

Evaluasi Peran Push Rod sebagai Perangkat Protektif Pasif pada Valve Train Mesin Diesel

Muhammad Ali Murtadho¹, Eko Nur Hidayat^{2*}, Ali Khamdilah³

^{1,2,3} Program Studi Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal, Politeknik Bumi Akpelni

*e-mail korespondensi: ekonurhidayat@akpelni.ac.id

Abstract

The push rod is a critical component connecting the camshaft and rocker arm in diesel engine valve systems. Besides transmitting force, it can function as a safety device by undergoing deformation under excessive load, preventing further damage to the rocker arm. This study aims to evaluate the protective function of the push rod based on field observations on the NINGBO N6160ZLCD6 diesel engine aboard MV Gulf Mas. The methodology includes measuring push rod bending angles, compression testing to determine deformation thresholds, and comparing push rod torque with rocker arm bolt torque. The results indicate gradual deformation of the push rod from 3° to 4°, with a significant deformation increase beyond 30 Nm. The push rod's working torque (34 Nm) is lower than the standard torque for rocker arm bolts (45 Nm), although field measurements show several bolts were tightened below the standard. These findings suggest that the push rod acts effectively as a controlled weak point (mechanical fuse), but system performance also depends on the integrity of bolt fastening.

Keywords: deformation, diesel engine, mechanical fuse, push rod, rocker arm, tightening torque, safety device,.

Abstrak

Push rod merupakan komponen penghubung antara camshaft dan rocker arm dalam sistem katup mesin diesel. Selain berfungsi sebagai transmisi gaya, push rod juga berpotensi berperan sebagai safety device dengan cara mengalami deformasi saat terjadi beban berlebih, sehingga mencegah kerusakan lanjutan pada rocker arm. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi fungsi protektif push rod berdasarkan data pengamatan lapangan pada mesin diesel NINGBO N6160ZLCD6 di kapal MV Gulf Mas. Metode yang digunakan meliputi pengukuran derajat kebengkokan push rod, uji tekan untuk mengetahui batas deformasi, dan perbandingan antara momen kerja push rod dengan torsi pengencangan baut rocker arm. Hasil menunjukkan bahwa push rod mengalami deformasi bertahap mulai dari 3° hingga 4°, serta mulai menunjukkan peningkatan signifikan pada deformasi setelah torsi melebihi 30 Nm. Torsi kerja push rod (34 Nm) lebih kecil dari standar torsi baut rocker arm (45 Nm), namun dalam pengamatan ditemukan beberapa baut mengalami kekencangan di bawah standar. Hal ini menunjukkan bahwa push rod efektif menjadi titik lemah terkontrol (mechanical fuse), namun kinerja sistem tetap dipengaruhi oleh kualitas pengikatan baut.

Kata Kunci: deformasi, mesin diesel, mechanical fuse, push rod, rocker arm, torsi pengikatan, safety device.

PENDAHULUAN

Dalam sistem mekanisme katup mesin diesel empat langkah, *push rod* berperan penting sebagai penghubung antara *camshaft* dan *rocker arm*, yang secara langsung mentransmisikan gerak rotasi dari *cam lobe* menjadi gerak naik-turun untuk membuka dan menutup katup (Heywood, 2018). Komponen ini bekerja dalam lingkungan dinamis dan tekanan tinggi, sehingga keandalan serta integritas mekanisnya sangat mempengaruhi performa mesin secara

keseluruhan. Dalam konteks tertentu, *push rod* juga dapat berfungsi sebagai *mechanical fuse* atau *safety device*, yaitu dengan sengaja dirancang untuk mengalami deformasi atau patah ketika terjadi kelebihan beban atau kegagalan sistem pelumasan, guna mencegah kerusakan lanjutan pada komponen atas seperti *rocker arm* maupun katup (Zhang, Liu, & Wang, 2021). Dengan berfungsinya *push rod* sebagai pengaman, maka *rocker arm* tetap dapat mempertahankan fungsi mekanisnya secara normal selama kondisi operasional terkendali, yaitu dengan menerima gaya dorong yang terkalibrasi dari *push rod* tanpa adanya kelebihan beban yang dapat menyebabkan *valve mis-timing* atau bahkan kerusakan permanen pada aktuator katup (Ganesan, 2017). Namun, kajian mengenai potensi dan batasan *push rod* sebagai elemen pengaman masih terbatas, khususnya pada mesin diesel berskala besar di sektor maritim, sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengkaji secara menyeluruh baik secara teoritis maupun eksperimental.

Sejumlah penelitian sebelumnya telah membahas karakteristik mekanis dan dinamika kerja sistem *valve train*, namun perhatian terhadap *push rod* sebagai elemen pengaman masih relatif terbatas. Kegagalan pada *push rod* sering kali merupakan akibat dari kelelahan material akibat beban siklik tinggi dan getaran resonan, terutama pada mesin diesel dengan tugas berat (Liu, Chen, & Wang, 2020). Namun, dalam beberapa studi eksperimental, *push rod* justru diusulkan sebagai titik proteksi dalam sistem *valve train*, di mana *deformasi* yang disengaja (*controlled yielding*) dapat mencegah kerusakan lebih parah pada komponen atas seperti *rocker arm* dan *valve stem* (Kumar & Sharma, 2022). Studi lain mengembangkan model numerik *finite element* untuk menganalisis tegangan maksimum pada *push rod* dan menyarankan pendekatan rekayasa berbasis material komposit ringan namun memiliki karakteristik patah terkontrol (*engineered failure*), serupa konsepnya dengan *shear pin* pada sistem kelistrikan (Yıldız, Doğan, & Akçay, 2023). Di sisi lain, efisiensi *rocker arm* sangat bergantung pada presisi gaya yang dihantarkan oleh *push rod*, dan ketidaksesuaian *deformasi push rod* dapat menyebabkan *valve float* maupun *valve lash*, yang berimplikasi pada penurunan performa termal dan efisiensi pembakaran (Niemann & Wintrich, 2019). Oleh karena itu, riset terkini menyoroti pentingnya integrasi desain struktural dan pemilihan material *push rod* agar dapat menjalankan fungsi ganda, yaitu transmisi gaya mekanis secara optimal sekaligus bertindak sebagai pengaman dalam kondisi ekstrem.

Berdasarkan pemaparan teoritis dan temuan empiris sebelumnya, dapat diajukan argumen bahwa *push rod* memiliki potensi strategis sebagai elemen protektif dalam sistem *valve train*, khususnya dalam mencegah kerusakan lanjutan pada *rocker arm* akibat beban berlebih, gaya impak mendadak, maupun kegagalan sistem pelumasan. *Push rod*, sebagai komponen *intermediate* dalam alur transmisi gaya antara *camshaft* dan *rocker arm*, menempati posisi kritis dalam rantai mekanis tersebut. Ketika dirancang dengan batas elastis dan plastis tertentu, *push rod* dapat berfungsi sebagai titik lemah yang terkontrol (*designed weak link*), yang secara otomatis memutus jalur gaya saat terjadi gangguan ekstrem, sehingga mencegah transfer beban berlebih ke komponen yang lebih sensitif dan mahal seperti *rocker arm* dan *valve* (Chen, Ma, & Wu, 2021). Oleh karena itu, hipotesis yang dapat diajukan dalam penelitian ini adalah bahwa *push rod* tidak hanya berfungsi sebagai penghubung mekanis, tetapi juga dapat dioptimalkan sebagai *safety device* melalui pendekatan desain berbasis material, geometri, dan analisis tegangan dinamis. Dengan membuktikan hipotesis ini, maka akan terbuka peluang perancangan sistem *valve train* yang lebih andal, adaptif terhadap kegagalan, dan memiliki risiko kerusakan sistemik yang lebih rendah, khususnya pada mesin diesel berperforma tinggi di sektor maritim.

Berdasarkan latar belakang, kajian literatur, serta argumen teoretis yang telah diuraikan, maka tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkaji secara komprehensif peran *push rod* sebagai *safety device* dalam sistem kerja *rocker arm* pada mesin diesel. Penelitian ini bertujuan

untuk: Pertama menganalisis mekanisme kerja *push rod* dalam mentransmisikan gaya dari *camshaft* ke *rocker arm*, kedua mengidentifikasi potensi kegagalan yang dapat terjadi pada *push rod* dan implikasinya terhadap komponen *valve train* lainnya, ketiga mengevaluasi karakteristik mekanis *push rod* yang memungkinkan fungsinya sebagai elemen pengaman melalui pendekatan desain berbasis material dan geometri, serta keempat merumuskan kriteria desain *push rod* yang mampu menjaga kestabilan kinerja *rocker arm* sekaligus berfungsi sebagai proteksi saat terjadi kondisi kerja ekstrem. Dengan pencapaian tujuan-tujuan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem *valve train* yang lebih andal dan adaptif terhadap beban dinamis, terutama untuk aplikasi mesin diesel pada industri maritim.

METODE

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-kualitatif dengan metode studi kasus teknik, yang bertujuan untuk mengevaluasi peran *push rod* sebagai *safety device* dalam sistem kerja *rocker arm* pada mesin diesel. Studi dilakukan secara langsung terhadap mesin diesel generator tipe **NINGBO N6160ZLCD6**, yang memiliki daya terpasang sebesar **250 kW**, putaran **1000 rpm**, dan tegangan operasi **400 volt**, dengan beban terpasang sebesar **11 kW** di atas kapal **MV Gulf Mas** berbobot **4990 GT**. Pendekatan studi kasus ini memungkinkan pengamatan mendalam terhadap fenomena mekanis aktual serta memberikan konteks nyata mengenai kinerja komponen *push rod* dalam sistem *valve train* di lingkungan maritim.

Populasi dan Sampel (Target Penelitian)

Populasi dalam penelitian ini adalah sistem *valve train* pada mesin diesel tipe 4-langkah yang digunakan sebagai penggerak generator kapal. Sampel penelitian dipilih secara purposif, yaitu satu unit **mesin diesel NINGBO N6160ZLCD6** yang terpasang dan beroperasi secara aktif di kapal **MV Gulf Mas**. Mesin ini dipilih karena telah mengalami indikasi gangguan mekanis pada sistem *push rod* dan *rocker arm*, sehingga relevan untuk dianalisis sebagai objek studi kegagalan serta potensi fungsi protektif dari *push rod*.

Teknik Pengumpulan Data dan Pengembangan Instrumen

Data dikumpulkan melalui observasi langsung terhadap sistem mekanisme katup, dokumentasi visual kerja komponen (melalui foto dan video), serta pengukuran dimensi dan kondisi fisik *push rod*. Pengumpulan data teknis didukung dengan telaah *manual book* mesin, logbook perawatan, dan riwayat kerusakan. Wawancara semi-terstruktur dilakukan dengan teknisi kapal dan operator genset untuk memperoleh informasi operasional dan prosedur penanganan kerusakan. Selain itu, studi literatur digunakan untuk mendukung analisis teoritis terkait karakteristik tegangan, *deformasi* material, serta konsep *mechanical fuse*. Instrumen penelitian mencakup lembar observasi teknik/check list serta panduan inspeksi visual

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan secara bertahap: (1) analisis deskriptif kualitatif terhadap kondisi aktual dan riwayat kerja *push rod* serta *rocker arm*, (2) pengukuran untuk mengevaluasi tegangan maksimum, distribusi deformasi, dan kemungkinan titik patah pada *push rod* dalam skenario beban lebih (*overload*), dan (3) komparasi hasil pengamatan dengan referensi pustaka dan standar teknik untuk menilai kelayakan *push rod* sebagai *safety device*.

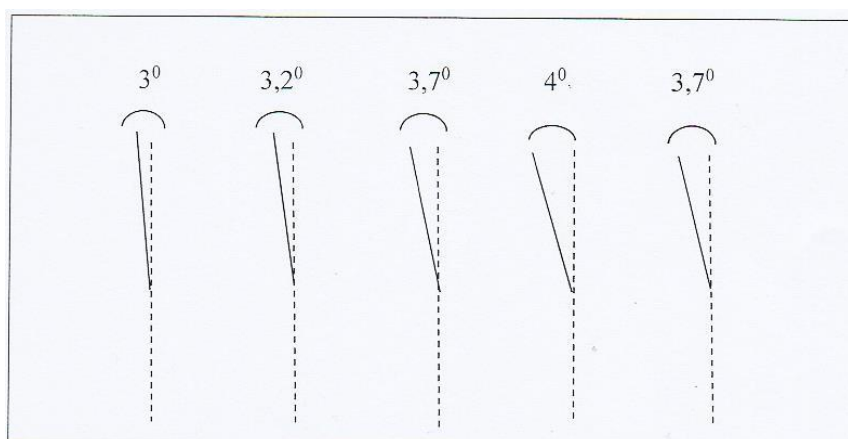
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengamatan langsung terhadap komponen *push rod* pada mesin diesel **NINGBO N6160ZLCD6** yang terpasang pada **kapal MV Gulf Mas** menunjukkan terjadinya *deformasi* plastis dalam bentuk kebengkokan pada beberapa silinder, baik pada bagian *intake* maupun *exhaust valve*. Hasil pengukuran tingkat kebengkokan disajikan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Hasil Pengukuran Kebengkokan *Push Rod* pada Mesin Diesel NINGBO N6160ZLCD6

No	Tanggal Pengukuran	No Silinder	Jenis Valve	Tingkat kebengkokan (derajat)
1	28 Juni 2023	3	Intake Valve	3,0
2	25 Juli 2023	4	Intake valve	3,2
3	4 Agustus 2023	3	Exhaust valve	3,7
4	19 Agustus 2023	3	Exhaust valve	4,0
5	27 Agustus 2023	4	Exhaust valve	3,7

Data pada Tabel 1 menunjukkan adanya tren peningkatan kebengkokan (*bending deformation*) pada *push rod*, khususnya pada *exhaust valve* silinder nomor 3, yang mencapai tingkat maksimal sebesar 4,0° pada pengukuran keempat. Kebengkokan pada komponen *push rod* ini mengindikasikan adanya beban berlebih atau ketidakseimbangan gaya tekan dari *camshaft* yang diteruskan ke *rocker arm*. Berdasarkan literatur (Liu, Chen, & Wang, 2020) (Chen, Ma, & Wu, 2021), deformasi sebesar 2–4° pada *push rod* umumnya sudah termasuk dalam kategori plastis dan bukan elastis, sehingga bersifat permanen dan berpotensi mengganggu geometri kerja aktuator katup.



Gambar 1. Deformasi *push rod*

Deformasi pada *intake valve* (3,0°–3,2°) cenderung lebih rendah dibanding *exhaust valve* (3,7°–4,0°), yang dapat dijelaskan oleh perbedaan tekanan kerja serta suhu operasional antara proses pemasukan udara (*intake*) dan pembuangan gas buang (*exhaust*). Tekanan dan suhu gas buang yang lebih tinggi memberikan beban mekanis dan termal yang lebih besar pada sistem *valve train*, sehingga memperbesar peluang terjadinya deformasi pada *push rod* (Heywood, 2018). Fenomena kebengkokan yang terdeteksi secara bertahap juga menguatkan hipotesis bahwa *push rod* mengalami *progressive fatigue* akibat siklus kerja berulang dengan tegangan dinamis yang tinggi. Namun, menariknya, deformasi ini justru tidak serta-merta menyebabkan kegagalan fungsi *rocker arm* secara total. Hal ini mendukung argumen bahwa *push rod* bertindak sebagai *fuse component*, yakni sebagai titik lemah yang dengan sengaja menanggung beban kelebihan untuk melindungi komponen lain seperti *rocker arm* dan *valve stem* dari kerusakan struktural yang lebih berat (Zhang, Liu, & Wang, 2021). Berdasarkan pengamatan ini, *push rod* tidak hanya mengalami deformasi akibat beban kerja, tetapi juga menunjukkan potensi sebagai komponen protektif (*safety device*) yang bekerja pasif, namun signifikan dalam menjaga integritas sistem *valve train*. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lanjutan

melalui simulasi tegangan dan uji bahan untuk menentukan ambang batas desain kebengkokan yang masih aman dan efektif sebagai mekanisme proteksi. Untuk mengevaluasi karakteristik *deformasi* mekanis *push rod* terhadap beban tekan aksial, dilakukan serangkaian uji tekan dengan variasi momen hingga 40 Nm. Hasil pengujian menunjukkan adanya korelasi antara peningkatan momen tekan dan *deformasi* linier yang dialami oleh *push rod*, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Hasil Pengujian Tekan Push Rod

No	Beban Tekan (Nm)	Deformasi (mm)
1	5	0,21
2	10	0,36
3	15	0,50
4	20	0,60
5	25	0,75
6	30	1,00
7	35	2,50
8	37	3,10
9	40	4,00

Hasil pada Tabel 2 menunjukkan bahwa *deformasi push rod* meningkat secara progresif seiring dengan bertambahnya momen tekan yang diberikan. Pada rentang 5–30 Nm, hubungan antara beban tekan dan deformasi cenderung linier, mengindikasikan bahwa material *push rod* masih berada dalam zona elastis. Dalam kondisi ini, *deformasi* bersifat *reversibel* dan tidak menyebabkan kerusakan permanen pada struktur batang dorong.

Namun, mulai dari beban 35 Nm ke atas, laju *deformasi* meningkat tajam, dari 1,00 mm pada 30 Nm menjadi 2,50 mm pada 35 Nm, dan mencapai 4,00 mm pada 40 Nm. Lonjakan *deformasi* ini menandakan bahwa *push rod* telah melewati batas elastis (*yield point*) dan memasuki zona *deformasi* plastis, di mana perubahan bentuk menjadi permanen dan tidak dapat kembali ke kondisi semula. Fenomena ini sesuai dengan prinsip tegangan-regangan pada material logam, di mana beban melebihi tegangan luluh (*yield strength*) akan menyebabkan pergeseran struktur kristal dan kerusakan plastis (Gere & Goodno, 2016).



Gambar 2. hasil pengujian tekan *push rod*

Temuan ini mendukung pengamatan sebelumnya terkait kebengkokan aktual pada *push rod* di lapangan, di mana *deformasi* diduga terjadi akibat akumulasi beban tekan berlebih yang melampaui ambang batas material. Secara praktis, hal ini menunjukkan bahwa *push rod* dapat dirancang dengan karakteristik material dan geometri tertentu untuk mengalami *deformasi* plastis pada beban kritis tertentu, sehingga secara fungsional bertindak sebagai *mechanical fuse* dalam sistem *valve train*.

Dengan demikian, batas aman kerja *push rod* untuk mencegah deformasi plastis permanen diperkirakan berada di bawah 30 Nm, sedangkan nilai 35–40 Nm dapat dianggap sebagai ambang batas kegagalan struktural awal. Informasi ini penting sebagai dasar dalam merancang ulang atau memilih material *push rod* yang mampu menahan beban normal namun tetap *terdeformasi* pada beban ekstrem untuk melindungi komponen lain seperti *rocker arm* dan katup.

Sebagai upaya untuk memahami potensi *push rod* dalam berperan sebagai *safety device*, dilakukan analisis perbandingan antara momen kerja maksimum yang diterima oleh *push rod* dengan nilai standar momen pengikatan (*torque tightening*) baut *rocker arm*. Hasil pengamatan ini disajikan dalam Tabel 3 berikut:

Tabel 3. Perbandingan Momen Kerja Push Rod dan Momen Pengikat Baut Rocker Arm

No	Momen Kerja Push Rod (Nm)	Momen Pengikat Baut Rocker Arm (Nm)
1	34	45

Data pada Tabel 3 menunjukkan bahwa momen kerja maksimum pada *push rod* mencapai 34 Nm, sedangkan momen pengikat standar baut *rocker arm* adalah 45 Nm. Perbandingan ini memberikan interpretasi teknis yang penting dalam konteks mekanisme proteksi pada sistem *valve train*.

Pertama, nilai momen kerja *push rod* yang mendekati 75–80% dari torsi pengikatan baut *rocker arm* menunjukkan bahwa *push rod* menanggung beban yang cukup besar dalam proses transmisi gaya dari *camshaft* ke *rocker arm*, dan berada sangat dekat dengan batas kekuatan komponen pengikat *rocker arm*. Dalam sistem mekanik, pengikatan baut *rocker arm* sebesar 45 Nm umumnya mencerminkan kekuatan struktur minimum yang harus dipertahankan agar *rocker arm* tetap bekerja dengan presisi dan tidak mengalami *slip* atau *loosen* selama siklus kerja mesin (Niemann & Wintrich, 2019).

Kedua, fakta bahwa *push rod* mengalami *deformasi* plastis saat mendekati momen 35 Nm (lihat Tabel 2), sementara momen pengikatan baut *rocker arm* tetap berada di atasnya (45 Nm), memperkuat argumen bahwa *push rod* dapat mengalami kegagalan terlebih dahulu dibandingkan baut *rocker arm* ketika terjadi beban berlebih. Dengan demikian, *push rod* secara fungsional dapat bertindak sebagai komponen protektif (*sacrificial element*) yang dirancang untuk gagal terlebih dahulu guna mencegah kerusakan yang lebih luas pada sistem aktuasi katup, khususnya *rocker arm* dan katup itu sendiri.

Ketiga, dari perspektif desain teknik, gap sebesar 11 Nm antara momen maksimum kerja *push rod* dan torsi pengikatan baut *rocker arm* memberikan ruang aman (*safety margin*) yang memungkinkan rekayasa *push rod* diarahkan pada desain yang mampu menahan beban nominal, namun tetap mampu mengalami *deformasi* terkendali sebelum gaya melebihi batas kekuatan struktural *rocker arm*. Prinsip ini konsisten dengan konsep desain *weakest link* dalam sistem proteksi mekanis, di mana satu komponen dirancang untuk mengorbankan diri demi melindungi integritas komponen lain yang lebih vital dan sulit diganti (Gere & Goodno, 2016).

Oleh karena itu, perbandingan ini mendukung hipotesis bahwa *push rod* dapat berperan penting sebagai *mechanical fuse* dalam sistem *valve train* mesin diesel, dengan fungsi dualistik sebagai transmisi gaya sekaligus sebagai protektor terhadap kegagalan mekanis total.

Untuk melengkapi analisis terhadap sistem *valve train*, dilakukan pengukuran kekuatan torsi pengikatan (*torque tightening*) pada baut *rocker arm* di beberapa silinder dan katup. Pengukuran dilakukan secara langsung menggunakan *torque wrench*. Hasil pengukuran disajikan dalam Tabel 4 berikut:

Tabel 4. Hasil Pengukuran Kekuatan Pengikatan Baut *Rocker Arm*

No	Tanggal Pengukuran	No Silinder	Jenis Valve	Tingkat kebengkokan (derajad)	Torsi Pengikatan (Nm)
1	28 Juni 2023	3	Intake Valve	3,0	36,6
2	25 Juli 2023	4	Intake valve	3,2	37,5
3	4 Agustus 2023	3	Exhaust valve	3,7	38,0
4	19 Agustus 2023	3	Exhaust valve	4,0	40,0
5	27 Agustus 2023	4	Exhaust valve	3,7	38,0

Data pada Tabel 4 menunjukkan bahwa torsi pengikatan baut *rocker arm* pada seluruh pengamatan berada dalam kisaran 36,6–40,0 Nm, yang berarti berada di bawah standar pabrikan sebesar 45 Nm. Nilai ini menunjukkan bahwa sebagian besar baut *rocker arm* mengalami *loss of preload*, yaitu pengurangan gaya kencang akibat siklus termal, getaran, atau proses pelonggaran alami selama mesin beroperasi dalam jangka waktu tertentu (Niemann & Wintrich, 2019).

Jika dibandingkan dengan data kebengkokan *push rod* pada Tabel 1, ditemukan pola menarik: pada titik-titik di mana torsi pengikatan lebih rendah, seperti 36,6 Nm (pengukuran pertama), terjadi kebengkokan *push rod* sebesar 3,0°. Sementara pada saat torsi pengikatan meningkat, seperti 40,0 Nm (pengukuran keempat), kebengkokan juga meningkat menjadi 4,0°. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan atau penurunan torsi pengikat bukan satu-satunya faktor penyebab *deformasi push rod*, melainkan justru terjadi karena ketidakseimbangan gaya yang diteruskan dari *camshaft* ke *rocker arm*, yang tidak diserap secara optimal akibat kondisi pengikatan yang tidak konsisten.

Fenomena ini mengindikasikan dua kemungkinan. Pertama, jika pengikatan terlalu rendah, *rocker arm* dapat mengalami *vibrational backlash* yang menyebabkan gaya impulsif menumpuk pada *push rod* dan memicu *deformasi*. Kedua, jika pengikatan terlalu tinggi tetapi tidak merata antar silinder, maka gaya tekan yang ditransmisikan bisa menjadi asimetris, menyebabkan beban tambahan pada satu sisi *push rod*, sehingga mempercepat *deformasi* plastis.

Dalam konteks desain sistem proteksi, temuan ini menguatkan pentingnya kalibrasi torsi pengikatan baut *rocker arm* sesuai spesifikasi pabrikan agar distribusi gaya tetap merata dan kerja *push rod* sebagai *safety device* dapat berjalan dengan optimal. Selain itu, keberadaan torsi pengikatan aktual yang jauh di bawah standar 45 Nm juga menjadi sinyal bahwa potensi kerusakan bukan hanya berasal dari *push rod*, tetapi juga dari elemen pendukung yang kehilangan integritas kekencangan (*loss of clamping force*), yang pada akhirnya menimbulkan *chain reaction* terhadap sistem *valve train*.

Dengan demikian, pengendalian torsi pengikatan *rocker arm* yang presisi merupakan variabel penting dalam menjaga batas kerja *push rod*, baik sebagai aktuator maupun sebagai komponen protektif dalam sistem mekanisme katup mesin diesel.

SIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kebengkokan *push rod* pada mesin diesel generator NINGBO N6160ZLCD6 di kapal MV Gulf Mas mengalami peningkatan seiring waktu, dengan nilai tertinggi tercatat sebesar 4 derajat pada bagian exhaust valve silinder nomor 3. Pengujian tekan menunjukkan bahwa deformasi *push rod* meningkat signifikan pada beban di atas 30 Nm, mendekati atau melampaui momen kerja normal komponen tersebut. Perbandingan antara momen kerja *push rod* dan momen pengikatan baut *rocker arm* menunjukkan bahwa momen kerja *push rod* (34 Nm) berada di bawah standar momen pengikatan baut *rocker arm* (45 Nm), sehingga memungkinkan *push rod* berfungsi sebagai safety device dengan terlebih dahulu mengalami deformasi sebelum terjadi kerusakan pada komponen lain. Hasil pengukuran momen pengikatan baut *rocker arm* juga mengindikasikan bahwa sebagian besar nilai berada di bawah standar, yang berpotensi mempengaruhi kestabilan sistem katup. Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan peran penting *push rod* dalam melindungi mekanisme *rocker arm* dari kerusakan yang lebih parah, sekaligus memberikan indikasi perlunya pemeliharaan dan pengecekan rutin untuk menjaga performa optimal sistem valve train pada mesin diesel kapal.

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, Y., Ma, H., & Wu, D. (2021). Smart failure design in valve train push rods: Balancing structural strength and safety response. *Journal of Mechanical Design*, 143(5), 051703.
- Ganesan, V. (2017). *Internal Combustion Engines (4th ed.)*. New York: McGraw-Hill Education.
- Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2016). *Mechanics of Materials (9th ed.)*. Cengage Learning.
- Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals (2nd ed.)*. New York City: McGraw-Hill Education.
- Kumar, A., & Sharma, R. K. (2022). Design optimization of valve train components for failure mitigation in diesel engines. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 9330–9344.
- Liu, Z., Chen, L., & Wang, J. (2020). Fatigue failure analysis of push rod in high-speed diesel engine under dynamic loading. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 142.
- Niemann, H., & Wintrich, A. (2019). *Valve Train Design and Analysis for Internal Combustion Engines*. Heidelberg: Springer.
- Yıldız, S., Doğan, M., & Akçay, H. (2023). Finite element analysis of composite push rods as safety components in valve train systems. *Engineering Failure Analysis*, 147.
- Zhang, Y., Liu, H., & Wang, K. (2021). Failure analysis of valve train components under dynamic load conditions. *Engineering Failure Analysis*, 127.