

Analisis Kegagalan *Self Moving Steering* Akibat Degradasi Sensor Potensiometer Pada Kawasaki Rexpeller Thruster Untuk Operasi Kapal *Harbour Tug*

Fajar Pujiyanto^{1*}, Annisa Kesy Garside²

^{1*} Politeknik Bumi Akpelni Semarang, Indonesia

² Universitas Muhammadiyah Malang, Indonesia

Alamat: Jl. Pawiyatan Luhur II No.17, Bendan Duwur, Kecamatan Gajahmungkur, Semarang, 50235

Korespondensi penulis: fajar.pujiyanto@akpelni.ac.id,

Abstract. *The reliability of the steering system on harbour tugboats is strongly influenced by the ability of the control system to maintain the thruster angle according to the operator's command. The Kawasaki Rexpeller Thruster uses a closed-loop steering control system that integrates a position sensor, Electronic Control Unit (ECU), hydraulic actuator, and propulsion unit. This study aims to analyze the causes of self-moving steering and evaluate the relationship between potentiometer sensor degradation and steering system performance. The study employed an Engineering Failure Analysis approach through direct observation, measurement of potentiometer resistance and output voltage at various thruster angles, and comparison of actual measurements with the manufacturer's reference values. The results showed that the steering response time for a 45° angle change was 2.8 seconds, compared with the reference limit of ≤ 2.0 seconds, while thruster position accuracy was 91%, below the required value of $\geq 95\%$. Sensor measurements identified local anomalies at 50°, 70°, 90°, and 110°. At 50°, the voltage increased from 1.39 V to 2.10 V, representing a deviation of approximately 51.1%. At 70°, resistance increased from 3.89 k Ω to 5.09 k Ω , or approximately 30.8%. At 90°, the voltage decreased from 2.50 V to 2.00 V, representing a 20% deviation, while at 110°, resistance decreased from 6.11 k Ω to 5.11 k Ω , or approximately 16.4%. These deviations can cause discrepancies between the commanded position and feedback position, resulting in repeated corrective actions by the ECU and consequently producing self-moving steering. The findings indicate that potentiometer degradation is a strong indication of a dominant factor associated with the steering disturbance. However, further inspection of the ECU, feedback wiring, joystick controller, hydraulic actuator, and hydraulic pressure is required to confirm the root cause comprehensively.*

Keywords: *potentiometer, self-moving steering, Rexpeller Thruster, Engineering Failure Analysis, condition monitoring.*

Abstrak. Keandalan sistem steering pada kapal harbour tug sangat dipengaruhi oleh kemampuan sistem kontrol dalam mempertahankan posisi sudut thruster sesuai perintah operator. Kawasaki Rexpeller Thruster menggunakan sistem steering berbasis closed-loop control yang mengintegrasikan sensor posisi, Electronic Control Unit (ECU), aktuator hidrolik, dan unit propulsi. Penelitian ini bertujuan menganalisis penyebab terjadinya self-moving steering dan mengevaluasi hubungan antara degradasi sensor potensiometer dengan gangguan kinerja sistem steering. Penelitian menggunakan pendekatan Engineering Failure Analysis melalui observasi langsung, pengukuran resistansi dan tegangan keluaran potensiometer pada variasi sudut 0°–360°, serta perbandingan antara data aktual dan nilai acuan pabrikan. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa waktu respons steering pada perubahan sudut 45° mencapai 2,8 detik dibandingkan batas acuan $\leq 2,0$ detik, sedangkan akurasi posisi thruster sebesar 91% dibandingkan persyaratan $\geq 95\%$. Pengukuran sensor menunjukkan anomali lokal pada sudut 50°, 70°, 90°, dan 110°. Pada sudut 50° terjadi kenaikan tegangan dari 1,39 V menjadi 2,10 V atau sekitar 51,1%, pada sudut 70° resistansi meningkat dari 3,89 k Ω menjadi 5,09 k Ω atau sekitar 30,8%, pada sudut 90° tegangan turun dari 2,50 V menjadi 2,00 V atau 20%, dan pada sudut 110° resistansi turun dari 6,11 k Ω menjadi 5,11 k Ω atau sekitar 16,4%. Penyimpangan tersebut menyebabkan ketidaksesuaian antara command position dan feedback position sehingga ECU memberikan koreksi terhadap aktuator secara berulang dan memunculkan fenomena self-moving steering. Temuan menunjukkan bahwa degradasi potensiometer merupakan indikasi kuat terhadap gangguan sistem steering, meskipun pemeriksaan terhadap ECU, rangkaian kabel, dan aktuator tetap diperlukan untuk memastikan akar penyebab secara menyeluruh.

Kata kunci: potensiometer, self-moving steering, Rexpeller Thruster, Engineering Failure Analysis, condition monitoring.

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan sistem propulsi kapal telah meningkatkan penggunaan sistem azimuth propulsion yang memungkinkan arah gaya dorong diubah melalui rotasi unit propulsi. Kemampuan tersebut memberikan keunggulan dalam manuver kapal, terutama pada kapal harbour tug yang banyak melakukan kegiatan olah gerak pada kecepatan rendah, seperti sandar, lepas sandar, dan manuver di area pelabuhan. Sistem azimuth thruster mempunyai karakteristik manuver yang berbeda dari sistem propulsi dengan rudder konvensional karena arah gaya dorong dapat diatur melalui perubahan sudut unit thruster. Penelitian mengenai respons dinamis sistem hidrolik azimuth thruster menunjukkan bahwa perubahan sudut, kecepatan sudut, dan karakteristik respons sistem steering merupakan bagian penting dalam kinerja azimuth thruster (Liu et al., 2023).

Kawasaki Rexpeller Thruster merupakan sistem propulsi yang memungkinkan perubahan arah gaya dorong melalui rotasi unit thruster hingga 360°. Kemampuan tersebut menjadikan sistem steering sebagai bagian penting dalam mendukung kemampuan manuver kapal. Sistem steering terdiri atas beberapa subsistem yang saling berhubungan, antara lain steering joystick controller, sensor posisi, Electronic Control Unit (ECU), hydraulic actuator, hydraulic pump, feedback circuit, steering control panel, dan unit Rexpeller Thruster. Gangguan pada salah satu komponen dapat menyebabkan ketidaksesuaian antara posisi yang diperintahkan dan posisi aktual thruster.



Gambar 1. Kawasaki Rexpeller Thruster

Salah satu komponen penting dalam sistem tersebut adalah rotary potentiometer yang berfungsi sebagai sensor posisi. Sensor mengubah perubahan posisi mekanis menjadi perubahan resistansi dan tegangan listrik yang selanjutnya digunakan sebagai sinyal umpan balik oleh ECU. Pada sistem closed-loop control, informasi umpan balik tersebut dibandingkan dengan posisi yang diperintahkan. Apabila terdapat perbedaan antara posisi perintah dan posisi umpan balik, ECU akan menghasilkan sinyal koreksi untuk menggerakkan aktuator.

Permasalahan muncul ketika karakteristik keluaran potensiometer mengalami penyimpangan. Perubahan resistansi atau tegangan yang tidak sesuai dengan posisi mekanis dapat menyebabkan ECU menerima informasi posisi yang tidak merepresentasikan kondisi aktual thruster. Akibatnya, ECU dapat memberikan koreksi secara berulang meskipun operator tidak memberikan perubahan perintah. Kondisi tersebut dapat menghasilkan fenomena self-moving steering, yaitu pergerakan sudut thruster tanpa adanya perintah langsung dari operator.



Gambar 2. Potensiometer CPP-45(Midori, 2020)

Pada penelitian ini, fenomena self-moving steering ditemukan pada sistem steering Kawasaki Rexpeller Thruster yang digunakan pada kapal harbour tug di area operasi Pelabuhan Tanjung Mas Semarang. Gejala yang diamati berupa ketidakstabilan respons steering, keterlambatan perubahan sudut, dan pergerakan thruster tanpa perintah operator. Kondisi tersebut berpotensi mengurangi ketepatan manuver kapal dan meningkatkan risiko operasional, khususnya ketika kapal melakukan kegiatan sandar dan lepas sandar.



Gambar 3. Aktual Indikator Sudut Steering Thruster

Penelitian mengenai condition monitoring azimuth thruster sebelumnya telah menunjukkan bahwa pemantauan parameter kondisi dapat digunakan untuk mengidentifikasi indikasi gangguan sebelum berkembang menjadi kegagalan yang lebih serius (Nikula et al., 2021). Namun, penelitian tersebut berfokus pada pemantauan kondisi berdasarkan pengukuran percepatan dan belum secara khusus membahas hubungan antara degradasi lokal sensor posisi potensiometer, kesalahan feedback, dan fenomena self-moving steering pada Kawasaki Rexpeller Thruster.

Penelitian mengenai sistem hidrolik azimuth thruster juga telah membahas karakteristik respons sudut dan dinamika sistem steering (Liu et al., 2023). Sementara itu, penelitian mengenai pemeliharaan peralatan kapal menunjukkan pentingnya penggunaan pendekatan berbasis kondisi untuk menentukan waktu dan jenis tindakan pemeliharaan (Song et al., 2022). Dengan demikian, masih terdapat ruang penelitian untuk menghubungkan secara langsung karakteristik sinyal sensor posisi dengan gangguan aktual sistem steering pada operasi harbour tug.

Kebaruan penelitian ini terletak pada identifikasi hubungan antara penyimpangan lokal karakteristik resistansi dan tegangan potensiometer dengan munculnya self-moving steering pada Kawasaki Rexpeller Thruster berdasarkan data pengukuran langsung di kapal. Penelitian tidak hanya mengidentifikasi adanya kerusakan sensor, tetapi juga menganalisis mekanisme hubungan antara perubahan sinyal sensor, kesalahan feedback ECU, respons aktuator, dan konsekuensi terhadap keandalan sistem steering.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan: (1) mengidentifikasi bentuk kegagalan pada sistem steering Rexpeller Thruster; (2) menganalisis karakteristik resistansi dan tegangan sensor potensiometer pada berbagai sudut thruster; (3) mengevaluasi hubungan antara penyimpangan sensor dan fenomena self-moving steering; serta (4) menyusun rekomendasi pemeliharaan untuk meningkatkan keandalan sistem steering.

2. KAJIAN TEORITIS

Rexpeller dan Azimuth Thruster

Azimuth thruster merupakan unit propulsi yang memungkinkan arah gaya dorong diubah melalui rotasi unit propulsi terhadap sumbu vertikal. Kemampuan rotasi tersebut memberikan fleksibilitas tinggi dalam manuver kapal. Sistem steering azimuth thruster pada umumnya melibatkan sistem hidrolik atau elektromekanis yang dikendalikan melalui sistem kontrol tertutup.

Respons sistem steering dipengaruhi oleh karakteristik aktuator, sistem hidrolik, sistem transmisi, serta sistem umpan balik posisi. Liu et al. (2023) menunjukkan bahwa karakteristik respons sistem hidrolik berpengaruh terhadap kemampuan unit azimuth thruster dalam mengikuti sudut yang diperintahkan.

Sensor Potensiometer sebagai Position Feedback

Potensiometer merupakan sensor posisi yang menghasilkan perubahan resistansi sesuai dengan perubahan posisi mekanis. Dalam sistem steering, sinyal tersebut dapat dikonversi menjadi tegangan dan digunakan sebagai informasi posisi aktual oleh sistem kontrol.

Secara ideal, hubungan antara sudut mekanis dan keluaran sensor bersifat linier. Penyimpangan lokal pada jalur resistif atau kontak sensor dapat menyebabkan perubahan resistansi dan tegangan yang tidak sesuai dengan posisi aktual. Kondisi tersebut dapat menghasilkan kesalahan position feedback.

Closed-Loop Steering Control

Sistem steering menggunakan prinsip closed-loop control. Secara sederhana, sistem membandingkan posisi yang diperintahkan dengan posisi aktual yang diperoleh dari sensor.

Hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagai:

$$e(t) = \theta_c(t) - \theta_f(t)$$

dengan:

$e(t)$ = position error;

$\theta_c(t)$ = command position;

$\theta_f(t)$ = feedback position.

Dalam kondisi normal, nilai position error mendekati nol. Apabila sensor mengalami degradasi, nilai feedback dapat berbeda dari posisi aktual sehingga sistem kontrol menghasilkan sinyal koreksi yang sebenarnya tidak diperlukan.

Engineering Failure Analysis

Engineering Failure Analysis digunakan untuk mengidentifikasi gejala kegagalan, mengumpulkan data teknis, menentukan kemungkinan penyebab, mengevaluasi hubungan sebab-akibat, dan menyusun rekomendasi perbaikan. Pendekatan ini sesuai untuk penelitian yang berfokus pada kegagalan komponen dan hubungan antara karakteristik komponen dengan gangguan fungsi sistem.

Dalam penelitian ini, EFA digunakan melalui tahapan identifikasi gangguan, pemeriksaan sistem, pengukuran parameter sensor, perbandingan dengan data acuan, identifikasi titik anomali, analisis mekanisme kegagalan, dan penyusunan tindakan pemeliharaan.

Condition Monitoring dan Pemeliharaan

Pemantauan kondisi memungkinkan perubahan performa komponen diketahui sebelum berkembang menjadi kegagalan fungsional. Pada azimuth thruster, parameter kondisi dapat digunakan sebagai indikator awal penurunan keandalan (Nikula et al., 2021).

Pendekatan pemeliharaan berbasis kondisi juga dapat mengurangi risiko over-maintenance dan under-maintenance. Song et al. (2022) menunjukkan bahwa penentuan waktu pemeliharaan peralatan kapal dapat diperkuat melalui identifikasi kondisi dan pola kegagalan komponen.

3. METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Pendekatan penelitian ini menggunakan metode *Engineering Failure Analysis* (EFA) untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan pada sistem steering repeller thruster. Metode ini diterapkan melalui tahapan identifikasi fungsi sistem, karakterisasi kegagalan, analisis komponen kritis, pengujian, serta verifikasi penyebab dominan. Fungsi utama sistem steering adalah mengendalikan sudut putar thruster sesuai perintah operator dengan memanfaatkan sinyal umpan balik (*feedback*) dari sensor posisi menuju *Electronic Control Unit* (ECU). Kegagalan fungsi ditandai dengan keterlambatan respons kemudi, ketidakstabilan sudut thruster, dan munculnya fenomena *self moving steering* tanpa adanya perintah operator. Berdasarkan analisis awal komponen yang diduga menjadi penyebab utama adalah sensor potensiometer karena berperan sebagai penghasil sinyal posisi yang digunakan ECU dalam proses pengendalian tertutup (*closed loop control*). *Engineering Failure Analysis* adalah metode dalam bidang keinsinyuran untuk mengevaluasi kegagalan suatu sistem melalui identifikasi gejala kerusakan, pengumpulan data teknis, analisis penyebab, evaluasi dampak, dan rekomendasi perbaikan (Russell et al., 2017).

Fokus penelitian adalah analisis degradasi sensor potensiometer sebagai sumber utama terjadinya kesalahan pembacaan posisi (*feedback error*) yang memengaruhi kinerja *Electronic Control Unit* (ECU). Pengujian dilakukan dengan mengukur nilai resistansi dan tegangan keluaran potensiometer pada beberapa variasi sudut putar thruster menggunakan multimeter digital. Hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan karakteristik linier yang dipersyaratkan oleh spesifikasi pabrikan untuk mengidentifikasi penyimpangan, lonjakan tegangan, penurunan sinyal, maupun ketidaklinieran resistansi. Pendekatan ini fokus pada hubungan sebab akibat (*cause effect relationship*) antara karakteristik sinyal sensor dengan

respons sistem kendali, sehingga solusi yang dihasilkan dapat diterapkan sebagai dasar peningkatan keandalan (*system reliability improvement*).

Lokasi dan Objek Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada sistem *steering repeller thruster* pada *kapal harbour tug* di area operasi pelabuhan Tanjung Mas Semarang, observasi dan pengukuran data dilaksanakan saat kapal dalam operasi kerja penuh dalam melayani kegiatan operasional di area pelabuhan. Objek penelitian meliputi seluruh subsistem repeller thruster, yaitu:

1. *Rotary Potentiometer (Position Feedback Sensor)*
2. *Electronic Control Unit (ECU)*
3. *Hydraulic Steering Actuator*
4. *Hydraulic Pump Unit*
5. *Steering Joystick Controller*
6. *Steering Feedback Circuit*
7. *Steering Control Panel*
8. *Repeller Thruster Unit*

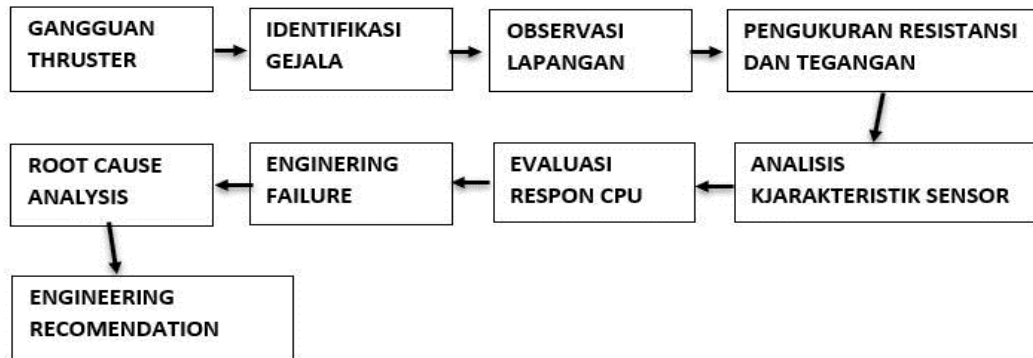
Sensor potensiometer dipilih sebagai penyebab dominan apabila anomali sinyal yang terukur terbukti konsisten memicu kesalahan pembacaan posisi thruster, menghasilkan koreksi berulang oleh ECU, dan menyebabkan terjadinya *self moving steering* selama sistem beroperasi. keseluruhan.

Bentuk Kegagalan Fungsi Steering Thruster

Degradasi potensiometer pada sistem steering berdampak terhadap penurunan kualitas sinyal umpan balik yang diterima ECU. Ketidakstabilan resistansi dan tegangan keluaran mengakibatkan pembacaan posisi thruster menjadi tidak akurat sehingga sistem kendali tidak mampu mempertahankan posisi sesuai perintah operator. Akibatnya, terjadi penurunan kinerja sistem steering yang memengaruhi kemampuan manuver, keandalan operasi, dan keselamatan navigasi kapal. Bentuk kegagalan sistem pada steering thruster yaitu:

1. Kesalahan pembacaan posisi sudut aktual pada indikator thruster.
2. Munculnya fenomena *self-moving steering* atau pergerakan thruster tanpa perintah operator.
3. Peningkatan waktu respons (*response delay*) pada sistem steering.
4. Penurunan akurasi sudut kemudi (*steering angle accuracy*).
5. Penurunan kemampuan manuver kapal yang berpotensi meningkatkan risiko insiden saat sandar, lepas sandar, maupun bernavigasi dilingkungan pelabuhan.

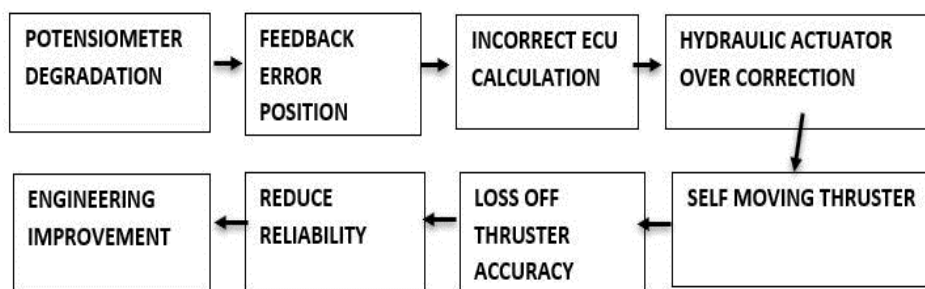
Tahapan Penelitian



Gambar 4. Diagram Alur Penelitian

Gambar 4 adalah Tahapan penelitian dimulai dengan identifikasi gangguan operasional pada sistem *steering*, observasi langsung terhadap pergerakan sudut *steering* selama kapal beroperasi. Asumsi awal gejala kerusakan teridentifikasi, maka dilakukan pengukuran karakteristik sensor potensiometer berupa nilai resistansi dan tegangan keluaran pada setiap sudut putaran. Langkah Hasil tersebut dianalisis menggunakan pendekatan menentukan hubungan antara degradasi sensor dengan kegagalan sistem *steering*. Tahapan akhir berupa penyusunan rekomendasi teknis untuk perawatan ataupun perbaikan lanjutan untuk mengembalikan keandalan sistem repeller thruster ini.

Engineering Failure Analysis



Gambar 5. Diagram Alir EFA

Gambar 5 ditunjukkan bahwa degradasi potensiometer menyebabkan penyimpangan nilai sinyal umpan balik, sehingga ECU menerima koreksi yang tidak sesuai. Koreksi berulang mengakibatkan pergerakan aktuator hidrolik secara berterusan (*hunting effect*), menurunkan akurasi *steering*, dan keandalan sistem steering thruster. Strategi peningkatan keandalan difokuskan pada kondisi sensor melalui kalibrasi berkala ataupun penggantian komponen dan penguatan program pemeliharaan preventif.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi Kinerja Sistem Rexpeller Thruster

Evaluasi awal dilakukan terhadap data hasil observasi performa thruster pada saat kapal beroperasi di pelabuhan. Pengujian performa dengan membandingkan data aktual terhadap spesifikasi pabrikan, untuk mengetahui tingkat penyimpangan yang terjadi pada sistem kendali thruster. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa beberapa data mengalami penurunan performa sehingga mengindikasikan adanya penurunan atau degradasi pada sistem thruster, performa ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Hasil Performa terhadap Data Buku MAnual

Parameter	Data Aktual	Ideal Manual Book	Deviasi	Status
Sudut Maksimal Rotasi (°)	360°	360°	0°	Normal
Waktu Respon Sudut thruster tiap 45° (s)	2.8	≤ 2.0	+0.8 s	Lambat
Delay Sistem Saat Thruster Idle (s)	1.2 – 1.5	< 0.5	+0.7 s	Abnormal / Koreksi ulang
Tekanan Hidrolik Normal (bar)	170 – 190	200	10-20	Menurun tidak optimal
Frekuensi gangguan	Setiap Thruster Run	1 kali / bln	Sering Error	Abnormal
Akurasi thruster Sudut Tetap	91%	$\geq 95\%$		Kurang akurat

Berdasarkan Tabel 1, data observasi thruster menunjukkan beberapa penyimpangan dari spesifikasi yang direkomendasikan dalam *manual book* pabrikan. Sudut rotasi maksimum thruster tetap mencapai 360° atau dapat dikategorikan sistem thruster normal. Penyimpangan terjadi pada *time respons* perubahan sudut thruster setiap 45° tercatat sebesar 2,8 detik, dengan deviasi 0,8 detik lebih lambat dibandingkan batas maksimum yang direkomendasikan yaitu kurang dari 2,0 detik. Operasional sistem mengalami *delay* saat kondisi idle selama 1,2–1,5 detik, nilai deviasi ini jauh melebihi nilai ideal pabrikan yaitu kurang dari 0,5 detik. Hal ini mengindikasikan terdapat keterlambatan respons aktuator sistem steering thruster.

Analisis Karakter Potensiometer

Pengukuran nilai resistansi dan tegangan pada potensiometer dilakukan secara bertahap tiap 10° dari posisi 0° hingga 360°. Nilai pengukuran resistansi dan tegangan terukur dibandingkan dengan nilai ideal manual pabrikan. Data pengukuran ditunjukkan pada Tabel 2,

dengan catatan bahwa data pengukuran hanya ditampilkan pada sudut thruster tertentu dimana terjadi anomali penyimpangan.

Tabel 2. Data Pengukuran dan Nilai Pabrikan

Sudut	R Ideal (kΩ)	R Aktual (kΩ) Range: 0.10	V ideal (V)	V Aktual (V) Range: 0.20	Anomali
0.10	0.02	0.01	0.02	0.04	-
10	0.56	0.56	0.28	0.28	-
30	1.67	1.67	0.83	0.83	-
40	2.22	2.22	1.11	1.11	-
50	2.78	2.78	1.39	2.10	Lonjakan
60	3.33	3.33	1.67	1.67	-
70	3.89	5.09	1.94	1.94	Lonjakan
80	4.44	4.44	2.22	2.22	-
90	5.00	5.00	2.50	2.00	Drop
100	5.56	5.56	2.78	2.78	-
110	6.11	5.11	3.06	3.06	Drop
130	7.22	7.22	3.61	3.61	-
150	8.33	8.33	4.17	4.17	-
170	9.44	9.44	4.72	4.72	-
190	10.56	10.57	5.28	5.28	-
210	11.67	11.67	5.83	5.83	-
230	12.78	12.78	6.39	6.39	-
250	13.89	13.89	6.94	6.94	-
270	15.00	15.00	7.50	7.50	-
290	16.11	16.12	8.06	8.06	-
310	17.22	17.22	8.61	8.61	-
330	18.33	18.33	9.17	9.17	-
360	20.00	20.000	10.00	10.00	-

Tabel 2 adalah data hasil pengukuran potensiometer oleh pergerakan thruster melalui perbandingan nilai resistansi (R) dan tegangan keluaran (V) aktual terhadap nilai ideal pabrikan disetiap sudut rotasi thruster. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa sebagian besar titik pengujian memiliki kesesuaian yang baik dengan spesifikasi dasar. Data ditunjukkan pada empat (4) sudut thruster mengalami penyimpangan signifikan yang berpotensi memengaruhi akurasi sistem kendali thruster. Thruster pada sudut 50° terjadi lonjakan tegangan keluaran dari nilai ideal 1,39 V menjadi 2,10 V, meskipun nilai resistansi masih sesuai. Pada sudut 70° nilai resistansi meningkat menjadi 5,09 k Ω dibandingkan nilai ideal sebesar 3,89 k Ω , mengindikasikan adanya lonjakan resistansi akibat ketidakstabilan kontak pada elemen sensor.

Fenomena drop sinyal teridentifikasi pada sudut 90°, yaitu tegangan keluaran turun menjadi 2,00 V dari nilai ideal 2,50 V. Sudut 110° nilai resistansi aktual drop di 5,11 k Ω dibandingkan nilai ideal sebesar 6,11 k Ω . Pergerakan thruster setelah melewati titik-titik

anomali tersebut, didapatkan pengukuran nilai resistansi dan tegangan kembali normal mengikuti pola linear data pabrikan hingga mencapai sudut maksimum 360°. Pola penyimpangan yang hanya muncul pada sudut-sudut tertentu menunjukkan bahwa gangguan bukan disebabkan oleh kerusakan keseluruhan sensor, melainkan lebih mengarah pada degradasi lokal pada lintasan resistif (*resistive track*), keausan *wiper contact*, atau kontaminasi permukaan sensor. Fenomena non linier untuk nilai resistansi dan tegangan menyebabkan sinyal posisi menjadi tidak stabil. sehingga menghasilkan kesalahan pembacaan posisi thruster, dan koreksi berulang pada sistem kendali tertutup (*closed loop control*).

Self Moving Steering Thruster

Fenomena ***self moving steering*** adalah konsekuensi langsung dari simpangan dan kesalahan nilai umpan balik menuju ke kontrol ECU. Prinsip dasar kerja ECU adalah ***closed loop feedback control***, yaitu membandingkan posisi yang diperintahkan (*command position*) dengan posisi aktual (*feedback position*). Pada kondisi normal berlaku hubungan "***Command Position = Feedback Position***", namun akibat degradasi potensiometer sehingga terjadi hubungan "***Command Position ≠ Feedback Position***". Perbedaan tersebut diterjemahkan ECU sebagai ***error position***, sehingga sistem secara otomatis menghasilkan perintah koreksi terhadap aktuator atau motor hidrolik untuk bergerak. Proses terjadinya *self moving thruster* yaitu,

1. Potensiometer mengalami degradasi.
2. Resistansi berubah secara tidak linier.
3. Tegangan keluaran menjadi tidak stabil.
4. ECU membaca posisi thrust secara salah dan koreksi otomatis.
5. Hydraulic actuator / motor bergerak.
6. Thruster berubah arah atau steering bergerak sendiri.

Engineering Analysis dan Tindakan Perawatan Lanjut

Degradasi sensor potensiometer merupakan kegagalan yang bersifat progresif (*progressive failure*), sehingga gejala berkembang secara bertahap sebelum mencapai kondisi *functional failure*. Hal ini dijelaskan dengan tahap awal gangguan hanya muncul di beberapa titik sudut thruster saja, frekuensinya dapat meningkat seiring bertambahnya degradasi komponen. Temuan menunjukkan bahwa sistem thruster bergantung pada kualitas sinyal umpan balik. Kerusakan kecil pada sensor memicu kegagalan sistem secara keseluruhan, karena ECU terus mengoreksi kesalahan berdasarkan data yang tidak akurat.

Strategi pemeliharaan yang menggunakan perbandingan kondisi aktual dan data pabrikan sebagai dasar pengambilan keputusan. Pada sistem *steering* rexpeller thruster, parameter dasar dipantau secara berkala yaitu,

1. Nilai resistansi potensiometer.
2. Tegangan keluaran sensor pada setiap sudut putaran.
3. Waktu respons *steering* thruster terhadap perintah operator.
4. Deviasi sudut terhadap nilai referensi.
5. Tekanan sistem hidrolik.

Pemantauan parameter tersebut memungkinkan operator kapal mengidentifikasi tren penurunan performa sensor sebelum terjadi gangguan operasional. Penggantian komponen dapat dilakukan berdasarkan kondisi aktual (*predictive replacement*), bukan hanya berdasarkan *running hours*. Tindakan pemeliharaan yang tepat terhadap setiap komponen kritis pada sistem *steering* thruster, ditunjukkan pada Tabel 3. Implementasi perawatan lanjut diharapkan mampu meningkatkan *availability*, memperpanjang umur pakai komponen, dan menghindari kerusakan mendadak (*unexpected breakdown*).

Tabel 3. Komponen Perawatan Lanjut

Komponen	Perawatan	Interval	Tindakan
Potensiometer	Kalibrasi dan uji linearitas	3 bulan	Kalibrasi ulang
Potensiometer	Pengukuran resistansi	6 bulan	Pengukuran dan Analisis
Terminal sensor	Pemeriksaan korosi	3 bulan	Pembersihan
Kabel sinyal	Pemeriksaan kontinuitas	6 bulan	Penggantian bila perlu
Hydraulic actuator	Pemeriksaan kebocoran	6 bulan	Overhaul bila diperlukan
ECU	Pemeriksaan error log	Setiap docking	Update parameter
Steering Control Panel	Functional test	Bulanan	Uji operasi

Berdasarkan hasil analisis untuk peningkatan keandalan sistem kendali *rexpeller thruster* direkomendasikan penggantian potensiometer. Penerapan rekomendasi tersebut dilakukan untuk meningkatkan reliabilitas sistem *steering* thruster dan mengurangi risiko kegagalan operasi. Penelitian ini memberikan kontribusi melalui identifikasi hubungan antara degradasi sensor potensiometer dan *self moving steering*. Hasil penelitian juga menghasilkan rekomendasi perawatan lanjut yang dapat diterapkan pada sistem *steering* rexpeller thruster untuk meningkatkan keandalan dan keselamatan operasi kapal.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengujian, analisis, dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa faktor dominan penyebab penurunan kinerja *steering repeller thruster* oleh degradasi sensor potensiometer. Evaluasi performa sistem menunjukkan terjadinya gangguan performa thruster, penurunan tekanan hidrolik, dan berkurangnya akurasi posisi thruster. Hasil pengukuran karakteristik potensiometer mengidentifikasi adanya penyimpangan di lokal area pada sudut 50°, 70°, 90°, dan 110° berupa lonjakan maupun penurunan nilai resistansi dan tegangan. Kondisi ini menyebabkan hubungan antara posisi perintah (*command position*) dan posisi aktual (*feedback position*) menjadi tidak linier. Kondisi tersebut menghasilkan kesalahan pembacaan oleh ECU, sehingga sistem kendali memberikan koreksi berulang kepada aktuator atau motor hidrolik dan memunculkan fenomena *self moving steering* thruster. Temuan ini menunjukkan bahwa kegagalan sensor potensiometer bersifat progresif (*progressive failure*) dan berpotensi berkembang menjadi kegagalan fungsional lanjutan. Peningkatan keandalan sistem *steering* thruster perlu dilakukan dengan pemantauan berkala terhadap nilai resistansi, tegangan keluaran, waktu respons, deviasi sudut, serta kondisi sistem hidrolik. Implementasi strategi tersebut disertai dengan penggantian potensiometer yang telah mengalami degradasi, untuk meningkatkan reliabilitas sistem kendali *repeller thruster*, mengurangi risiko kegagalan operasional, serta mendukung keselamatan dan kontinuitas operasi kapal.

DAFTAR REFERENSI

- Benetazzo, F., Ippoliti, G., Longhi, S., & Raspa, P. (2012). Fault-tolerant variable structure control of an overactuated dynamic positioning vessel after thruster failures. IFAC Proceedings Volumes, 45(27), 1–6. <https://doi.org/10.3182/20120919-3-IT-2046.00047>
- Egbe, G., Halima, I., & Raymond, E. (2025). Reliability-centered maintenance using reliability parameters on gas compressors. International Journal of Management, Mathematics, Modelling and Engineering.
- Geisbush, J., & Ariaratnam, S. T. (2022). Reliability centered maintenance (RCM): Literature review of current industry state of practice. Journal of Quality in Maintenance Engineering. <https://doi.org/10.1108/JQME-02-2021-0018>
- Kawasaki Heavy Industries, Ltd. (2023). Repeller thruster. Kawasaki Marine.

- Liu, R., Jin, Z., Li, X., & Yuan, L. (2023). Dynamic response characteristics of the hydraulic rotary system of an azimuth thruster for a dynamic positioning vessel. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(2), 399. <https://doi.org/10.3390/jmse11020399>
- Midori. (2020). Potentiometer CPP-45. Midori Precisions.
- Nikula, R., Ruusunen, M., Keski-Rahkonen, J., Saarinen, L., & Fagerholm, F. (2021). Probabilistic condition monitoring of azimuth thrusters based on acceleration measurements. *Machines*, 9(2), 39. <https://doi.org/10.3390/machines9020039>
- Pi, G., Li, R., Wu, F., & Wu, T. (2026). Maneuverability prediction of a twin-azimuth-thruster ship using a CFD and MMG coupled model with emphasis on hydrodynamic coupling effects.
- Rolls-Royce Ltd. (2021). Azimuth thrusters and fixed mounted thrusters.
- Russell, M. D., Jur, T. A., Risk, Á. H. Á., & Controlled, Á. (2017). Engineering analysis of failure: A determination of cause method. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 17(1), 8–14. <https://doi.org/10.1007/s11668-016-0224-9>
- Suharso, A. R., Hendartono, A., Sirait, E., & Kumara, R. B. (2023). Pengujian tingkat ketelitian potensiometer pada simulasi kemudi kapal.
- S., A. R., Santoso, G., Budi, A., & Kumara, R. B. (2023). Perbandingan sensor incremental rotary encoder dan potensiometer pada simulasi kemudi kapal berbasis Arduino. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 11(1), 155. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v11i1.155>
- Siswantoro, N., Zaman, M. B., Fahreza, F., Priyanta, D., Pitana, T., Prastowo, H., Wicaksana, A., & Fauzi, H. N. (2022). A case study maintenance task allocation analysis on marine loading arm using reliability centered maintenance. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 972(1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/972/1/012032>
- Song, T., Tan, T., & Han, G. (2022). Research on preventive maintenance strategies and systems for in-service ship equipment. *Polish Maritime Research*, 29(1). <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0009>
- Wu, T., Li, R., Ruan, J., Wang, C., Wang, Q., Chen, B., & Pi, G. (2025). Numerical simulation and experimental study on the turning motion of azimuth thruster-driven platform supply vessel. *Results in Engineering*, 28, 107927. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107927>