on the upper side of the shaft, while the hardness test showed a significant gradient from 633 HV at the surface to 382 HV at the core due to the mass effect. The microstructure showed a tempered martensite matrix with primary chromium carbide (M_7C_3) that underwent fragmentation in the zone near the fracture. The finite element simulation showed a maximum tensile stress concentration of 55.573 MPa at the rigid clamping boundary, consistent with the actual crack initiation location. The combination of crevice corrosion at the clamping interface and the brittle nature of AISI D2 was concluded to be the root cause of the fatigue failure of the shaft.
Keywords **:** *aisi d2*; *brittle fracture*; *crevice corrosion*; *failure analysis*; *finite element method*

1. Pendahuluan

Dalam Dalam industri otomotif yang sangat kompetitif, kualitas dan durabilitas produk sangat bergantung pada keberhasilan proses *pre-treatment* (persiapan permukaan) sebelum pengecatan, yang bertujuan membersihkan bodi mobil dan melapisinya dengan lapisan anti-karat (*phosphating*) agar cat dapat menempel dengan baik [1]. Komponen poros (*shaft*) pada rakitan *Assy Lifter* berperan sebagai penopang beban struktural utama yang menahan beban lentur statis dan dinamis secara berulang selama proses pencelupan bodi mobil ke rangkaian tangki proses.

Baru-baru ini dilaporkan terjadi kegagalan fatal berupa patah getas (*brittle fracture*) pada poros penyangga tersebut. Ketiadaan dokumentasi teknis atau sertifikat material (*material certificate*) resmi menjadikan kondisi material ini tidak diketahui (*unknown material*), sehingga diperlukan prosedur *reverse engineering* melalui serangkaian uji laboratorium untuk mengidentifikasi identitas material dan akar penyebab kegagalannya.

Studi terdahulu menunjukkan bahwa baja perkakas paduan tinggi AISI D2 memiliki ketangguhan yang rendah (*low toughness*) akibat kehadiran fasa karbida kromium pada struktur mikronya, sehingga meskipun unggul dalam ketahanan aus, material ini sangat sensitif terhadap konsentrasi tegangan [2]. Kegagalan prematur pada komponen berbahan AISI D2 juga sering dipicu oleh penumpukan tegangan pada area diskontinuitas geometri, seperti lekukan atau undakan diameter [3]. Selain itu, mekanisme perambatan retak pada baja D2 sangat dipengaruhi oleh struktur eutektik dan jaringan karbida yang mempercepat terjadinya patah getas seketika tanpa deformasi plastis yang signifikan [4].

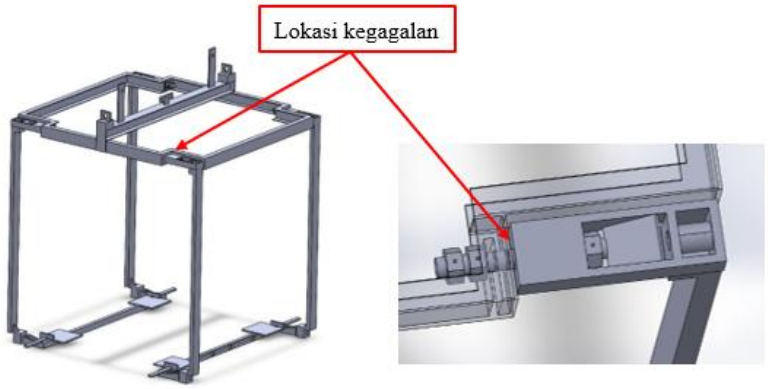
Inisiasi retak pada komponen struktural yang bekerja secara dinamis juga dapat diperparah oleh degradasi material akibat sinergi mekanik dan lingkungan elektrokimia celah, yang dikenal sebagai *Mechanically-Assisted Crevice Corrosion* (MACC) [5]. Fenomena ini umum terjadi pada celah sempit antarkomponen yang menerima beban dinamis, di mana gerakan mikro secara mekanis merusak lapisan oksida pasif pelindung logam sehingga mempercepat pelarutan logam aktif di dalam celah dan memicu takik lokal (*notch*) yang tajam.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan mengintegrasikan hasil karakterisasi material secara eksperimental dengan analisis tegangan komputasional menggunakan *Finite Element Method* (FEM), guna mengidentifikasi identitas dan karakteristik metalurgi material poros, mode dan mekanisme kegagalan patah, lokasi konsentrasi tegangan maksimum pada desain poros, serta akar penyebab utama (*root cause*) kegagalan sebagai dasar rekomendasi perbaikan desain.

2. Metode Penelitian

2.1 Objek dan Bahan Penelitian

Objek penelitian adalah satu komponen poros yang mengalami kegagalan patah dari unit *Assy Lifter* pada lini pre-treatment industri otomotif, dengan diameter nominal 4,414 cm. Secara mekanika, konfigurasi penumpuan poros dimodelkan sebagai balok kantilever (*cantilever beam*), dengan sisi pangkal terjepit kaku pada *housing* dan sisi ujung menerima gaya terpusat vertikal akibat beban gantung struktur, sehingga momen lentur maksimum terjadi pada penampang bibir jepitan tumpuan kaku.



Gambar 1. Model 3D rakitan *Assy Lifter* yang menunjukkan lokasi komponen poros (*shaft*) pada sistem *lifter crane*

2.2 Prosedur Pengujian Eksperimental

Pengujian eksperimental mengadopsi alur standar investigasi kegagalan komponen AISI D2 yang meliputi pemeriksaan visual makroskopik, analisis komposisi kimia, uji kekerasan, dan analisis metalografi [6]. Pengamatan makroskopik dilakukan untuk mengidentifikasi lokasi awal retakan (*crack origin*) serta pola perambatan retak. Pengujian komposisi kimia menggunakan *Optical Emission Spectrometer* (OES) model Hitachi FOUNDRY-MASTER untuk memvalidasi identitas material. Pengujian kekerasan mikro menggunakan metode *Micro-Vickers* (mesin Shimadzu HMV-2000, beban 300–500 gf) mengacu standar ASTM E384 [7], dilakukan pada tujuh titik dari permukaan luar hingga inti poros untuk memetakan profil distribusi kekerasan. Pengamatan metalografi dilakukan menggunakan mikroskop optik metalurgi Olympus BX53M pada spesimen yang telah dipoles hingga *mirror finish* dan dietsa menggunakan larutan Nital 3%, guna mengidentifikasi fasa struktur mikro serta korelasi jalur retak sekunder dengan jaringan karbida.

2.3 Simulasi Numerik Metode Elemen Hingga

Simulasi statik struktural dilakukan menggunakan ANSYS Workbench 2023 R1 dengan pendekatan *Multi-Body System Assembly* untuk menganalisis distribusi tegangan pada poros uji beserta interaksinya dengan komponen pendukung. Properti mekanis material yang digunakan pada Engineering Data dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Properti Mekanis Material Komponen *Lifter*

Properti	Poros Uji (AISI D2)	Baut & Mur *(Alloy Steel)*	Rangka (ASTM A36)
Density (kg/m³)	7.700	7.778	7.850
Modulus Elastisitas (MPa)	210.000	212.900	200.000
Poisson's Ratio	0,29	0,367	0,30
Yield Strength (MPa)	2.066	1.510	250
Ultimate Tensile Strength (MPa)	2.292	1.700	460

Kondisi batas (*boundary conditions*) diterapkan berupa tumpuan jepit kaku (*fixed support*) pada lubang pengait *crane*, kontak *bonded* pada sambungan permanen, kontak *frictional* pada sambungan pin dan lengan pengangkat, serta gaya prategang baut (*bolt pretension*) sebesar 500 N. Beban dinamis operasional dihitung berdasarkan Hukum II Newton dengan faktor beban dinamis (Kdyn) sebesar 1,5, menghasilkan gaya lentur aktual sebesar ±2.000 N pada setiap poros penumpu. Diskretisasi domain menggunakan elemen tetrahedral dengan metode *Patch Conforming* dan kontrol kualitas jaring skewness, menghasilkan total 1.110.894 *nodes* dan 713.331 *elements*. Kriteria kegagalan material getas dievaluasi menggunakan Teori Tegangan Utama Maksimum (*Maximum Principal Stress / Rankine Criterion*).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Pengamatan Visual dan Fraktografi Makroskopik

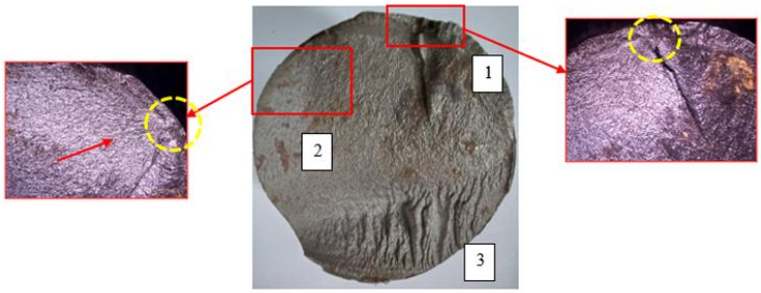
Pengamatan makroskopik menunjukkan bahwa patahan terjadi secara melintang tepat pada transisi area yang dijepit oleh dudukan kaku, dengan morfologi muka patahan yang dominan rata tanpa deformasi plastis signifikan, ciri khas patah getas (*brittle fracture*).



(a) (b)

Gambar 2. Visualisasi patahan poros *lifter*: (a) Lokasi aktual patahan; (b) Fitur permukaan patahan makroskopik

Muka patahan dapat diklasifikasikan ke dalam tiga zona: (1) titik awal retakan (*crack origin*) pada tepi lingkar luar poros; (2) zona perambatan retak (*crack progression*) dengan morfologi rata dan mengkilap disertai pola radial; dan (3) zona patah akhir (*final fracture*) dengan permukaan kasar berundak akibat kelebihan beban (*overload*).



Gambar 3. Klasifikasi zona morfologi muka patahan dan arah rambatan retak dari sisi atas ke sisi bawah

Sisi atas poros teridentifikasi sebagai lokasi inisiasi retak karena menerima tegangan tarik normal maksimum akibat momen lentur hogging pada tumpuan *kantilever*. Pengamatan lebih lanjut pada permukaan poros juga menemukan celah antarmuka jepitan (*clamping interface gap*) yang bertindak sebagai takik mekanis sekaligus perangkap elektrokimia bagi terjadinya korosi celah (*crevice corrosion*) [8].

3.2 Hasil Komposisi Kimia

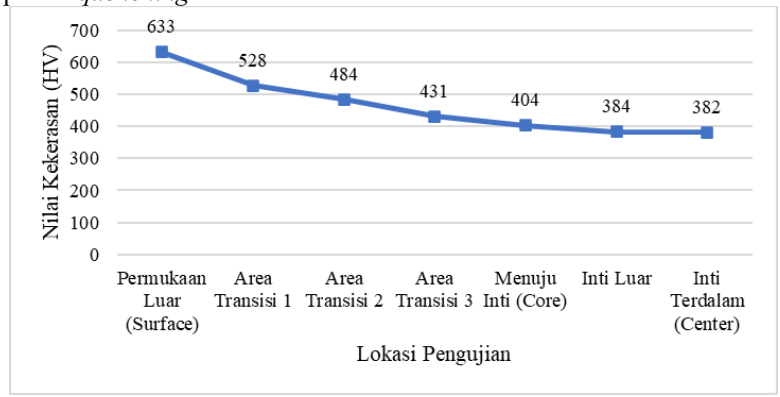
Pengujian OES membuktikan bahwa material poros bukan baja karbon menengah, melainkan baja perkakas paduan tinggi AISI D2, sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Komposisi Kimia dibandingkan Standar AISI D2 [9].

Unsur	Hasil Aktual (%wt)	Standar AISI D2 (%wt)
Karbon (C)	1,53	1,40 – 1,60
Kromium (Cr)	11,6	11,00 – 13,00
Molibdenum (Mo)	0,860	0,70 – 1,20
Vanadium (V)	0,255	Maks. 1,10

3.3 Hasil Kekerasan Mikro

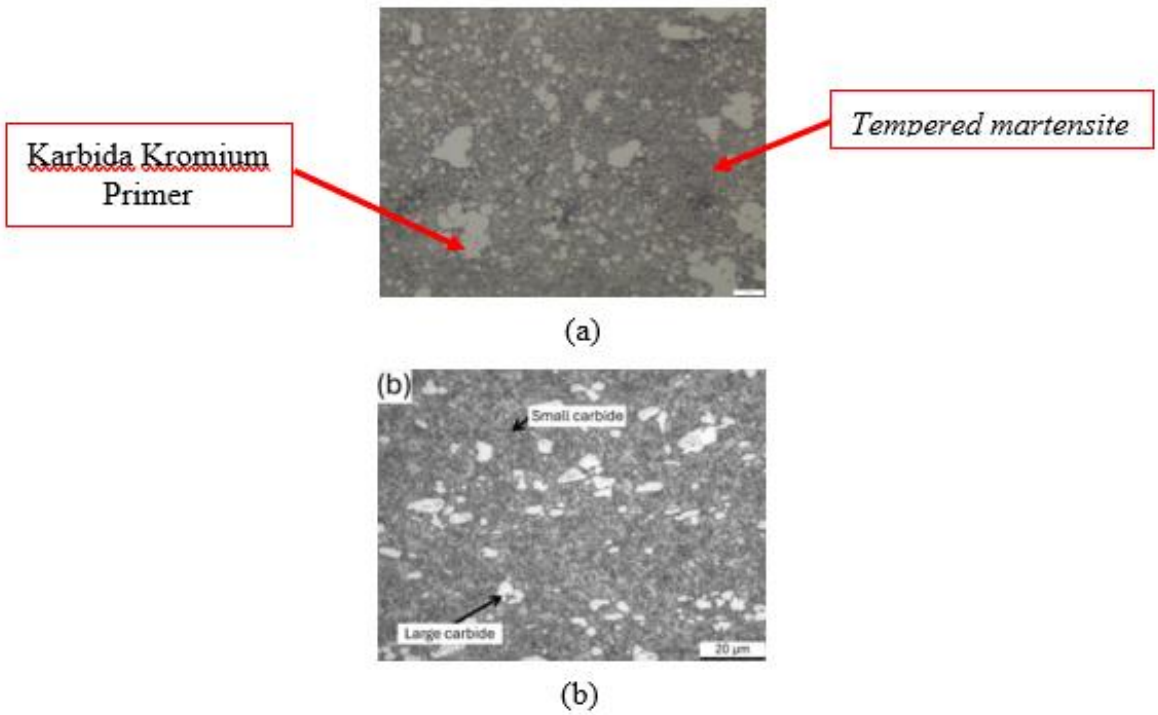
Profil kekerasan Micro-Vickers dari permukaan menuju inti poros menunjukkan gradien penurunan yang signifikan, dari 633 HV (±57 HRC) pada permukaan hingga 382 HV (±39 HRC) pada inti terdalam. Gradien ini merupakan fenomena *mass effect* yang wajar terjadi akibat keterbatasan laju pendinginan internal pada penampang poros yang relatif tebal saat proses *quenching*.

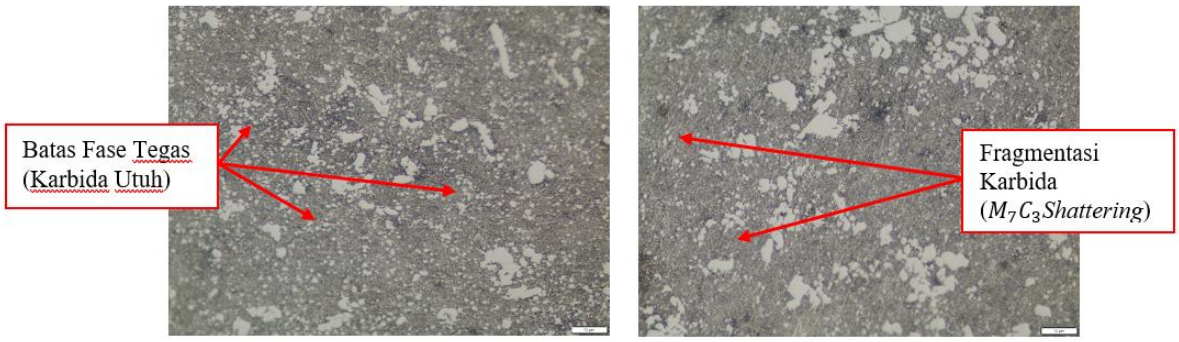


Gambar 4. Grafik profil distribusi kekerasan *Micro-Vickers* dari permukaan menuju inti poros

3.4 Hasil Stuktur Mikro

Struktur mikro spesimen didominasi oleh matriks tempered martensite dengan fasa karbida kromium primer (M_7C_3) yang tersebar sebagai partikel masif, sesuai dengan referensi struktur mikro AISI D2 pada kondisi *austenitizing* and *quenching* [10]. Pada zona dekat patahan, populasi karbida utuh tampak lebih jarang dengan batas fase yang kabur akibat fragmentasi karbida (M_7C_3 *shattering*), yang mengindikasikan konsentrasi tegangan siklik pada batas fasa karbida-matriks selama masa operasional [11].



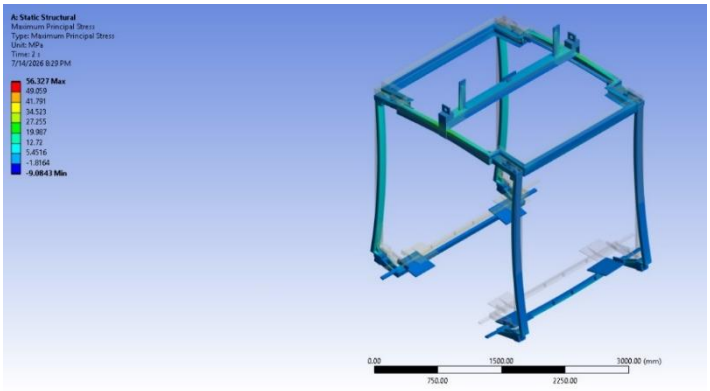


(a) (b)

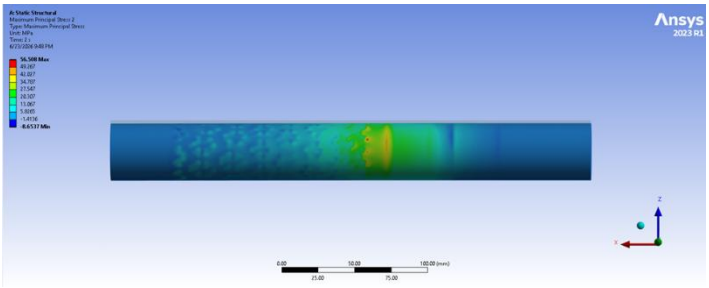
Gambar 5. Struktur mikro *tempered martensite* dan karbida kromium primer, serta komparasi zona jauh vs. dekat patahan

3.5 Hasil Simulasi Elemen Hingga

Hasil simulasi rakitan menunjukkan nilai tegangan utama maksimum global sebesar 56,327 MPa, dengan aliran tegangan mengalir dari titik tumpuan menuju pilar rangka. Pada tinjauan lokal komponen poros, konsentrasi tegangan tarik maksimum sebesar 55,573 MPa terlokalisasi tepat pada batas transisi jepitan kaku poros yang berbatasan dengan housing rangka atas, lokasi yang sinkron dengan titik inisiasi retak fisik pada spesimen aktual.



(a)



(b)

Gambar 5. Kontur tegangan utama maksimum (*Maximum Principal Stress*) pada: (a) struktur rangka global dan (b) komponen poros

3.6 Analisis Mekanisme Kegagalan

Meskipun nilai tegangan hasil simulasi (55,573 MPa) masih jauh di bawah kekuatan luluh nominal AISI D2 (2.066 MPa), kegagalan katastrofik tetap terjadi akibat kombinasi antara korosi celah dan ketidaksesuaian pemilihan material (*material selection mismatch*). Celah sempit pada antarmuka jepitan menjebak cairan kimia lini *pre-treatment* yang stagnan, memicu korosi celah yang sulit mengalami repassivation [12] dan membentuk takik alami. Karena sifat getas dan sensitivitas takik (*notch sensitivity*) AISI D2 yang tinggi, takik tersebut memicu inisiasi retak lelah pada tegangan yang secara nominal masih tergolong aman, yang kemudian merambat progresif hingga poros mengalami patah lelah total (*fatigue failure*) setelah ± 4 tahun masa operasional.

4. Kesimpulan

Material poros teridentifikasi sebagai baja perkakas AISI D2 dengan sifat keras namun getas dan ketangguhan retak yang rendah. Komponen mengalami patah lelah (*fatigue failure*) yang berinisiasi dari permukaan atas poros akibat beban lentur dinamis siklik. Simulasi elemen hingga mengonfirmasi lokasi tegangan tarik maksimum (55,573 MPa) pada batas jepitan kaku, sinkron dengan titik inisiasi retak aktual. Akar penyebab kegagalan adalah kombinasi korosi celah pada antarmuka jepitan yang membentuk takik, dengan sifat getas material AISI D2 yang tidak mampu mendisipasi konsentrasi tegangan melalui deformasi plastis. Rekomendasi perbaikan meliputi modifikasi geometri antarmuka jepitan, isolasi lingkungan kerja terhadap korosi, serta penggantian material poros dengan paduan yang memiliki ketangguhan retak dan ketahanan korosi lebih baik untuk aplikasi beban lentur dinamis.

5. Daftar Pustaka

[1] Banea, M., Budhe, S., de Barros, S. & dos Reis, M., 2017. Effect of adherend surface preparation on the mechanical properties of aluminium bonded joints. Welding Equipment and Technology, Volume 28, pp. 39-44.

[2] Zeidi, A., Saada, F. B. & Elleuch, K., 2021. AISI D2 punch head damage: Fatigue and wear mechanism. Engineering Failure Analysis, Volume 129, pp. 1-17.

[3] Scandian, C., Luz, T. S. & Pardal, J. M., 2015. Failure Analysis of Guides Made of High-Strength AISI D2 Tool Steel. J Fail. Anal. and Preven, Volume 15, p. 789–793.

[4] Park, J.-H., Kim, K.-S., Koo, Y.-M. & Lee, K.-A., 2023. Effect of Post-Heat Treatment on the Impact Toughness and Crack Propagation Mechanism of AISI D2 Tool Steel Manufactured by Direct Energy Deposition. Arch. Metall. Mater., Volume 68, pp. 119-122.

[5] Xu, W. et al., 2023. Mechanically-assisted crevice corrosion and its effect on materials degradation. Corrosion Communications, Volume 11, pp. 23-32.

[6] Papageorgiou, D., Manolas, G., Medrea, C. & Chicinaş, I., 2019. Failure analysis of a lancing tool used in a bridge slot filter pipe machine. Engineering Failure Analysis, Volume 105, pp. 237-245.

[7] ASTM, 2017. Sandard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[8] Kim, J. Y., Bahn, C. B. & Heon, B. S., 2024. Crevice chemistry and corrosion in high temperature water: A review. Nuclear Engineering and Technology, Volume 56, pp. 3112-3122.

[9] MatWeb, 2026. AISI D2 Tool Steel Material Property Data. [Online] Available at: https://www.matweb.com.

[10] Ghio, E., Felci, M. & Garziera, R., 2025. Effects of Multiple Quenching Treatments on Microstructure and Hardness of O2, D2, and D3 Tool Steels. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 9(6), p. 142. [11] Guan, J. et al., 2018. Fatigue crack nucleation and propagation at clustered metallic carbides in M50 bearing steel. Tribology International, Volume 119, p. 165–174.

[11] Guan, J. et al., 2018. Fatigue crack nucleation and propagation at clustered metallic carbides in M50 bearing steel. Tribology International, Volume 119, p. 165–174.

[12] Klapper, H. S., Zadorozne, N. S. & Rebak, R. B., 2017. Localized Corrosion Characteristics of Nickel Alloys: A Review. Acta Metall.