

ANALISIS KEGAGALAN PADA *CONNECTING ROD* AKIBAT *BUCKLING* DI MESIN PEMBAKARAN DALAM MOBIL 1300 CC

*Gilbert Maruli Tua Pakpahan¹, Sri Nugroho², Mohammad Tauviqirrahman²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*E-mail: gilbertpakpahan03@gmail.com

Abstrak

Connecting rod merupakan komponen vital dalam mesin pembakaran dalam yang berfungsi mentransmisikan gaya dari piston ke *crankshaft*. Kendaraan yang beroperasi di Indonesia kerap menghadapi kondisi banjir sehingga dapat menyebabkan fenomena *water hammer*, yakni kondisi di mana air masuk ke ruang bakar dan menimbulkan tekanan mendadak yang sangat tinggi. Tekanan ekstrem tersebut diteruskan ke *connecting rod* sehingga menyebabkan kegagalan *buckling* pada bagian *shank*. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik material *connecting rod*, menentukan penyebab kegagalan, serta menganalisis mekanisme terjadinya *buckling* pada *connecting rod* mobil 1300 cc. Metode yang digunakan meliputi pengujian spektrometri untuk mengidentifikasi komposisi material, pengujian metalografi untuk mengamati struktur mikro, pengujian kekerasan Vickers untuk mengetahui distribusi kekerasan, serta simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga (FEA) dengan perangkat lunak ANSYS Workbench 2025. Model tiga dimensi komponen dirancang menggunakan SolidWorks 2022. Hasil pengujian menunjukkan struktur mikro didominasi fasa ferit dan perlit tanpa martensit, mengindikasikan proses *quenching* dan *tempering* tidak dilaksanakan secara memadai. Nilai kekerasan rata-rata sebesar 285,2 HV (dekat *buckling*) dan 291,1 HV (jauh dari *buckling*). Simulasi numerik menunjukkan tegangan *von Mises* maksimum pada beban normal (30 kN) sebesar 384 MPa masih di bawah kekuatan luluh material (415 MPa), namun pada beban 35 kN telah melampaui kekuatan luluh. Analisis *eigenvalue buckling* menunjukkan Mode 2 paling mendekati pola kegagalan aktual, yaitu *buckling* lateral pada bagian *shank* di daerah penampang terkecil. Kombinasi antara beban kejut akibat *water hammer*, kualitas material yang tidak memenuhi standar, serta geometri *shank* yang ramping menjadi faktor utama yang memicu kegagalan *buckling* pada *connecting rod* tersebut.

Kata kunci: *buckling; connecting rod; failure analysis; finite element method; water hammer*

Abstract

Connecting rod is a vital component in internal combustion engines that transmits force from the piston to the *crankshaft*. Vehicles operating in Indonesia frequently encounter flooding conditions that can cause the *water hammer* phenomenon, a condition where water enters the combustion chamber and generates sudden, extremely high pressure. This extreme pressure is transmitted to the *connecting rod*, causing *buckling* failure in the *shank* section. This study aims to analyze the material characteristics of the *connecting rod*, determine the cause of failure, and analyze the mechanism of *buckling* in the *connecting rod* of a 1300 cc automobile. The methods employed include spectrometry testing to identify material composition, metallographic testing to observe microstructure, Vickers hardness testing to determine hardness distribution, and numerical simulation using the Finite Element Method (FEM) with ANSYS Workbench 2025. The three-dimensional model was designed using SolidWorks 2022. Results show microstructure dominated by ferrite and pearlite phases without martensite, indicating inadequate *quenching* and *tempering* treatment. Average hardness values were 285.2 HV (near *buckling*) and 291.1 HV (far from *buckling*). Numerical simulation shows maximum *von Mises* stress under normal load (30 kN) of 384 MPa remains below the yield strength (415 MPa), but exceeds yield strength at 35 kN. Eigenvalue *buckling* analysis indicates Mode 2 most closely resembles the actual failure pattern, namely lateral *buckling* at the *shank* in the region of minimum cross-section. The combination of impact loading due to *water hammer*, substandard material quality, and slender *shank* geometry are the primary factors triggering *buckling* failure in the *connecting rod*.

Keywords : *buckling; connecting rod; failure analysis; finite element method; water hammer*

1. Pendahuluan

Kendaraan bermotor di Indonesia kerap menghadapi kondisi banjir yang berpotensi menyebabkan fenomena *water hammer*, yakni kondisi di mana air masuk ke ruang bakar dan menimbulkan tekanan mendadak yang sangat tinggi akibat sifatnya yang *incompressible*. Dampak finansial yang ditimbulkan cukup signifikan, dengan estimasi biaya perbaikan berkisar antara Rp6.000.000 hingga lebih dari Rp70.000.000 [1]. *Connecting rod* merupakan komponen vital dalam mesin pembakaran dalam yang berfungsi mengubah gerak translasi piston menjadi gerak rotasi pada *crankshaft*. Kualitas dan kestabilan komponen ini sangat menentukan performa serta keandalan mesin secara keseluruhan [2]. Salah satu mode kegagalan kritis yang dapat terjadi adalah *buckling*, yaitu ketika beban tekan aksial akibat *water hammer* melampaui kapasitas kritis batang tengah (*shank*) sehingga menyebabkan deformasi lateral secara tiba-tiba [3]. Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji fenomena ini. Pani et al. [3] menyimpulkan bahwa pendekatan Merchant-Rankine tidak tepat untuk menghitung beban *buckling* akibat *hydrolock*. Lee et al. [4] menunjukkan sensitivitas tegangan *buckling* lebih tinggi dibanding *yield* dan *fatigue* melalui FEA. Strozzi et al. [5] mengidentifikasi berbagai mode kegagalan *buckling* pada *connecting rod* mesin pembakaran dalam. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik material, penyebab kegagalan, dan mekanisme *buckling* pada *connecting rod* mobil 1300 cc menggunakan pengujian spektrometri, metalografi, kekerasan Vickers, dan simulasi numerik FEA dengan ANSYS Workbench 2025.

2. Dasar Teori

2.1 Connecting Rod dan Beban Kerja

Connecting rod terdiri dari tiga bagian utama yaitu *small end*, *shank*, dan *big end*. *Small end* berfungsi menghubungkan batang dengan piston pin dan menerima beban osilasi tinggi, sedangkan *big end* terhubung dengan *crankshaft journal* dan mengalami perubahan arah gaya secara periodik. Bagian *shank* merupakan tubuh utama yang menanggung beban aksial dominan dan menjadi lokasi kritis terhadap fenomena *buckling* maupun *fatigue* [2]. Gaya total yang bekerja pada *connecting rod* merupakan penjumlahan antara gaya gas pembakaran (F_{gas}) dan gaya inersia ($F_{inersia}$):

$$F_{total} = F_{gas} + F_{inersia} \\ = (P_{max} \times A_p) + (m \times a)$$

2.2 Mekanisme Kegagalan Buckling

Buckling terjadi ketika beban tekan aksial pada *connecting rod* melampaui beban kritis Euler. Pada fenomena *water hammer*, air yang masuk ke ruang bakar tidak dapat dimampatkan sehingga memblokir gerakan piston secara tiba-tiba, menghasilkan beban impulsif yang sangat besar. *Connecting rod* yang memiliki geometri *shank* ramping sangat rentan terhadap *lateral buckling* dan *front-rear buckling*. Kombinasi beban kejutan dengan material yang tidak memenuhi standar akan memperparah risiko kegagalan ini [5].

2.3 Material AISI 4140

Baja AISI 4140 (chromium-molybdenum steel) merupakan material yang umum digunakan untuk *connecting rod*. Material ini mengandung C (0,38–0,43%), Cr (0,80–1,10%), Mo (0,15–0,25%), dan Mn (0,75–1,00%). Sifat mekanik standar mencakup modulus elastisitas 210 GPa, kekuatan tarik 655 MPa, dan kekuatan luluh 415 MPa. Untuk menghasilkan struktur *tempered martensite* yang optimal, baja ini harus menjalani proses *quenching* pada suhu 845–870°C diikuti *tempering* pada suhu 175–700°C, sehingga menghasilkan kekerasan 280–380 HV [6].

3. Metode Penelitian

3.1 Spesifikasi Connecting Rod

Spesimen berupa *connecting rod* dari mesin mobil 1300 cc yang mengalami kegagalan *buckling*. Berikut adalah parameter geometri *connecting rod*. Parameter dan spesifikasi mesin dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Parameter *Connecting Rod*

Parameter <i>Connecting Rod</i>	Simbol	Nilai	Satuan
Center to center	L	129.5	mm
Small end	d_1	18	mm
Big end	d_2	43	mm
Thickness	b_2	20	mm
Cap bolt diameter	$\emptyset_{bolt}$	8	mm
Cap thickness	t_{cap}	15	mm
Shank thickness	t_{shank}	17	mm

Tabel 2. Spesifikasi Mesin 1300 cc

Parameter <i>Connecting Rod</i>	Nilai	Satuan
Jumlah Silinder	4	-
Kapasitas Mesin	1329 cc	cc

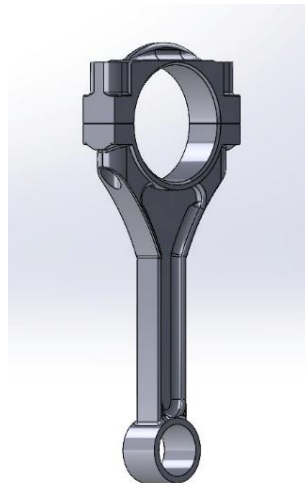
Parameter <i>Connecting Rod</i>	Nilai	Satuan
<i>Bore × Stroke</i>	72,5 × 80,5	mm
Daya Maksimum	6000	rpm
Torsi Maksimum	4200	rpm
Rasio Kompresi	11 : 1	-
Massa <i>Reciprocating</i>	0,6	kg

3.2 Pengujian Material

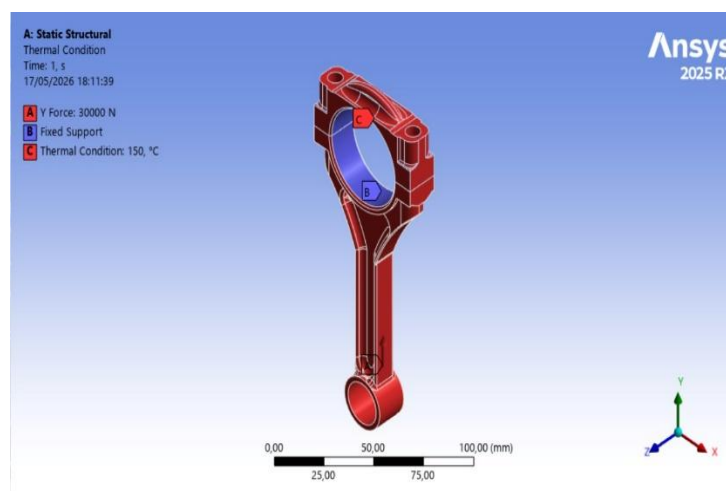
Pengujian komposisi kimia dilakukan menggunakan spektrometer optis di Laboratorium Material Universitas Diponegoro. Sampel diambil dari bagian *big end connecting rod* dengan permukaan yang diratakan menggunakan gerinda perata sebelum pengujian. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik dengan pembesaran 200×. Sampel diambil dari dua lokasi: dekat daerah kegagalan *buckling* (Sampel II) dan jauh dari daerah kegagalan (Sampel IV). Preparasi meliputi pemotongan, pengamplasan basah (No. 120–5000), *polishing* menggunakan autosol, dan pengetsaaan dengan larutan *nital*. Standar yang digunakan: ASTM E3-11 dan ASTM E407-07. Pengujian kekerasan menggunakan metode Vickers (HV) dengan indenter *diamond pyramid* sudut puncak 136°, beban 500 gf, dan waktu indentasi 15 detik. Pengujian dilakukan pada 8 titik per sampel mulai dari cekungan atas hingga cekungan bawah pada dua sampel (dekat dan jauh dari *buckling*). Standar yang digunakan: ASTM E384-11.

3.3 Simulasi Numerik FEA

Model 3D *connecting rod* dirancang menggunakan SolidWorks 2022 berdasarkan dimensi spesimen aktual. Simulasi dilakukan menggunakan ANSYS Workbench 2025 R2. Kondisi batas yang diterapkan: gaya total 30 kN didapatkan dari tekanan maksimum pembakaran (P_{max}) dihitung dari daya mesin (P), konstanta mesin 4 langkah ($\eta R = 2$), volume silinder (V_d), dan putaran mesin (N) lalu diaplikasikan pada bagian dalam *small end* searah sumbu batang, sedangkan *big end* diaplikasikan sebagai *fixed support*. Analisis yang dilakukan meliputi analisis tegangan statik (Von Mises) dan analisis *eigenvalue buckling* (13 mode).



Gambar 1. Model Connecting Rod



Gambar 2. Kondisi Batas

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Pengamatan Visual

Berdasarkan pengamatan visual, *connecting rod* yang diteliti mengalami deformasi berupa buckling yang jelas pada bagian tengah *shank*. Pola deformasi ini khas untuk kegagalan *lateral buckling*, di mana batang melengkung ke arah lateral akibat kehilangan stabilitas kolom. Riwayat penggunaan kendaraan yang sering digunakan untuk menerobos banjir dan sering mogok saat hujan memperkuat hipotesis kegagalan akibat *water hammer*.



Gambar 3. *Connecting Rod* yang Mengalami Buckling

4.2 Hasil Pengujian Spektrometri

Hasil pengujian spektrometri komposisi kimia *connecting rod* disajikan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Hasil Pengujian Spektrometri

Unsur	Standar AISI 4140 (Wt%)	Big End
C	0.38 - 0.43	0.233
Si	0.15 - 0.30	0.203
Mn	0.75 - 1	0.811
P	0.035	0.0059
S	0.04	0.108
Cr	0.80 - 1	0.217
Mo	0.3	0.0270
V	-	0.0222

Berdasarkan Tabel 3, terdapat beberapa unsur yang berada di luar rentang standar AISI 4140. Kadar karbon (C) terukur sebesar 0,233 Wt%, jauh di bawah rentang minimum standar (0,38–0,43 Wt%). Demikian pula unsur Cr sebesar 0,217 Wt% (standar 0,80–1,10 Wt%) dan Mo sebesar 0,0270 Wt% (standar 0,15–0,25 Wt%). Perlu dicatat bahwa metode spektrometri emisi optis berpotensi mengalami ketidakakuratan pengukuran, sehingga nilai aktual karbon dimungkinkan lebih tinggi dari yang terukur.

4.3 Hasil Pengujian Metalografi

Pengamatan struktur mikro pada Sampel II (dekat *buckling*) menunjukkan dominasi fasa ferit (berwarna terang) dan perlit (berwarna gelap berbentuk lamellar) yang tersebar merata pada seluruh penampang. Tidak ditemukan fasa martensit maupun *tempered martensite* pada seluruh area pengamatan, padahal berdasarkan standar proses produksi *connecting rod* yang optimal, material seharusnya melewati tahapan *quenching* dan *tempering* untuk menghasilkan struktur martensit temper.



Gambar 4. Hasil Metalografi Sampel IV

Sampel IV (jauh dari *buckling*) juga menunjukkan dominasi fasa ferit dan perlit dengan morfologi butiran yang lebih seragam dan halus dibandingkan Sampel II, mengindikasikan daerah ini tidak mengalami konsentrasi tegangan signifikan selama masa operasi. Kondisi ferit-perlit pada kedua sampel membuktikan bahwa *connecting rod* hanya mengalami pendinginan lambat (*normalized*) setelah proses *forging*, tanpa proses *quenching* dan *tempering* yang memadai.



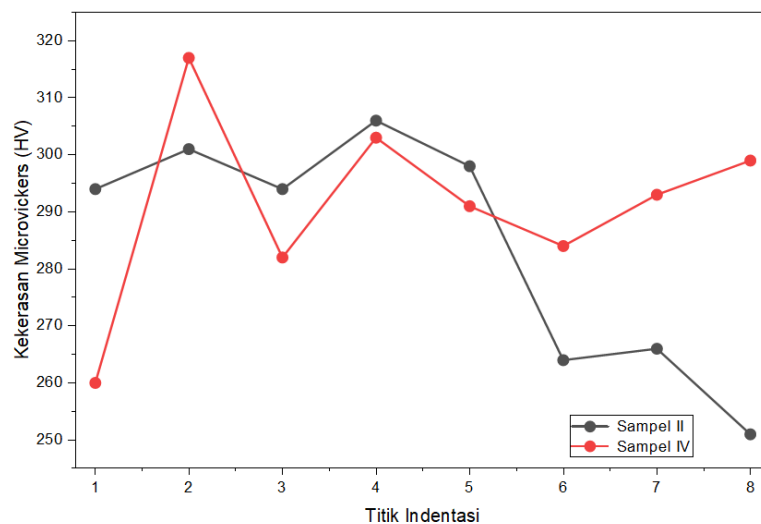
Gambar 5. Hasil Metalografi Sampel II

4.4. Hasil Pengujian Kekerasan

Hasil pengujian kekerasan Vickers pada Sampel II dan Sampel IV disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kekerasan Vickers

Load	Titik Indentasi	Sampel II – Dekat Buckling (HV)	Sampel IV – Jauh dari Buckling (HV)
500	1	294	260
500	2	301	317
500	3	294	282
500	4	306	303
500	5	298	291
500	6	264	284
500	7	266	293
	8	251	299
	Rata - rata	285,2	291,1

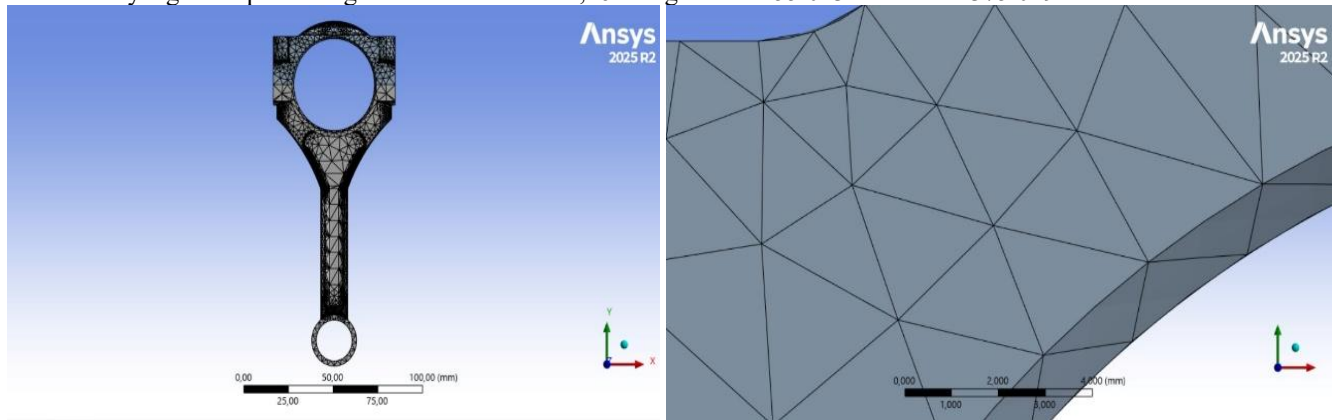


Gambar 6. Grafik Distribusi Kekerasan Pada Sampel II dan Sampel IV

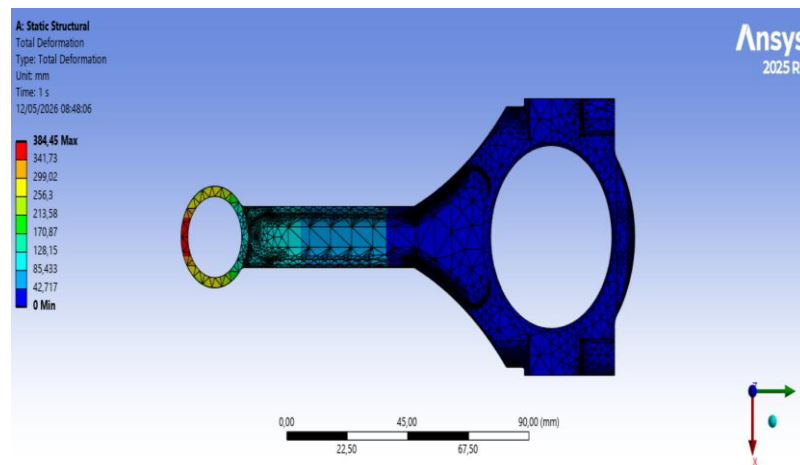
Nilai rata-rata kekerasan Sampel II (285,2 HV) lebih rendah dibandingkan Sampel IV (291,1 HV), mengindikasikan bahwa daerah yang mengalami kegagalan *buckling* memiliki kekerasan lebih rendah akibat deformasi plastis lokal dan degradasi material. Meskipun kedua nilai berada pada batas bawah rentang standar AISI 4140 setelah *quenching-tempering* (280–380 HV), kekerasan ini diperoleh melalui mekanisme *work hardening* akibat proses *forging*, bukan dari transformasi martensitik. Kekerasan hasil *forging* bersifat tidak merata dan tidak memiliki ketahanan *fatigue* serta ketahanan terhadap beban tekan aksial yang setara dengan kekerasan martensit, sehingga material tetap rentan mengalami kegagalan prematur pada kondisi operasional beban tinggi.

4.5. Hasil Simulasi Numerik

Simulasi numerik dilakukan untuk menganalisis tegangan dan mode *buckling* pada *connecting rod*. Dari meshing tetrahedral yang diterapkan dengan ukuran rata-rata 1,46 menghasilkan 55.0232 node dan 375.049 elemen.

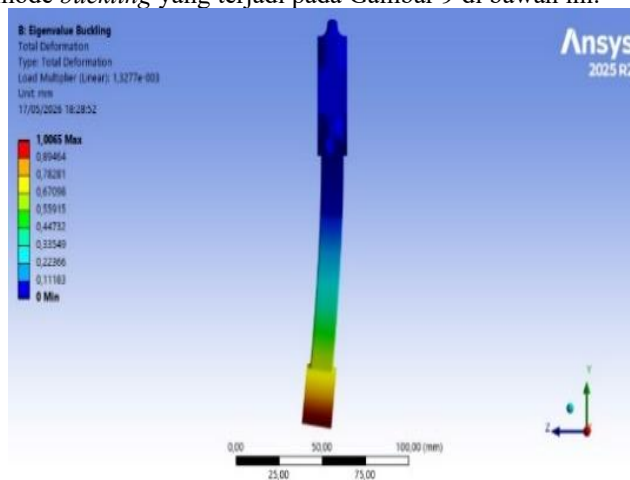


Gambar 7. Meshing Simulasi

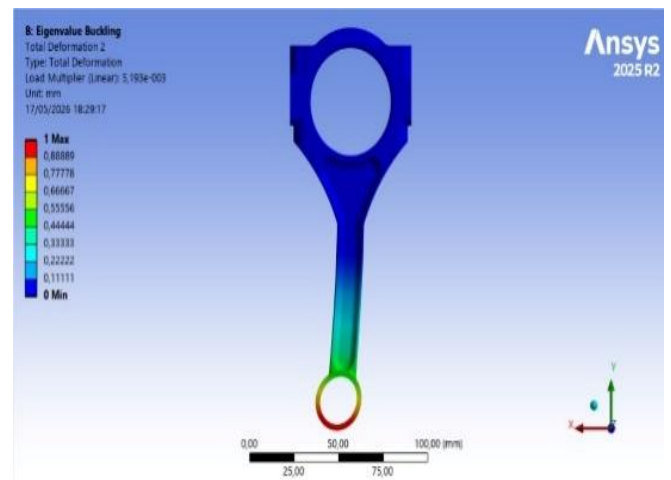


Gambar 8. Von Mises

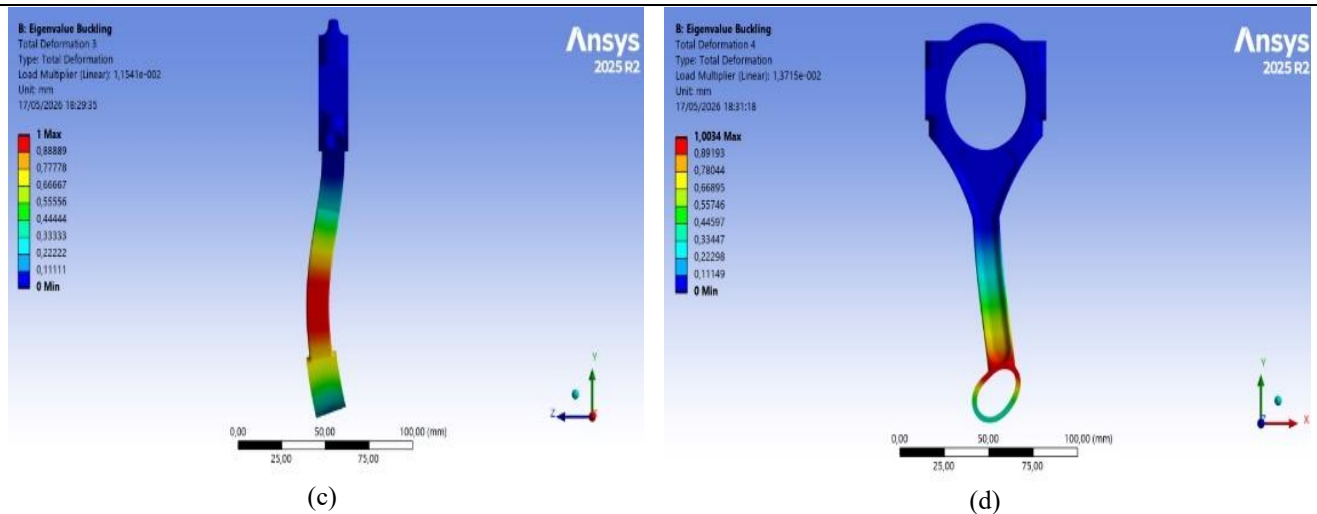
Simulasi analisis tegangan *Von Mises* dengan beban total 30 kN menunjukkan tegangan maksimum sebesar 384 MPa, nilai ini berada di bawah kekuatan luluh material AISI 4140 (415 MPa), menunjukkan komponen masih dalam kondisi elastis pada beban operasional normal. Pada analisis *buckling*, diberikan 13 mode akan ditampilkan 4 mode saja untuk mengamati kegagalan *buckling connecting rod* mana yang paling sama atau mendekati. Berikut merupakan hasil analisis dari beberapa mode *buckling* yang terjadi pada Gambar 9 di bawah ini.



(a)



(b)



Gambar 9. Mode Eigenvalue Buckling (a) Mode 1, (b) Mode 2, (c) Mode 3, dan (d) Mode 4

Pada analisis *eigenvalue buckling* dengan 13 mode yang diamati, Mode 2 merupakan mode yang paling mendekati pola kegagalan aktual yang terlihat di lapangan. Kegagalan *buckling* Mode 2 ditandai dengan titik tegangan maksimum yang terletak di daerah luasan terendah dari leher *connecting rod*, yaitu pada bagian *shank* dengan rasio ketebalan samping yang lebih kecil daripada ketebalan depan. Hal ini sesuai dengan deformasi lateral yang teramati secara fisik pada spesimen.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, kesimpulan dapat disusun sebagai berikut:

- Hasil pengujian metalografi pada kedua sampel menunjukkan dominasi fasa ferit dan perlit tanpa keberadaan martensit, yang membuktikan bahwa proses *quenching* dan *tempering* tidak dilaksanakan secara memadai. Nilai kekerasan rata-rata 285,2 HV (dekat *buckling*) dan 291,1 HV (jauh dari *buckling*) dicapai melalui mekanisme *work hardening* proses *forging*, bukan dari transformasi martensitik, sehingga material tidak memiliki ketahanan *fatigue* yang memadai.
- Penyebab kegagalan *connecting rod* adalah kombinasi antara rendahnya kualitas material akibat komposisi kimia yang tidak memenuhi standar AISI 4140 (kadar C = 0,233 Wt%, Cr = 0,217 Wt%, Mo = 0,027 Wt%) dan tidak adanya perlakuan panas yang memadai, sehingga *connecting rod* tidak mampu menahan beban kejut aksial akibat *water hammer* yang melebihi kapasitas kritis komponen.
- Simulasi numerik FEA menunjukkan bahwa tegangan Von Mises maksimum pada beban normal 30 kN sebesar 384 MPa masih di bawah kekuatan luluh (415 MPa). Analisis *eigenvalue buckling* mengidentifikasi Mode 2 sebagai mode yang paling mendekati pola kegagalan aktual, yaitu *buckling* lateral pada bagian *shank* di daerah penampang terkecil, yang diperberat oleh geometri *shank* yang ramping serta kelemahan material akibat proses produksi yang tidak memenuhi standar.

6. Daftar Pustaka

- Godara, S. S., Brenia, V., Soni, A. K., Singh Shekhawat, R., & Saxena, K. K. (2022). Design & Analysis of Connecting Rod Using ANSYS Software. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1896–1903. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.166>.
- Kumar, M., & Prajapati, S. N. (2017). Design, Buckling and Fatigue Failure Analysis of Connecting Rod: A Review. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 4(7), 39–44. <https://doi.org/10.22161/ijaers.4.7.7>.
- Pani, A. R., Patel, R. K., & Ghosh, G. K. (2019). Buckling Analysis and Material Selection of Connecting Rod to Avoid Hydro-lock Failure. *Materials Today: Proceedings*, 27, 2121–2126. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.079>.
- Lee, M. K., Lee, H., Lee, T. S., & Jang, H. (2010). Buckling Sensitivity of a Connecting Rod to the Shank Sectional Area Reduction. *Materials and Design*, 31(6), 2796–2803. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.01.010>.
- Strozzi, A., Baldini, A., Giacomini, M., Bertocchi, E., & Mantovani, S. (2016). A Repertoire of Failures in Connecting Rods for Internal Combustion Engines, and Indications on Traditional and Advanced Design Methods. *Engineering Failure Analysis*, 60, 20–39. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.034>.
- Callister, W. D. & Rethwisch, D. G. (2012). *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. 4th ed. Wiley.
- Dev Srivayas, P. & Charoo, M. S. (2019). Tribological Performance of Silicon Carbide-Reinforced Hybrid Aluminium Composite as a Connecting Rod Material. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, 1125–1136.
- Li, Z. (2024). Analysis of the Principle and Applications of Four-stroke Engines in Transportation. *Applied and Computational Engineering*, 98(1), 195–202. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/98/2024fmceau0113>.

-
- [9] Dev Srivivas, P., & Charoo, M. (2019). *ScienceDirect Application of Hybrid Aluminum Matrix Composite in Automotive Industry*.
- [10] Godara, S. S., Brenia, V., Soni, A. K., Singh Shekhawat, R., & Saxena, K. K. (2022). Design & analysis of connecting rod using ANSYS software. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1896–1903. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.166>