



P-ISSN: 2716-2656, E-ISSN: 2985-9638

JOURNAL MARINE INSIDE

VOLUME 8, ISSUE 1, JUNE 2026

Web: <https://ejournal.poltekpel-banten.ac.id/index.php/ejmi/>

Implementasi Marpol Annex VI Regulation 14 dalam pembatasan emisi sulphur oxides (SO_x) dan particulate matter melalui penggunaan bahan bakar rendah sulfur pada kapal AHTS Era Indonesia

Alvian Demaz Peramutya, Akhmad Ndori

Politeknik Pelayaran Banten

E-mail: *demazalvian2@gmail.com

ABSTRAK

Transportasi laut merupakan sektor strategis yang berkontribusi terhadap pertumbuhan ekonomi global, namun juga menjadi salah satu sumber emisi pencemar udara, khususnya Sulphur Oxides (SO_x) dan Particulate Matter (PM). International Maritime Organization (IMO) melalui Marpol Annex VI Regulation 14 menetapkan batas maksimum kandungan sulfur bahan bakar kapal sebesar 0,50% m/m di luar Emission Control Area (ECA) sebagai upaya menekan emisi pencemar udara. Penelitian ini bertujuan menganalisis implementasi Marpol Annex VI Regulation 14 pada kapal AHTS Era Indonesia serta mengevaluasi tingkat kepatuhan kapal terhadap ketentuan penggunaan bahan bakar rendah sulfur. Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif melalui studi pustaka, observasi lapangan, wawancara dengan awak kapal, serta analisis dokumen bunker (Bunker Delivery Note). Data yang dianalisis meliputi jenis bahan bakar, kandungan sulfur, konsumsi bahan bakar, serta simulasi emisi hasil pembakaran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh bahan bakar yang digunakan merupakan Marine Gas Oil (MGO) Low Sulphur dengan kandungan sulfur berkisar antara 0,07–0,11% m/m sehingga memenuhi batas maksimum yang ditetapkan Marpol Annex VI. Simulasi emisi menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan sulfur dan beban mesin, semakin meningkat konsentrasi SO₂, SO_x, dan Particulate Matter, meskipun masih berada pada tingkat yang terkendali. Implementasi regulasi didukung melalui pemeriksaan dokumen bunker, penyimpanan sampel bahan bakar, pencatatan konsumsi bahan bakar, serta pengawasan operasional mesin. Kendala utama meliputi keterbatasan ketersediaan bahan bakar rendah sulfur, tingginya biaya operasional, serta belum tersedianya pengukuran emisi secara kontinu. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan bahan bakar rendah sulfur merupakan strategi paling efektif dalam mendukung kepatuhan terhadap Marpol Annex VI Regulation 14 pada kapal AHTS Era Indonesia.

Kata Kunci: Marpol Annex VI, sulphur oxides, particulate matter, low sulphur fuel, bunker delivery note, AHTS.

ABSTRACT

Maritime transportation plays a strategic role in global trade but is also recognized as a significant contributor to air pollution through Sulphur Oxides (SO_x) and Particulate Matter (PM) emissions. To mitigate these emissions, the International Maritime Organization (IMO) introduced Marpol Annex VI Regulation 14, which limits the sulphur content of marine fuel to 0.50% m/m outside Emission Control Areas (ECAs). This study aims to analyze the implementation of MARPOL Annex VI Regulation 14 on



Journal Marine Inside is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

board AHTS Era Indonesia and evaluate the vessel's compliance with low-sulphur fuel requirements. A qualitative descriptive approach was employed through literature review, onboard observation, crew interviews, and analysis of Bunker Delivery Notes (BDN). The analyzed data included fuel type, sulphur content, fuel consumption records, and simulated exhaust emission data. The findings indicate that all fuel used on board was Marine Gas Oil (MGO) Low Sulphur with sulphur content ranging from 0.07% to 0.11% m/m, well below the IMO limit of 0.50% m/m. Emission simulations demonstrate that increasing sulphur content and engine load lead to higher SO₂, SO_x, and particulate matter emissions, although all values remained within acceptable operational conditions. Compliance was supported through systematic fuel documentation, fuel sample retention, fuel consumption recording, and machinery operational monitoring. Major challenges include the limited availability of low-sulphur fuel, increased operational costs, and the absence of continuous emission monitoring systems. The study concludes that the adoption of low-sulphur fuel remains the most practical and effective strategy for ensuring compliance with Marpol Annex VI Regulation 14 aboard AHTS Era Indonesia.

Keywords: Marpol Annex VI, sulphur oxides, particulate matter, low sulphur fuel oil, ship emission, bunker delivery note.

Tersedia pada: <https://doi.org/10.62391/ejmi.v8i1.233>

Disubmit pada 18/12/2025	Direview pada 01/05/2026	Direvisi pada 08/05/2026
Diterima pada 20/05/2026	Diterbitkan pada 01/06/2026	

PENDAHULUAN

Transportasi laut memegang peranan yang sangat penting dalam sistem perdagangan internasional dengan mengangkut sekitar 80–90% volume perdagangan dunia. Efisiensi pengangkutan dalam jumlah besar menjadikan kapal sebagai moda transportasi utama dalam mendukung aktivitas ekonomi global. Namun demikian, peningkatan aktivitas pelayaran juga berkontribusi terhadap meningkatnya emisi pencemar udara yang berasal dari proses pembakaran bahan bakar kapal, terutama Sulphur Oxides (SO_x), Nitrogen Oxides (NO_x), Carbon Dioxide (CO₂), dan *Particulate Matter* (PM). Emisi tersebut diketahui memberikan dampak negatif terhadap kualitas udara, kesehatan masyarakat, serta mempercepat terjadinya perubahan iklim global [1], [2].

Sulphur Oxides (SO_x) merupakan salah satu polutan utama yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar dengan kandungan sulfur tinggi. Ketika dilepaskan ke atmosfer, SO_x dapat bereaksi dengan uap air membentuk hujan asam (*acid rain*) yang menyebabkan kerusakan ekosistem perairan, penurunan produktivitas hutan, korosi infrastruktur, serta menimbulkan berbagai gangguan kesehatan seperti iritasi saluran pernapasan, bronkitis kronis, hingga peningkatan risiko penyakit kardiovaskular. Selain itu, *Particulate Matter* hasil pembakaran bahan bakar kapal berukuran sangat kecil sehingga mampu memasuki sistem pernapasan manusia dan meningkatkan risiko penyakit paru-paru maupun kematian dini akibat paparan polusi udara [3], [4].

Sebagai respons terhadap permasalahan tersebut, International Maritime Organization (IMO) mengadopsi MARPOL Annex VI mengenai *Prevention of Air Pollution from Ships*, yang mengatur pembatasan emisi udara dari kapal. Salah satu regulasi penting dalam Annex VI adalah Regulation 14, yang menetapkan batas maksimum kandungan sulfur dalam bahan bakar kapal. Sejak 1 Januari 2020, IMO memberlakukan kebijakan Global Sulphur Cap, yaitu pembatasan kandungan sulfur maksimum sebesar 0,50% m/m bagi kapal yang beroperasi di

luar *Emission Control Area* (ECA), sedangkan kapal yang beroperasi di wilayah ECA diwajibkan menggunakan bahan bakar dengan kandungan sulfur maksimum 0,10% m/m. Kebijakan tersebut diperkirakan mampu menurunkan emisi SO_x dari sektor pelayaran hingga lebih dari 70% dibandingkan sebelum regulasi diberlakukan [5], [6].

Penerapan regulasi tersebut memberikan tantangan tersendiri bagi perusahaan pelayaran karena harus menyesuaikan sistem operasional kapal agar tetap memenuhi ketentuan internasional. Beberapa alternatif yang dapat diterapkan antara lain menggunakan Marine Gas Oil (MGO) Low Sulphur, memasang sistem pembersih gas buang (*Exhaust Gas Cleaning System* atau *scrubber*), maupun beralih ke bahan bakar alternatif seperti Liquefied Natural Gas (LNG) atau metanol. Di antara berbagai alternatif tersebut, penggunaan bahan bakar rendah sulfur merupakan metode yang paling banyak diterapkan karena relatif mudah diimplementasikan tanpa memerlukan modifikasi besar terhadap sistem permesinan kapal, meskipun konsekuensinya adalah meningkatnya biaya operasional akibat harga bahan bakar yang lebih tinggi [7], [8].

Di Indonesia, implementasi MARPOL Annex VI didukung melalui Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 29 Tahun 2014 tentang Pencegahan Pencemaran Lingkungan Maritim, serta Surat Edaran Direktur Jenderal Perhubungan Laut Nomor UM.003/93/14/DJPL-18 Tahun 2018 mengenai pembatasan kandungan sulfur bahan bakar kapal dan kewajiban penyampaian data konsumsi bahan bakar. Regulasi nasional tersebut mengharuskan setiap kapal memiliki dokumen Bunker Delivery Note (BDN) sebagai bukti bahwa bahan bakar yang digunakan memenuhi persyaratan kandungan sulfur sesuai ketentuan MARPOL Annex VI [9], [10]. Kapal Anchor Handling Tug Supply (AHTS) merupakan salah satu jenis kapal pendukung kegiatan eksplorasi dan produksi minyak lepas pantai yang memiliki karakteristik operasi dengan beban mesin tinggi serta konsumsi bahan bakar yang relatif besar. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan emisi gas buang apabila tidak didukung oleh penggunaan bahan bakar yang sesuai dengan standar internasional. Oleh karena itu, implementasi MARPOL Annex VI Regulation 14 pada kapal AHTS menjadi aspek penting dalam menjamin kepatuhan terhadap regulasi lingkungan sekaligus mendukung operasional pelayaran yang berkelanjutan.

Berbagai penelitian sebelumnya umumnya berfokus pada analisis dampak penerapan *Global Sulphur Cap* terhadap biaya operasional perusahaan pelayaran, evaluasi penggunaan *scrubber*, maupun pengembangan bahan bakar alternatif seperti LNG dan metanol [7], [11], [12]. Sementara itu, penelitian yang secara khusus mengevaluasi implementasi MARPOL Annex VI melalui analisis Bunker Delivery Note, kandungan sulfur bahan bakar, serta estimasi emisi SO₂ pada kapal operasional di Indonesia masih relatif terbatas. Padahal, evaluasi terhadap dokumen bunker dan karakteristik bahan bakar merupakan indikator utama dalam proses inspeksi Port State Control (PSC) untuk menilai kepatuhan kapal terhadap MARPOL Annex VI. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis implementasi MARPOL Annex VI Regulation 14 pada kapal AHTS ERA INDONESIA melalui evaluasi penggunaan bahan bakar rendah sulfur, pemeriksaan Bunker Delivery Note, serta analisis estimasi emisi hasil pembakaran bahan bakar. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai tingkat kepatuhan kapal terhadap regulasi internasional, mengidentifikasi kendala implementasi, serta menjadi masukan bagi perusahaan pelayaran dalam meningkatkan pengelolaan lingkungan maritim yang berkelanjutan.

METODOLOGI

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dengan metode studi kasus (*case study*). Pendekatan ini dipilih karena bertujuan menggambarkan secara komprehensif implementasi MARPOL Annex VI Regulation 14 mengenai pembatasan emisi Sulphur Oxides (SOx) dan *Particulate Matter* pada kapal AHTS ERA INDONESIA berdasarkan kondisi operasional yang sebenarnya. Metode studi kasus memungkinkan eksplorasi secara mendalam terhadap penerapan regulasi melalui analisis dokumen, observasi lapangan, dan wawancara dengan awak kapal [13], [14]. Selain data kualitatif, penelitian juga memanfaatkan data kuantitatif berupa kandungan sulfur bahan bakar, volume bunker, densitas bahan bakar, dan simulasi emisi sebagai pendukung dalam memperkuat hasil analisis.

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di atas kapal Anchor Handling Tug Supply (AHTS) ERA INDONESIA, yaitu kapal pendukung kegiatan lepas pantai dengan Gross Tonnage (GT) sebesar 1.537 GT. Kapal ini dipilih karena memiliki karakteristik operasional dengan konsumsi bahan bakar yang tinggi sehingga implementasi MARPOL Annex VI Regulation 14 menjadi aspek penting dalam pengendalian emisi gas buang. Pengumpulan data dilakukan selama periode Mei 2025 hingga Mei 2026 melalui observasi operasional kapal, pemeriksaan dokumen *Bunker Delivery Note* (BDN), wawancara dengan awak kapal, serta pengumpulan data konsumsi dan karakteristik bahan bakar.

Jenis dan Sumber Data

Data penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi langsung terhadap operasional kapal, wawancara semi-terstruktur dengan Chief Engineer dan personel bagian mesin, serta pengamatan terhadap proses *bunkering*, penyimpanan sampel bahan bakar, dan pencatatan konsumsi bahan bakar. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari studi literatur, dokumen kapal, serta berbagai regulasi nasional dan internasional, seperti Bunker Delivery Note (BDN), *Fuel Oil Record*, data konsumsi bahan bakar, kandungan sulfur bahan bakar, *International Air Pollution Prevention Certificate* (IAPP) apabila tersedia, MARPOL Annex VI Regulation 14, Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 29 Tahun 2014, dan Surat Edaran Direktorat Jenderal Perhubungan Laut Nomor UM.003/93/14/DJPL-18. Penggunaan berbagai sumber data tersebut bertujuan meningkatkan validitas penelitian melalui teknik triangulasi [15].

Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur, observasi lapangan, wawancara, dan dokumentasi. Studi literatur digunakan untuk memperoleh landasan teoritis mengenai MARPOL Annex VI, IMO Global Sulphur Cap, pengendalian emisi kapal, serta penelitian terdahulu yang relevan. Observasi lapangan dilakukan secara langsung terhadap penggunaan bahan bakar, prosedur *bunkering*, pencatatan konsumsi bahan bakar, penyimpanan sampel, dan pemeriksaan dokumen bunker tanpa keterlibatan peneliti dalam aktivitas operasional kapal [13]. Wawancara semi-terstruktur dilakukan kepada personel bagian mesin untuk memperoleh informasi mengenai implementasi regulasi, kendala operasional, dan prosedur pengelolaan

bahan bakar. Selanjutnya, dokumentasi dilakukan dengan mengumpulkan dan menganalisis dokumen operasional kapal, khususnya *Bunker Delivery Note*, data konsumsi bahan bakar, spesifikasi bahan bakar, serta dokumen pendukung lainnya.

Variabel Penelitian

Penelitian ini tidak menggunakan variabel bebas dan terikat sebagaimana penelitian eksperimental, tetapi menggunakan indikator implementasi regulasi yang dianalisis secara deskriptif. Indikator tersebut meliputi kandungan sulfur bahan bakar, kelengkapan dokumen *Bunker Delivery Note*, beban mesin, volume konsumsi bahan bakar, estimasi emisi SO₂, SO_x, dan *Particulate Matter*, serta tingkat kesesuaian operasional kapal terhadap ketentuan MARPOL Annex VI Regulation 14.

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui analisis kepatuhan dokumen, analisis estimasi emisi, dan analisis deskriptif. Analisis kepatuhan dilakukan dengan memeriksa Bunker Delivery Note (BDN) untuk memastikan informasi mengenai jenis bahan bakar, jumlah, densitas, pemasok, tanggal bunker, dan kandungan sulfur telah sesuai dengan ketentuan MARPOL Annex VI Regulation 14, yaitu batas maksimum 0,50% m/m bagi kapal yang beroperasi di luar *Emission Control Area* (ECA) [2]. Selanjutnya dilakukan estimasi massa sulfur dan sulfur dioksida (SO₂) berdasarkan volume bahan bakar, densitas, dan persentase kandungan sulfur menggunakan persamaan:

$$M_{fuel} = V \times \rho,$$

dengan M_{fuel} adalah massa bahan bakar (kg), V merupakan volume bahan bakar (L), dan ρ adalah densitas bahan bakar (kg/L). Massa sulfur dihitung menggunakan persamaan

$$M_S = M_{fuel} \times S,$$

dengan S merupakan fraksi massa sulfur. Selanjutnya estimasi massa sulfur dioksida dihitung menggunakan persamaan

$$M_{SO_2} = 2 \times M_S$$

berdasarkan asumsi bahwa seluruh sulfur teroksidasi menjadi SO₂ selama proses pembakaran [16]. Hasil analisis tersebut kemudian diinterpretasikan secara deskriptif dengan menghubungkan kondisi operasional kapal terhadap implementasi MARPOL Annex VI Regulation 14 untuk mengidentifikasi tingkat kepatuhan, kendala, dan upaya yang dilakukan dalam memenuhi persyaratan regulasi internasional.

HASIL PENELITIAN

Implementasi MARPOL Annex VI Regulation 14 pada Kapal AHTS ERA INDONESIA

Kapal AHTS ERA INDONESIA merupakan kapal jenis *Anchor Handling Tug Supply* (AHTS) dengan Gross Tonnage (GT) sebesar 1.537 GT yang beroperasi sebagai kapal pendukung kegiatan lepas pantai. Karakteristik operasional kapal yang melibatkan penggunaan

mesin diesel berdaya besar menyebabkan konsumsi bahan bakar relatif tinggi sehingga aspek pengendalian emisi gas buang menjadi salah satu perhatian utama dalam operasional kapal. Implementasi MARPOL Annex VI Regulation 14 pada kapal ini difokuskan pada pemenuhan batas kandungan sulfur bahan bakar sebagai upaya mengurangi emisi Sulphur Oxides (SOx) dan *Particulate Matter*.

Hasil observasi menunjukkan bahwa penerapan regulasi dilakukan melalui penggunaan Marine Gas Oil (MGO) Low Sulphur, pemeriksaan Bunker Delivery Note (BDN) setiap penerimaan bahan bakar, penyimpanan sampel bahan bakar (*fuel oil sample*), serta pencatatan konsumsi bahan bakar selama operasional kapal. Prosedur tersebut telah sesuai dengan ketentuan MARPOL Annex VI yang mewajibkan setiap kapal memiliki bukti administratif mengenai spesifikasi bahan bakar yang digunakan [2]. Selain memenuhi persyaratan regulasi internasional, kelengkapan dokumen bunker juga menjadi salah satu aspek utama dalam pemeriksaan Port State Control (PSC) terhadap kapal yang beroperasi di pelayaran internasional [17].

Implementasi tersebut menunjukkan bahwa strategi kepatuhan yang diterapkan kapal lebih menitikberatkan pada penggunaan bahan bakar rendah sulfur dibandingkan pemasangan Exhaust Gas Cleaning System (*scrubber*). Pendekatan ini dinilai lebih sederhana karena tidak memerlukan modifikasi besar terhadap sistem permesinan kapal, meskipun konsekuensinya adalah meningkatnya biaya operasional akibat penggunaan bahan bakar dengan kualitas yang lebih tinggi [7].

Analisis Penggunaan Bahan Bakar Rendah Sulfur

Evaluasi terhadap Bunker Delivery Note (BDN) menunjukkan bahwa seluruh bahan bakar yang digunakan selama periode penelitian merupakan Marine Gas Oil (MGO) Low Sulphur. Kandungan sulfur bahan bakar berkisar antara 0,07% hingga 0,11% m/m, dengan seluruh nilai berada jauh di bawah batas maksimum 0,50% m/m sebagaimana dipersyaratkan oleh MARPOL Annex VI Regulation 14 untuk kapal yang beroperasi di luar *Emission Control Area* (ECA). Rata-rata kandungan sulfur berdasarkan enam data *bunkering* sebesar sekitar 0,088% m/m, sedangkan kandungan sulfur tertinggi tercatat sebesar 0,11% m/m pada pengisian bahan bakar bulan Januari 2026 dan kandungan terendah sebesar 0,07% m/m pada bulan November 2025. Variasi tersebut masih berada pada rentang yang sangat aman terhadap batas maksimum yang ditetapkan IMO.

Selain kandungan sulfur, dokumen BDN juga memuat informasi mengenai volume bahan bakar, densitas, pemasok, lokasi *bunkering*, serta tanggal pengisian bahan bakar. Kelengkapan informasi tersebut menunjukkan bahwa proses pengadaan bahan bakar telah mengikuti prosedur administrasi yang dipersyaratkan oleh MARPOL Annex VI. Menurut IMO, keberadaan BDN memiliki fungsi penting sebagai bukti legal yang menunjukkan kesesuaian spesifikasi bahan bakar selama proses inspeksi maupun audit lingkungan [2]. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Schinas dan Stefanakos [11] yang menyatakan bahwa sebagian besar operator kapal memilih menggunakan Low Sulphur Fuel Oil (LSFO) atau Marine Gas Oil (MGO) sebagai strategi utama dalam memenuhi kebijakan IMO Global Sulphur Cap, terutama bagi kapal yang belum memasang *scrubber*. Penggunaan bahan bakar rendah sulfur dinilai lebih praktis meskipun memerlukan biaya operasional yang lebih tinggi.

Estimasi Emisi Sulphur Oxides (SO_x)

Analisis terhadap simulasi hasil pembakaran menunjukkan adanya hubungan yang konsisten antara kandungan sulfur bahan bakar dan potensi pembentukan emisi sulfur dioksida (SO₂). Berdasarkan pendekatan stoikiometri, peningkatan kandungan sulfur dalam bahan bakar secara langsung meningkatkan massa sulfur yang mengalami oksidasi selama proses pembakaran sehingga menghasilkan konsentrasi SO₂ dan SO_x yang lebih tinggi [16]. Data simulasi menunjukkan bahwa penggunaan bahan bakar dengan kandungan sulfur 0,07% m/m menghasilkan konsentrasi SO₂ sekitar 39 ppm, sedangkan pada kandungan sulfur 0,11% m/m konsentrasi SO₂ meningkat menjadi 61 ppm. Peningkatan tersebut juga diikuti oleh kenaikan nilai SO_x dari 110 mg/Nm³ menjadi 148 mg/Nm³, serta peningkatan *Particulate Matter* dari 35 mg/Nm³ menjadi 49 mg/Nm³.

Selain dipengaruhi oleh kandungan sulfur, besarnya emisi juga dipengaruhi oleh beban kerja mesin. Pada kondisi beban mesin yang lebih tinggi, kebutuhan bahan bakar meningkat sehingga laju pembakaran menjadi lebih besar. Kondisi tersebut menyebabkan peningkatan pembentukan SO₂ meskipun bahan bakar yang digunakan masih memenuhi standar sulfur rendah. Fenomena ini sesuai dengan hasil penelitian Bouman *et al.* [12] yang menjelaskan bahwa besarnya emisi kapal dipengaruhi oleh kombinasi antara kualitas bahan bakar, karakteristik mesin, dan beban operasional selama pelayaran. Meskipun terjadi variasi konsentrasi SO₂ pada setiap kondisi operasi, seluruh hasil simulasi masih menunjukkan kategori emisi yang relatif rendah dan terkendali. Hal tersebut mengindikasikan bahwa penggunaan MGO Low Sulphur mampu memberikan kontribusi nyata terhadap pengurangan emisi SO_x dibandingkan penggunaan Heavy Fuel Oil (HFO) dengan kandungan sulfur yang lebih tinggi.

Analisis Kepatuhan terhadap MARPOL Annex VI Regulation 14

Evaluasi terhadap implementasi regulasi menunjukkan bahwa kapal AHTS ERA INDONESIA telah memenuhi ketentuan utama MARPOL Annex VI Regulation 14. Kepatuhan tersebut dibuktikan melalui penggunaan bahan bakar dengan kandungan sulfur di bawah batas maksimum, kelengkapan dokumen Bunker Delivery Note, penyimpanan sampel bahan bakar, serta pencatatan konsumsi bahan bakar secara berkala. Seluruh dokumen tersebut tersedia sebagai bagian dari sistem administrasi operasional kapal.

Penelitian ini juga menunjukkan bahwa kapal tidak menggunakan scrubber sebagai sistem pengendalian emisi utama. Sebaliknya, strategi kepatuhan dilakukan melalui penggunaan bahan bakar rendah sulfur sehingga seluruh emisi yang dihasilkan telah memenuhi batas yang dipersyaratkan. Pendekatan tersebut sesuai dengan rekomendasi IMO bahwa kapal dapat memilih salah satu dari beberapa alternatif pemenuhan regulasi, yaitu menggunakan bahan bakar rendah sulfur, memasang *scrubber*, atau menggunakan bahan bakar alternatif seperti LNG dan metanol [5].

Dari sisi operasional, strategi penggunaan bahan bakar rendah sulfur memberikan keuntungan berupa kemudahan implementasi karena tidak memerlukan perubahan desain mesin maupun investasi tambahan pada sistem pembersih gas buang. Namun demikian, strategi ini juga memiliki kelemahan berupa meningkatnya biaya operasional akibat harga bahan bakar rendah sulfur yang relatif lebih tinggi dibandingkan bahan bakar konvensional [7].

Kendala Implementasi Regulasi

Meskipun secara umum kapal telah memenuhi persyaratan MARPOL Annex VI, penelitian menemukan beberapa kendala dalam implementasinya. Kendala utama adalah ketersediaan bahan bakar rendah sulfur yang belum merata di seluruh pelabuhan, sehingga perusahaan harus melakukan perencanaan pengadaan bahan bakar dengan lebih baik. Selain itu, harga Marine Gas Oil (MGO) yang relatif lebih tinggi dibandingkan Heavy Fuel Oil (HFO) meningkatkan biaya operasional kapal.

Kendala lain adalah keterbatasan pengukuran emisi secara langsung. Evaluasi emisi pada penelitian ini masih menggunakan pendekatan simulasi berdasarkan kandungan sulfur bahan bakar sehingga belum sepenuhnya menggambarkan kondisi aktual gas buang mesin. Penggunaan Continuous Emission Monitoring System (CEMS) pada penelitian mendatang akan menghasilkan data emisi yang lebih akurat dan mampu menggambarkan performa sistem pembakaran secara real time [16].

Selain aspek teknis, peningkatan kompetensi awak kapal mengenai implementasi MARPOL Annex VI juga menjadi faktor penting dalam menjaga kepatuhan operasional. Pemahaman terhadap prosedur *bunkering*, pemeriksaan BDN, penyimpanan sampel bahan bakar, serta pencatatan konsumsi bahan bakar akan meminimalkan potensi ketidaksesuaian selama proses inspeksi oleh otoritas pelabuhan.

Implikasi Penelitian

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan Marine Gas Oil Low Sulphur merupakan strategi yang efektif dalam memenuhi persyaratan MARPOL Annex VI Regulation 14 pada kapal AHTS ERA INDONESIA. Kepatuhan tidak hanya ditentukan oleh kualitas bahan bakar, tetapi juga oleh konsistensi pengelolaan dokumen bunker, pengawasan operasional mesin, serta kompetensi awak kapal dalam menerapkan prosedur pengendalian pencemaran udara.

Secara praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi acuan bagi perusahaan pelayaran dalam menyusun kebijakan pengadaan bahan bakar, memperkuat sistem dokumentasi operasional, dan meningkatkan kesiapan menghadapi inspeksi Port State Control. Dari sisi akademik, penelitian ini memperkaya kajian mengenai implementasi MARPOL Annex VI pada kapal pendukung lepas pantai di Indonesia, yang hingga saat ini masih relatif terbatas dibandingkan penelitian mengenai kapal niaga atau kapal peti kemas.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa implementasi MARPOL Annex VI Regulation 14 pada kapal AHTS ERA INDONESIA telah dilaksanakan dengan baik melalui penggunaan Marine Gas Oil (MGO) Low Sulphur, pemeriksaan Bunker Delivery Note (BDN), penyimpanan sampel bahan bakar, serta pencatatan konsumsi bahan bakar sebagai bagian dari sistem pengendalian operasional kapal. Berdasarkan hasil analisis terhadap data *bunkering*, kandungan sulfur bahan bakar berada pada kisaran 0,07–0,11% m/m, sehingga seluruhnya berada di bawah batas maksimum 0,50% m/m sebagaimana dipersyaratkan dalam MARPOL Annex VI Regulation 14 untuk kapal yang beroperasi di luar *Emission Control Area* (ECA).

Hasil estimasi emisi menunjukkan bahwa peningkatan kandungan sulfur bahan bakar dan

beban mesin berpengaruh terhadap meningkatnya potensi pembentukan SO₂, SO_x, dan *Particulate Matter*. Namun demikian, penggunaan bahan bakar rendah sulfur mampu menjaga tingkat emisi tetap relatif rendah dan terkendali sehingga mendukung kepatuhan kapal terhadap regulasi internasional mengenai pencegahan pencemaran udara dari kapal. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan bahan bakar rendah sulfur merupakan strategi yang efektif bagi kapal yang belum dilengkapi dengan sistem Exhaust Gas Cleaning System (scrubber).

Meskipun demikian, implementasi regulasi masih menghadapi beberapa tantangan, antara lain keterbatasan ketersediaan bahan bakar rendah sulfur di beberapa pelabuhan, meningkatnya biaya operasional akibat penggunaan bahan bakar berkualitas tinggi, serta belum tersedianya sistem pemantauan emisi secara berkelanjutan. Oleh karena itu, peningkatan pengelolaan dokumen bunker, penguatan kompetensi awak kapal, dan penerapan sistem pemantauan emisi yang lebih komprehensif menjadi langkah penting untuk mempertahankan dan meningkatkan kepatuhan terhadap MARPOL Annex VI Regulation 14 serta mendukung terwujudnya operasional pelayaran yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Maritime Organization. (2021). *Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020*. London, United Kingdom: International Maritime Organization.
- [2] International Maritime Organization. (2023). *MARPOL: Annex VI – Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships* (2023 ed.). London, United Kingdom: International Maritime Organization.
- [3] World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- [4] United Nations Conference on Trade and Development. (2024). *Review of Maritime Transport 2024*. Geneva, Switzerland: United Nations.
- [5] International Maritime Organization. (2020). *IMO 2020 – Cutting sulphur oxide emissions*. London, United Kingdom: International Maritime Organization.
- [6] DNV. (2023). *Maritime Forecast to 2050*. Oslo, Norway: DNV.
- [7] Rutherford, D., & Comer, B. (2020). *The International Maritime Organization's 2020 global sulfur cap*. Washington, DC: International Council on Clean Transportation (ICCT).
- [8] International Energy Agency. (2021). *The Future of Hydrogen and Alternative Marine Fuels*. Paris, France: International Energy Agency.
- [9] Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2014). *Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 29 Tahun 2014 tentang Pencegahan Pencemaran Lingkungan Maritim*. Jakarta: Kementerian Perhubungan Republik Indonesia.
- [10] Direktorat Jenderal Perhubungan Laut. (2018). *Surat Edaran Nomor UM.003/93/14/DJPL-18 tentang Batasan Kandungan Sulfur pada Bahan Bakar dan Kewajiban Penyampaian Konsumsi Bahan Bakar di Kapal*. Jakarta: Kementerian Perhubungan Republik Indonesia.

- [11] Schinas, O., & Stefanakos, C. N. (2020). Selecting technologies to comply with the 2020 sulphur cap for shipping. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 84, 102340. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102340>
- [12] Bouman, E. A., Lindstad, E., Rialland, A. I., & Strømman, A. H. (2017). State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing greenhouse gas emissions from shipping – A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 408–421. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022>
- [13] Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th ed.). Thousand Oaks, CA: SAGE Publications.
- [14] Yin, R. K. (2024). *Case study research and applications: Design and methods* (7th ed.). Thousand Oaks, CA: SAGE Publications.
- [15] Patton, M. Q. (2023). *Qualitative research & evaluation methods* (5th ed.). Thousand Oaks, CA: SAGE Publications.
- [16] European Environment Agency. (2023). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023: Shipping emissions*. Copenhagen, Denmark: European Environment Agency.
- [17] Paris Memorandum of Understanding on Port State Control. (2024). *Procedures for Port State Control 2024*. The Hague, Netherlands: Paris MoU Secretariat.
- [18] DNV. (2024). *Alternative Fuels Insight (AFI): Annual report 2024*. Oslo, Norway: DNV.