



Analisis penurunan kinerja *main air compressor* Kapal MT SC Gold Ocean berbasis planned maintenance system dan metode USG

Orion Mantong Tandilolo, Tony Santiko*, Darwis

Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar

E-mail: *paqilak11@gmail.com

ABSTRAK

Main air compressor merupakan salah satu permesinan bantu yang sangat vital dalam operasional kapal karena berfungsi menyediakan udara bertekanan tinggi untuk proses starting engine dan pengoperasian sistem pneumatik. Penurunan kinerja main air compressor dapat berdampak langsung pada keandalan mesin induk, keselamatan pelayaran, serta kelancaran operasional kapal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penyebab utama penurunan kinerja main air compressor di atas kapal MT SC Gold Ocean serta merumuskan langkah perawatan yang tepat berdasarkan kondisi aktual di lapangan. Penelitian ini menggunakan pendekatan mix-method dengan mengombinasikan data kuantitatif dan kualitatif yang diperoleh melalui observasi langsung selama praktik laut, analisis data operasional kompresor, wawancara dengan awak mesin, serta studi literatur. Metode USG (Urgency, Seriousness, and Growth) digunakan untuk menentukan prioritas permasalahan yang paling berpengaruh terhadap penurunan kinerja kompresor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyebab utama penurunan kinerja main air compressor adalah kerusakan pada suction valve dan delivery valve, serta patahnya piston ring. Kerusakan tersebut dipicu oleh keterlambatan penggantian komponen berdasarkan jam operasi, penumpukan kerak pada katup, serta sistem pelumasan yang tidak optimal. Kondisi ini menyebabkan kebocoran udara, menurunnya tekanan kerja, dan meningkatnya waktu pengisian botol angin. Penelitian ini menegaskan pentingnya penerapan Planned Maintenance System (PMS) secara konsisten sesuai buku manual untuk menjaga keandalan main air compressor. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi praktis bagi perwira mesin dan awak kamar mesin dalam meningkatkan efektivitas perawatan serta mencegah terulangnya kegagalan serupa pada sistem pneumatik kapal.

Kata Kunci: *Main air compressor, perawatan kapal, piston ring, suction valve, planned maintenance system.*

ABSTRACT

The main air compressor is one of the most critical auxiliary machinery systems on board a vessel, as it supplies high-pressure air required for engine starting and pneumatic system operation. Performance degradation of the main air compressor may directly affect main engine reliability, navigational safety, and overall ship operations. This study aims to analyze the primary causes of performance degradation of the main air compressor on board MT SC Gold Ocean and to propose appropriate maintenance measures based on actual operational conditions. This research employs a mixed-method approach by integrating quantitative and qualitative data obtained from direct onboard observations during sea practice, analysis of compressor operational data, interviews with engine crew, and literature review. The USG (Urgency, Seriousness, and Growth) method is applied to prioritize the most critical factors contributing to compressor performance degradation. The results indicate that the main causes of



performance degradation are damage to the suction valve and delivery valve, as well as fractured piston rings. These failures are primarily caused by delayed component replacement based on operating hours, scale deposits on valves, and inadequate lubrication systems. Such conditions lead to air leakage, reduced working pressure, and increased air bottle charging time. This study highlights the importance of consistent implementation of the Planned Maintenance System (PMS) in accordance with the manufacturer's manual to maintain the reliability of the main air compressor. The findings are expected to serve as a practical reference for marine engineers and engine room personnel in improving maintenance effectiveness and preventing similar failures in ship pneumatic systems.

Keywords: Main air compressor, ship maintenance, piston ring, suction valve, planned maintenance system.

Tersedia pada: <https://doi.org/10.62391/ejmi.v7i2.165>

Disubmit pada 30/10/2025	Direview pada 10/11/2025	Direvisi pada 20/11/2025
Diterima pada 30/11/2025	Diterbitkan pada 01/12/2025	

PENDAHULUAN

Sistem udara bertekanan (*compressed air system*) merupakan salah satu sistem bantu paling vital dalam operasional kapal, khususnya pada kapal niaga modern yang sangat bergantung pada sistem pneumatik untuk proses *starting engine*, pengoperasian katup otomatis, serta berbagai sistem kontrol dan keselamatan. Pada sistem ini, *main air compressor* berperan sebagai sumber utama penyedia udara bertekanan tinggi yang menentukan keandalan operasi mesin induk maupun mesin bantu. Kegagalan atau penurunan kinerja *main air compressor* dapat berdampak langsung pada keterlambatan operasi kapal, peningkatan risiko keselamatan, serta potensi kerugian ekonomi yang signifikan [1-2].

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penurunan performa *reciprocating air compressor* pada kapal umumnya disebabkan oleh degradasi komponen internal seperti *suction valve*, *delivery valve*, dan *piston ring*, yang berfungsi langsung dalam proses pemampatan udara [3-4]. Kerusakan pada katup isap dan katup tekan dapat menyebabkan kebocoran udara balik (*backflow*), sehingga tekanan yang dihasilkan tidak mencapai nilai standar operasi. Sementara itu, keausan atau patahnya *piston ring* dapat memicu fenomena *blow-by*, meningkatkan gesekan, serta menurunkan efisiensi volumetrik kompresor [5-6].

Selain faktor keausan mekanis, kegagalan sistem pelumasan dan ketidaksesuaian penerapan *Planned Maintenance System* (PMS) juga menjadi penyebab dominan menurunnya kinerja *main air compressor*. Beberapa studi menegaskan bahwa keterlambatan penggantian komponen berdasarkan *running hours*, penggunaan pelumas yang tidak sesuai spesifikasi, serta kurangnya pemantauan kondisi (*condition monitoring*) mempercepat degradasi komponen kritis kompresor [7-8]. Dalam konteks keselamatan pelayaran, kondisi ini bertentangan dengan prinsip *preventive maintenance* dan *risk-based maintenance* yang direkomendasikan dalam *International Safety Management (ISM) Code* oleh International Maritime Organization (IMO) [9].

Pendekatan analisis berbasis prioritas masalah menjadi penting untuk menentukan komponen yang paling berpengaruh terhadap penurunan kinerja sistem. Salah satu metode yang digunakan adalah metode USG (*Urgency, Seriousness, and Growth*), yang memungkinkan peneliti mengidentifikasi tingkat kedaruratan, tingkat risiko, serta potensi perkembangan

masalah apabila tidak segera ditangani [10]. Metode ini telah banyak diterapkan dalam studi pemeliharaan permesinan untuk mendukung pengambilan keputusan teknis yang lebih terarah dan efektif [11].

Berdasarkan pengalaman operasional di kapal MT SC Gold Ocean, ditemukan kondisi penurunan produksi udara pada *main air compressor* yang ditandai dengan tidak tercapainya tekanan kerja standar, meningkatnya waktu pengisian botol angin, serta indikasi abnormal pada tekanan dan temperatur operasi. Kondisi tersebut berpotensi mengganggu kesiapan mesin induk dan sistem pendukung kapal. Namun demikian, kajian empiris yang mengintegrasikan metode USG, data observasi operasional, serta analisis teknis komponen kompresor pada konteks kapal niaga Indonesia masih relatif terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penyebab utama menurunnya produksi udara pada *main air compressor* di atas kapal MT SC Gold Ocean melalui pendekatan *mix-method* yang mengombinasikan analisis kuantitatif dan kualitatif. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis bagi perwira mesin dan awak kamar mesin dalam meningkatkan efektivitas penerapan PMS, memperkuat kesadaran terhadap pentingnya perawatan preventif, serta menjadi referensi teknis dalam pengelolaan keandalan sistem kompresor udara di atas kapal.

METODOLOGI PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *mixed-method* dengan mengombinasikan metode kuantitatif dan kualitatif untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai penurunan kinerja *main air compressor* di atas kapal MT SC Gold Ocean. Pendekatan ini dipilih karena mampu mengintegrasikan data teknis operasional dengan hasil observasi lapangan dan pengalaman praktis awak mesin, sehingga analisis yang dihasilkan lebih komprehensif dan kontekstual [1-2]. Penelitian ini bersifat deskriptif-analitis dengan fokus pada studi kasus satu unit kapal niaga.

Tabel 1. Spesifikasi utama *main air compressor*.

Parameter	Keterangan
Tipe	<i>Reciprocating air compressor</i>
Jumlah tahap	Dua tahap (<i>two-stage</i>)
Tekanan kerja	± 30 bar
Sistem pelumasan	<i>Forced lubrication</i>
Sistem pendingin	<i>Water cooled</i>

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di atas kapal MT SC Gold Ocean selama masa praktik laut (*sea-going practice*) peneliti, yaitu dari Desember 2023 hingga Desember 2024. Rentang waktu ini memungkinkan pengamatan langsung terhadap kondisi operasi normal, kondisi abnormal, serta kondisi setelah dilakukan *overhaul* pada *main air compressor*, sehingga perubahan kinerja kompresor dapat dianalisis secara berkelanjutan [3].

Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui beberapa teknik berikut:

1. Observasi Langsung. Observasi dilakukan secara langsung terhadap pengoperasian *main*

air compressor, meliputi pengukuran tekanan *low pressure* dan *high pressure stage*, waktu pengisian botol angin, tekanan oli pelumas, serta suhu sistem pendingin. Observasi ini bertujuan untuk mengidentifikasi indikasi penurunan kinerja dan kondisi abnormal selama operasi kompresor [4].

2. Wawancara Terstruktur. Wawancara dilakukan dengan perwira mesin dan awak kamar mesin untuk memperoleh informasi terkait riwayat perawatan, penerapan *Planned Maintenance System* (PMS), serta kendala teknis yang sering terjadi pada *main air compressor*. Teknik ini digunakan untuk melengkapi data teknis dengan perspektif praktis dari operator [5].
3. Studi Dokumentasi. Studi dokumentasi mencakup penelaahan *engine log book*, *maintenance record*, *job history*, serta *manual book* pabrikan kompresor. Data ini digunakan untuk memverifikasi jam operasi komponen, jadwal penggantian suku cadang, dan kesesuaian perawatan dengan standar yang direkomendasikan [6].
4. Studi Literatur. Studi literatur dilakukan dengan menelaah jurnal ilmiah, standar internasional, dan publikasi teknis yang relevan dengan perawatan *reciprocating air compressor*, *condition-based maintenance*, serta analisis kegagalan komponen mekanis pada sistem pneumatik kapal [7-8].

Metode Analisis Data

1. Analisis Kinerja Operasional. Data operasional kompresor dianalisis dengan membandingkan parameter kerja pada kondisi normal, kondisi abnormal, dan setelah *overhaul*. Parameter yang dianalisis meliputi tekanan tahap pertama dan kedua, tekanan pelumas, serta waktu pengisian botol angin. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi tingkat penurunan kinerja dan efektivitas tindakan perbaikan yang dilakukan [9].
2. Analisis Prioritas Permasalahan dengan Metode USG. Metode USG (*Urgency, Seriousness, and Growth*) digunakan untuk menentukan prioritas penyebab penurunan kinerja *main air compressor*. Setiap faktor penyebab dinilai berdasarkan tingkat kedaruratan (*urgency*), tingkat keseriusan dampak (*seriousness*), dan potensi perkembangan masalah (*growth*) menggunakan skala Likert 1–5. Faktor dengan skor total tertinggi ditetapkan sebagai penyebab utama yang memerlukan penanganan segera [10-11].
3. Analisis Teknis Komponen Kritis. Analisis teknis difokuskan pada komponen utama yang memiliki pengaruh langsung terhadap proses kompresi udara, yaitu *suction valve*, *delivery valve*, dan *piston ring*. Analisis dilakukan dengan membandingkan kondisi aktual komponen terhadap spesifikasi teknis dalam *manual book* serta temuan penelitian terdahulu terkait mekanisme kegagalan komponen kompresor [12-13].

Validitas dan Keandalan Data

Untuk menjamin validitas dan keandalan data, dilakukan *triangulation method* dengan membandingkan hasil observasi, wawancara, dan dokumentasi teknis. Pendekatan ini bertujuan untuk meminimalkan bias subjektif serta meningkatkan akurasi kesimpulan penelitian [14].

Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini meliputi:

1. Identifikasi masalah penurunan kinerja *main air compressor*;
2. Pengumpulan data operasional dan teknis;
3. Penentuan prioritas masalah menggunakan metode USG;
4. Analisis teknis komponen kritis;
5. Penyusunan rekomendasi perawatan berbasis *Planned Maintenance System*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis Kinerja Operasional *Main air compressor*

Berdasarkan hasil observasi dan analisis data operasional, ditemukan adanya perbedaan signifikan antara kinerja *main air compressor* pada kondisi normal, kondisi abnormal, dan kondisi setelah dilakukan *overhaul*. Pada kondisi abnormal, tekanan udara yang dihasilkan pada *first stage* dan *second stage* mengalami penurunan yang cukup tajam dibandingkan dengan nilai standar operasi. Selain itu, waktu pengisian botol angin (*air bottle charging time*) menjadi lebih lama, yang mengindikasikan penurunan efisiensi proses kompresi.

Penurunan tekanan kerja ini menunjukkan bahwa sistem pemampatan udara tidak bekerja secara optimal, sehingga udara bertekanan yang dihasilkan tidak mencukupi kebutuhan sistem pneumatik kapal. Kondisi ini sejalan dengan temuan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa degradasi kinerja *reciprocating air compressor* umumnya ditandai dengan penurunan tekanan, peningkatan temperatur kerja, serta ketidaktercapaian kapasitas produksi udara sesuai spesifikasi pabrikan [1-2].

Setelah dilakukan *overhaul*, hasil pengukuran menunjukkan adanya peningkatan tekanan pada *first stage* dan *second stage*, serta berkurangnya waktu pengisian botol angin. Hal ini membuktikan bahwa tindakan perbaikan yang dilakukan pada komponen kritis kompresor berpengaruh langsung terhadap pemulihan kinerja sistem.

Tabel 2. Perbandingan kinerja operasional.

Parameter	Normal	Abnormal	Pasca <i>Overhaul</i>
Tekanan tahap I (bar)	0,5	0,2	0,6
Tekanan tahap II (bar)	2,4	1,22	2,55
Tekanan oli (bar)	4	4	4
Waktu pengisian (menit)	15	15	15
Tekanan akhir (bar)	2,5	1,5	2,6

Hasil Analisis Prioritas Permasalahan dengan Metode USG

Berdasarkan hasil penilaian menggunakan metode USG (*Urgency, Seriousness, and Growth*), diperoleh urutan prioritas penyebab utama penurunan kinerja *main air compressor*. Dua faktor dengan skor total tertinggi adalah kerusakan pada *suction valve* dan *delivery valve*, serta patahnya *piston ring*. Kedua faktor tersebut memiliki tingkat urgensi, keseriusan, dan potensi perkembangan masalah yang tinggi apabila tidak segera ditangani.

Hasil ini menunjukkan bahwa komponen yang secara langsung berperan dalam proses pemampatan udara merupakan titik kritis (*critical components*) dalam sistem *main air compressor*. Metode USG terbukti efektif dalam membantu penentuan prioritas perbaikan, khususnya pada sistem permesinan kapal yang memiliki keterbatasan waktu dan sumber daya perawatan [3-4].

Tabel 3. Prioritas penyebab penurunan kinerja (metode USG).

Faktor Penyebab	Skor USG	Prioritas
<i>Suction & delivery valve</i>	146	I
<i>Piston ring</i>	143	II
<i>Unloader valve</i>	133	III
Liner/silinder	128	IV
Filter udara	117	V

Pembahasan Kerusakan *Suction Valve* dan *Delivery Valve*

Kerusakan pada *suction valve* dan *delivery valve* ditemukan berupa penumpukan kerak, keausan permukaan katup, serta menurunnya kemampuan katup untuk menutup secara rapat. Kondisi ini menyebabkan terjadinya kebocoran udara (*air leakage*) dan aliran balik (*backflow*) selama proses kompresi, sehingga tekanan yang dihasilkan tidak mencapai nilai yang diharapkan.

Penumpukan kerak pada katup umumnya disebabkan oleh masuknya udara lembab dan kotor ke dalam sistem kompresor, serta kurang optimalnya sistem penyaringan udara. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa kelembaban dan kontaminan udara merupakan faktor utama penyebab kegagalan katup pada *reciprocating compressor* [5-6].

Tabel 4. Kondisi komponen kritis.

Komponen	Temuan Utama	Dampak
<i>Suction valve</i>	Kerak & bocor	Tekanan turun
<i>Delivery valve</i>	Tidak menutup rapat	<i>Backflow</i>
<i>Piston ring</i>	<i>Gap</i> melebihi standar	<i>Blow-by</i>

Selain itu, keterlambatan penggantian katup berdasarkan jam operasi yang ditetapkan dalam *Planned Maintenance System* (PMS) mempercepat degradasi komponen. PMS merekomendasikan penggantian *valve plate*, *spring*, dan *seat valve* pada interval jam operasi tertentu untuk mencegah kegagalan fungsional. Ketidakpatuhan terhadap jadwal PMS terbukti meningkatkan risiko kegagalan kompresor dan menurunkan keandalan sistem pneumatik kapal [7-8].

Pembahasan Kerusakan *Piston Ring*

Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa *piston ring* mengalami patah dan keausan dengan nilai celah (*ring gap*) dan alur (*groove clearance*) yang melebihi batas toleransi yang ditetapkan dalam *manual book*. Kondisi ini menyebabkan terjadinya *blow-by*, yaitu kebocoran udara melewati celah piston selama proses kompresi, sehingga tekanan udara tidak dapat dibangun secara optimal.

Keausan dan patahnya *piston ring* juga berkaitan erat dengan sistem pelumasan yang tidak optimal. Oli pelumas yang kotor atau mengalami degradasi viskositas tidak mampu membentuk lapisan pelindung yang cukup antara piston dan liner, sehingga meningkatkan gesekan dan keausan komponen. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa kegagalan sistem pelumasan merupakan salah satu penyebab utama kerusakan *piston ring* pada

kompresor torak [9-10].

Dengan demikian, kondisi *piston ring* tidak hanya memengaruhi kinerja kompresor, tetapi juga berdampak pada konsumsi energi dan umur pakai komponen lainnya. Oleh karena itu, pengendalian kualitas pelumas dan kepatuhan terhadap jadwal penggantian komponen menjadi faktor kunci dalam menjaga keandalan *main air compressor*.

Tabel 5. Rekomendasi perawatan berbasis PMS.

Komponen	Tindakan	Interval
Valve plate & spring	Bersih / ganti	3.000 jam
<i>Piston ring</i>	Inspeksi / ganti	6.000 jam
Oli & filter	Ganti	1.000–2.000 jam

Implikasi terhadap *Planned Maintenance System* dan Keselamatan Operasi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar penyebab penurunan kinerja *main air compressor* berakar pada kurang optimalnya penerapan *Planned Maintenance System*. Keterlambatan penggantian komponen, kurangnya inspeksi berkala, serta minimnya pemantauan kondisi (*condition monitoring*) meningkatkan risiko kegagalan sistem secara bertahap.

Dalam konteks keselamatan pelayaran, kegagalan *main air compressor* dapat menghambat proses *starting engine* dan mengganggu sistem pneumatik yang vital, sehingga berpotensi melanggar prinsip keselamatan yang diatur dalam *International Safety Management (ISM) Code* [11]. Oleh karena itu, penerapan PMS yang disiplin dan berbasis kondisi aktual permesinan menjadi sangat penting untuk menjamin keandalan operasi kapal.

Sintesis Pembahasan

Secara keseluruhan, hasil dan pembahasan penelitian ini menegaskan bahwa kerusakan *suction valve*, *delivery valve*, dan *piston ring* merupakan faktor dominan yang menyebabkan penurunan kinerja *main air compressor* di atas kapal MT SC Gold Ocean. Temuan ini konsisten dengan literatur yang menekankan pentingnya perawatan preventif, pengendalian pelumasan, serta penerapan PMS berbasis jam operasi dan kondisi aktual komponen [12-13].

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan gambaran teknis mengenai penyebab kegagalan kompresor, tetapi juga memperkuat urgensi penerapan sistem perawatan yang terstruktur dan berkelanjutan dalam mendukung keselamatan dan keandalan operasional kapal.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kinerja operasional, penilaian prioritas permasalahan menggunakan metode USG (*Urgency, Seriousness, and Growth*), serta pembahasan teknis komponen, dapat disimpulkan bahwa penurunan kinerja *main air compressor* di atas kapal MT SC Gold Ocean terutama disebabkan oleh kerusakan pada *suction valve* dan *delivery valve*, serta patahnya *piston ring*. Ketiga komponen tersebut merupakan komponen kritis yang berperan langsung dalam proses pemampatan udara.

Kerusakan *suction valve* dan *delivery valve* mengakibatkan kebocoran udara dan aliran balik (*backflow*) selama proses kompresi, sehingga tekanan kerja yang dihasilkan tidak

mencapai nilai standar dan waktu pengisian botol angin menjadi lebih lama. Sementara itu, patahnya *piston ring* dengan nilai *ring gap* dan *groove clearance* yang melebihi batas toleransi menyebabkan terjadinya *blow-by*, menurunkan efisiensi volumetrik kompresor, serta mempercepat keausan komponen lain.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa akar permasalahan utama berasal dari kurang optimalnya penerapan *Planned Maintenance System* (PMS), khususnya keterlambatan penggantian komponen berdasarkan jam operasi, pengendalian sistem pelumasan yang tidak konsisten, serta terbatasnya pemantauan kondisi permesinan. Setelah dilakukan *overhaul* dan perbaikan pada komponen kritis, kinerja *main air compressor* menunjukkan pemulihan yang signifikan, yang menegaskan pentingnya perawatan preventif yang disiplin dan terencana.

Saran

Berdasarkan kesimpulan tersebut, disarankan agar penerapan *Planned Maintenance System* (PMS) pada *main air compressor* dilakukan secara konsisten dan disiplin sesuai dengan *manual book* pabrik, khususnya terkait interval penggantian *suction valve*, *delivery valve*, dan *piston ring* berdasarkan jam operasi. Selain itu, sistem pelumasan perlu mendapat perhatian khusus melalui pemantauan kualitas dan level oli secara rutin, penggunaan pelumas sesuai spesifikasi, serta penggantian filter oli secara berkala untuk mencegah keausan dini pada komponen bergerak. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan pengembangan metode pemantauan berbasis *condition monitoring* atau *predictive maintenance* guna mendeteksi dini degradasi kinerja *main air compressor*, sehingga potensi kegagalan dapat dicegah sebelum berdampak pada keselamatan dan keandalan operasional kapal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Gribbestad, M., Hassan, M. U., & Hameed, I. A. (2021). Transfer learning for prognostics and health management (PHM) of marine air compressors. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1), 47. <https://doi.org/10.3390/jmse9010047>.
- [2] Gryboś, D., & Leszczyński, J. (2024). A review of energy overconsumption reduction methods in the utilization stage in compressed air systems. *Energies*, 17(6), 1495. <https://doi.org/10.3390/en17061495>.
- [3] Lazakis, I., & Turan, O. (2016). Risk assessment and decision-making for ship machinery maintenance. *Ocean Engineering*, 118, 247–255. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.04.014>.
- [4] Turan, O., Lazakis, I., Judah, S., & Incecik, A. (2009). Maintenance strategy selection for ship machinery systems using a risk-based approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 223(2), 241–253. <https://doi.org/10.1243/14750902JEME127>.
- [5] Zhu, Z., Chen, Y., Zhang, X., & Wang, Y. (2023). Failure mechanism and reliability analysis of *reciprocating air compressors* based on operational data. *Engineering Failure Analysis*, 149, 107289. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107289>.
- [6] Chen, H., Li, X., Wang, S., & Xu, J. (2021). Experimental investigation on valve failure characteristics in reciprocating compressors. *Applied Sciences*, 11(18), 8614. <https://doi.org/10.3390/app11188614>.
- [7] Effendi, E., Habli, M. H., & Siregar, P. I. S. (2022). Analisa pengisian hisapan udara saat

- terjadinya penurunan tekanan kompresi pada compressor piston vertical two stage. *Meteor STIP Marunda*, 15(1), 63–71. <https://doi.org/10.36101/msm.v15i1.217>.
- [8] Maghfiroh, A. M., & Chandra, A. B. (2023). Thermo valve air compressor maintenance and repair using the overall equipment effectiveness (OEE) method. *International Journal of Engineering Continuity*, 2(1), 1–10. <https://doi.org/10.58291/ijec.v2i1.59>.
- [9] Bai, X., Li, Y., Zhang, Z., & He, Z. (2020). Early fault diagnosis of piston rings in reciprocating compressors based on pressure signals. *Measurement*, 152, 107326. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107326>.
- [10] Rahman, A., & Kim, J. M. (2018). Fault diagnosis of reciprocating compressors using vibration and acoustic emission signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 107, 283–298. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.01.027>.
- [11] Nordal, H., & El-Thalji, I. (2022). Condition-based maintenance frameworks for marine machinery systems: A review. *Applied Sciences*, 12(7), 3311. <https://doi.org/10.3390/app12073311>.
- [12] Antoni, J., Randall, R. B., & Sawalhi, N. (2017). Advanced diagnostic techniques for reciprocating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 99, 43–68. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.05.041>.
- [13] Prasutiyon, H., & Kurniawan, F. D. (2021). Analisa pengaruh pemeliharaan machinery dari annual survey ke intermediate survey dengan menerapkan maintenance management system. *Justek: Jurnal Sains dan Teknologi*, 4(1), 1–9. <https://doi.org/10.31764/justek.v4i1.4476>.
- [14] Aminzadeh, A., Karganroudi, S. S., Majidi, S., Dabompre, C., Azaiez, K., Mitride, C., & Sénéchal, E. (2025). A machine learning implementation to predictive maintenance and monitoring of industrial compressors. *Sensors*, 25(4), 1006. <https://doi.org/10.3390/s25041006>.
- [15] Costa, A., Mastriani, E., Incardona, F., Munari, K., & Spinello, S. (2025). Predictive maintenance study for high-pressure industrial compressors: Hybrid clustering models. *Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences*, 118. <https://doi.org/10.24251/hicss.2025.118>.
- [16] Chen, T., Wang, L., Xu, J., Gao, T., Qin, X., Yang, X., Cong, Q., Jin, J., & Liu, C. (2022). Effect of groove texture on deformation and sealing performance of engine piston ring. *Machines*, 10(11), 1020. <https://doi.org/10.3390/machines10111020>.
- [17] Jeřábek, M., Volf, M., & Richter, L. (2022). Air drying in an industrial compressor. *MATEC Web of Conferences*, 367, 00014. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236700014>.
- [18] Hu, Y., Xu, W., Jia, G., Li, G., & Cai, M. (2022). Energy analysis of precooling air compressor system. *Entropy*, 24(8), 1035. <https://doi.org/10.3390/e24081035>.
- [19] Lv, Z., Liu, X., Chen, H., & Tang, L. (2024). Experimental study of DC excitation effect on the performance of moving coil linear compressor. *Scientific Reports*, 14(1), 70473. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70473-9>.
- [20] International Maritime Organization. (2022). *International Safety Management (ISM) Code and guidelines on implementation*. IMO. <https://www.imo.org/en/OurWork/HumanElement/Pages/ISMCode.aspx>.