

# Pengaruh Sistem *Blow Purifier* Terhadap Efisiensi Kerja dan Volume Sludge Tank (studi Kasus: Kapal SLM Marsha)

Dewi Amara Parardhya<sup>1</sup>, Frenki Imanto<sup>2</sup>, Maulidiah Rahmawati<sup>3</sup>, Monika Retno Gunarti<sup>4</sup>, Intan Sianturi<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal (TRPK), Politeknik Pelayaran (Polteknepel) Surabaya  
Jl. Gunung Anyar Boulevard No. 1, Gunung Anyar, Surabaya, Jawa Timur  
Email: [dewiamara97@gmail.com](mailto:dewiamara97@gmail.com), [frenk.fr1@gmail.com](mailto:frenk.fr1@gmail.com), [maulidiah@polteknepel-sby.ac.id](mailto:maulidiah@polteknepel-sby.ac.id),  
[monika.retno@polteknepel-sby.ac.id](mailto:monika.retno@polteknepel-sby.ac.id), [intan52.anturi@gmail.com](mailto:intan52.anturi@gmail.com)

## ABSTRAK

Sistem blow purifier merupakan salah satu komponen penting dalam menjaga efisiensi kerja purifier minyak pelumas serta pengelolaan sludge di kapal. Permasalahan yang sering terjadi adalah ketidakkonsistenan proses pembuangan sludge pada sistem blow manual yang dapat menurunkan efisiensi kerja purifier dan meningkatkan volume sludge tank. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain deskriptif komparatif untuk membandingkan efektivitas sistem blow manual dan otomatis pada purifier minyak pelumas di Kapal SLM Marsha. Data penelitian diperoleh dari Engine Log Book dan Oil Record Book (ORB) selama periode September 2024 hingga Juli 2025. Analisis data dilakukan menggunakan statistik deskriptif, uji normalitas Shapiro-Wilk, serta uji Mann-Whitney U untuk mengetahui perbedaan signifikan antara kedua sistem blow. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem blow otomatis memiliki konsistensi interval blow yang lebih stabil dibandingkan sistem manual, sehingga meningkatkan efisiensi kerja purifier dan menurunkan volume sludge yang terakumulasi di sludge tank. Selain itu, penggunaan sistem blow otomatis mampu mengurangi risiko overflow sludge tank dan meningkatkan kepatuhan terhadap regulasi MARPOL Annex I Regulation 12 terkait kapasitas tangki sludge. Dengan demikian, sistem blow otomatis terbukti lebih efektif dalam meningkatkan efisiensi operasional purifier dan pengelolaan sludge di kapal.

**Kata kunci:** Sistem *Blow Purifier*, efisiensi kerja, volume sludge tank, MARPOL Annex I

## ABSTRACT

*The blow purifier system is a key component in maintaining the operational efficiency of the lubricating oil purifier and managing sludge on board a vessel. A common issue is the inconsistency of the sludge discharge process in manual blow systems, which can reduce the purifier's operational efficiency and increase the volume of the sludge tank. Therefore, this study employs a quantitative approach with a descriptive-comparative design to compare the effectiveness of manual and automatic blow systems on the lubricating oil purifier aboard the SLM Marsha. Research data were obtained from the Engine Log Book and Oil Record Book (ORB) during the period from September 2024 to July 2025. Data analysis was conducted using descriptive statistics, the Shapiro-Wilk normality test, and the Mann-Whitney U test to determine significant differences between the two blow systems. The results indicate that the automatic blow system maintains a more stable blow interval consistency compared to the manual system, thereby improving the purifier's operational efficiency and reducing the volume of sludge accumulated in the sludge tank. Furthermore, the use of the automatic blow system reduces the risk of sludge tank overflow and improves compliance with MARPOL Annex I Regulation 12 regarding sludge tank capacity. Thus, the automatic blow system has proven to be more effective in improving the operational efficiency of the purifier and sludge management on board the vessel.*

**Keywords:** Purifier blow system, operational efficiency, sludge tank volume, MARPOL Annex I

## Pendahuluan

Industri maritim global saat ini terus dipacu untuk menyeimbangkan dua kepentingan besar: mendongkrak efisiensi operasional armada sekaligus mematuhi regulasi lingkungan laut yang makin ketat [1]. Isu pencemaran laut akibat limbah operasional kapal bukan hanya dari insiden besar kapal tanker, tetapi juga akumulasi tumpahan kecil (polusi kronis) dari operasional permesinan kargo biasa masih menjadi tantangan serius bagi keberlanjutan ekosistem laut [2]. Merespons hal tersebut, komunitas internasional melalui *International Maritime Organization* (IMO) memberlakukan *International*

*Convention for the Prevention of Pollution from Ships* (MARPOL) Annex I yang mengatur pencegahan polusi minyak [3]. Aturan ini secara spesifik menetapkan batas maksimum kandungan minyak buangan sebesar 15 ppm serta mewajibkan penyediaan *sludge tank* dengan kapasitas memadai [4].

Sebagai negara kepulauan dengan lalu lintas laut yang amat sibuk, Indonesia memiliki kerentanan tinggi terhadap isu tumpahan minyak operasional [5]. Pemantauan satelit menunjukkan ratusan sebaran *slicks* minyak sering terdeteksi di perairan nasional tiap tahunnya, yang tidak jarang berujung pada kerugian ekologis dan ekonomi bagi masyarakat pesisir [6]. Kasus-kasus masa lalu menggarisbawahi betapa pentingnya konsistensi awak kapal dalam menjalankan standar pengelolaan limbah minyak dan residunya (*sludge*) secara ketat sesuai regulasi internasional [7].

Di kamar mesin, jantung dari pengelolaan fluida pelumas ini berada pada sistem *purifier*. Purifier minyak lumas tipe sentrifugal sangat vital fungsinya untuk memisahkan air dan kontaminan padat dari minyak pelumas demi menjaga keandalan mesin induk [8]. Teknologi modern mengandalkan rotasi tinggi antara 7.000 hingga 10.000 rpm untuk mendapatkan proses pemisahan optimal [9]. Namun, ada satu kendala operasional yang kerap dikeluhkan oleh para *engineer* di kapal, yaitu seputar proses pembuangan kotoran (*blow sludge*). Pada sistem *blow* manual, ketepatan waktu pembuangan sangat bergantung pada manusia, sehingga rawan memicu inkonsistensi yang berujung pada penumpukan *sludge* di mangkuk (*bow*) purifier [10]. Akumulasi ini, jika dibiarkan, tidak hanya menurunkan performa pelumasan tetapi juga memaksa tangki *sludge* lebih cepat penuh [11].

Urgensi terhadap efisiensi purifier ini sejalan dengan tren transisi ke *green shipping* dan dekarbonisasi operasional [12]. Meski otomatisasi purifier sudah banyak dipakai, masih ada celah literatur yang secara kuantitatif membandingkan performa sistem *blow* manual versus otomatis, utamanya terkait korelasi langsungnya terhadap volume *sludge tank* dan kepatuhan MARPOL Annex I [13]. Berangkat dari realita teknis di atas kapal SLM Marsha yang sempat mengalami masalah sinkronisasi *timing* panel PLC sehingga memicu alarm *No Sludge Discharge* penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara objektif perbedaan efektivitas antara sistem *blow* manual dan otomatis, serta menganalisis sejauh mana dampaknya terhadap laju produksi *sludge* dan risiko ketidakpatuhan terhadap regulasi maritim.

Meskipun sistem otomatisasi pada purifier telah banyak diadopsi untuk mendukung tren *green shipping*, penelitian-penelitian sebelumnya masih didominasi oleh kajian teknis perawatan purifier secara umum atau modifikasi perangkat keras filtrasi [13]. Masih terdapat kesenjangan literatur (*research gap*) mengenai analisis kuantitatif yang membandingkan secara langsung dampak operasional mode *blow* manual versus otomatis, khususnya dalam kaitannya dengan laju penumpukan volume *sludge tank* dan parameter kepatuhan MARPOL berbasis data log empiris.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengukur efektivitas sistem *blow* manual dibandingkan sistem otomatis pada purifier minyak pelumas di Kapal SLM Marsha. Kontribusi utama dari penelitian ini (*contribution statement*) adalah menghadirkan bukti empiris terkait dampak sistem otomasi purifier terhadap efisiensi volume *sludge tank* dan tingkat kepatuhan regulasi. Analisis komparasi berbasis log harian ini diharapkan mampu memberikan justifikasi teknis dan keilmuan (*novelty*) bagi operator kapal mengenai pentingnya kalibrasi sistem otomasi guna mencegah pembengkakan limbah minyak secara dini.

## Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain *ex post facto* dan deskriptif komparatif [14]. Pendekatan ini dirasa paling pas karena bertujuan membandingkan dua kondisi yang sudah berjalan secara empiris di lapangan yakni periode operasional menggunakan sistem *blow* manual versus otomatis tanpa melakukan manipulasi variabel [15]. Pengumpulan data dilaksanakan selama masa praktik laut di kapal kargo SLM Marsha (September 2024 hingga Juli 2025).

Sumber data primer ditarik langsung dari dokumentasi resmi kapal yang otentik. Data performa purifier, interval operasional, dan rekam jejak *troubleshooting* diekstrak dari *Engine Log Book* [16]. Sementara itu, data spesifik terkait fluktuasi volume limbah minyak dan pembuangannya diamati lewat catatan *Oil Record Book* (ORB) Code C dan Code D yang memiliki legalitas hukum internasional untuk verifikasi MARPOL [17]. Untuk memperkaya konteks teknis di balik angka-angka tersebut, penelitian ini juga menggali data sekunder lewat wawancara tidak terstruktur dengan *engineer* yang bertugas (Masinis 3) [18].

Dari sisi pengolahan data, seluruh rekaman operasional ditabulasi dan diuji secara statistik. Pengujian diawali dengan uji normalitas *Shapiro-Wilk* [19]. Karena jumlah sampel per kelompok observasi relatif kecil (kurang dari 30 hari pelayaran), uji ini sangat cocok untuk melihat sebaran data [20]. Mengingat hasil uji normalitas mengindikasikan distribusi data yang tidak normal pada kelompok sistem otomatis, peneliti menggunakan metode non-parametrik *Mann-Whitney U Test* [21]. Alat analisis ini digunakan untuk membuktikan secara signifikan apakah terdapat perbedaan riil antara laju akumulasi *sludge* sistem manual dan otomatis, bukan sekadar kebetulan fluktuasi mesin [22].

1. Statistik Deskriptif: Digunakan untuk menyajikan karakteristik data meliputi rata-rata (*mean*), deviasi standar, serta rentang minimum-maksimum dari volume *sludge tank* dan laju penumpukannya pada masing-masing fase operasi.
2. Uji Normalitas Shapiro-Wilk: Prasyarat pengujian ini dilakukan untuk mendeteksi distribusi data, mempertimbangkan jumlah sampel yang kecil ( $n < 50$ ), dengan 17 observasi otomatis dan 8 observasi manual. Distribusi dinyatakan normal apabila nilai probabilitas (*Sig.*)  $> 0,05$ .

3. Uji Non-Parametrik Mann-Whitney U: Mengingat hasil uji normalitas menunjukkan adanya variabel yang tidak berdistribusi normal, pengujian perbedaan rata-rata dialihkan pada metode non-parametrik Mann-Whitney U. Signifikansi perbedaan ditetapkan pada nilai *Asymp. Sig. (2-tailed)* < 0,05 untuk menolak Hipotesis Nol (H0).
4. Analisis Kepatuhan Normatif MARPOL: Kalkulasi normatif dilakukan guna menghitung kapasitas minimal tangki penampungan sesuai spesifikasi MARPOL Annex I Regulation 12.

Dari sisi pengolahan data, seluruh rekaman operasional diuji melalui *IBM SPSS Statistics 26*. Prasyarat normalitas dilakukan dengan uji *Shapiro-Wilk* mengingat jumlah sampel yang dianalisis relatif terbatas [19]. Berdasarkan data operasional, terdapat N=17 untuk periode otomatis dan N=8 untuk periode manual. Walaupun ukuran sampel tersebut tergolong kecil dan menjadi salah satu keterbatasan metodologis, analisis komparatif tetap dapat divalidasi dengan kuat secara statistik menggunakan pendekatan non-parametrik *Mann-Whitney U Test* yang dirancang tahan (*robust*) terhadap data bersampel kecil dengan distribusi yang tidak normal.

## Hasil Dan Pembahasan

### Diagnosis Masalah Teknis Sistem Blow Purifier

Analisis mendalam terhadap mekanisme kontrol PLC Siemens Smart Line memberikan penjelasan kausalitas atas permasalahan yang mendisrupsi operasional purifier di Kapal SLM Marsha. Pada fase operasional normal, sistem telah diprogram dengan presisi untuk melakukan proses pengeluaran lumpur. Parameter operasional utama yang terekam adalah sebagai berikut:

**Tabel 1.** Parameter Panel Siemens Smart Line Kapal SLM Marsha

No	Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
1	Starting program	100,0	Detik	–
2	Ready to seal	9,0	Detik	–
3	Waiting time	5,0	Detik	–
4	Open time	2,0	Detik	–
5	Supplementary seal	2,0	Detik	–
6	A.D washing	77,0	Detik	–
7	Cleaning time	20,0	Detik	–
8	Residue degree	5,0	Detik	–
9	Water sealing time	28,0	Detik	–
10	Pressure Protection Delay	20,0 → 28,0	Detik	Dikoreksi saat perbaikan
11	Disengaging time	3.600	Detik	Interval blow = 1 jam
12	Replacement time	10,0	Detik	–
13	Low pressure alarm	0,5	Bar	–
14	High voltage alarm	2,0	Bar	–
15	High temperature alarm	99	°C	–

Pengaturan *disengaging time* pada 3.600 detik menetapkan jadwal *blow* otomatis sebanyak 24 siklus dalam satu hari. Permasalahan timbul ketika indikator alarm "*No Sludge Discharge*" terus-menerus teraktivasi. Berdasarkan klarifikasi teknis dari perwira mesin jaga (Masinis 3), anomali ini bermuara pada cacat konfigurasi waktu pembacaan sensor.

Sistem PLC tidak memanfaatkan sensor optik langsung untuk memverifikasi keluarnya residu, melainkan mengukur diferensiasi tekanan air di ruang bawah piston (*distributor base*). Saat sistem hidrolik bekerja untuk membuka mangkuk sentrifugal, air pendorong akan terekresi terlebih dahulu yang diikuti oleh material *sludge*. Interval nilai bawaan (*default*) pada parameter "*Pressure Protection Delay*" ditetapkan selama 20 detik. Durasi waktu tersebut terbukti kurang presisi; sistem PLC mencapai batas waktu akhir (*time out*) sebelum siklus hidrolik selesai membuang *sludge* sepenuhnya, yang menyebabkan kesalahan interpretasi (*false alarm*) kegagalan sistem.

Kondisi tersebut diperburuk oleh temuan inspeksi fisik berupa degradasi dan goresan pada komponen *seal* (karet *O-ring*) di *bowl sliding piston*, yang berkontribusi terhadap pelambatan mekanika gerakan. Intervensi kuratif yang krusial dilakukan dengan kalibrasi parameter perangkat lunak; peningkatan "*Pressure Protection Delay*" dari 20 detik menjadi 28 detik memberikan ruang toleransi yang memadai bagi sensor tekanan untuk mengkalibrasi penurunan tekanan aktual. Bersamaan dengan penggantian *O-ring*, sistem otomasi berhasil dipulihkan secara menyeluruh.

### Komparasi Efisiensi Kerja Purifier

Transisi operasional menuju mode manual merepresentasikan penurunan efisiensi kerja yang terukur. Dokumentasi pada *Engine Log Book* memperlihatkan bahwa meskipun target operasional tetap ditetapkan pada 24 siklus per hari, tingkat konsistensi implementasinya mengalami deviasi.

Sistem otomatis yang diprogram melalui instrumen pewaktu (*timer*) mempertahankan tingkat konsistensi 100%. Sebaliknya, presisi operasional mode manual mengalami kontraksi pada level 85-90% akibat limitasi kapasitas manusia (kru

mesin) dalam mempertahankan kewaspadaan interval secara terus-menerus selama berdinam jaga. Penundaan jadwal pembuangan ini mendistorsi kapabilitas sentrifugal, di mana pengendapan *sludge* yang melewati batas toleransi waktu dapat menurunkan efisiensi filtrasi, dan pada puncaknya, menguras sebagian minyak pelumas yang masih fungsional ke jalur pembuangan. Akumulasi dari interupsi operasional (*downtime*) untuk menangani alarm dan perbaikan minor juga mendegradasi total jam kerja efektif instalasi dari kapasitas 24 jam penuh menjadi kisaran 23,5 hingga 23,7 jam per siklus dinas harian.

**Analisis Deskriptif Volume Sludge Tank**

Implikasi dari degradasi konsistensi tersebut terefleksi secara signifikan pada manajemen limbah, sebagaimana diregistrasi dalam *Oil Record Book* Code C. Analisis komparatif dari data tersebut diilustrasikan pada tabel statistik berikut:

**Tabel 2.** Statistik Deskriptif Volume Sludge Tank dan Laju Akumulasi

Parameter Statistik	Sistem Blow Otomatis (N=17)	Sistem Blow Manual (N=8)	Interpretasi
Mean Volume Sludge (m <sup>3</sup> )	1,2065	1,5025	Manual 24,5% lebih tinggi
Std. Deviation Vol. Sludge	0,024	0,203	Manual 8,5x lebih bervariasi
Minimum Volume Sludge (m <sup>3</sup> )	1,15	1,23	Titik awal berbeda
Maksimum Volume Sludge (m <sup>3</sup> )	1,23	1,86	Puncak manual 51,2% lebih tinggi
Laju akumulasi (m <sup>3</sup> /minggu)	0,025	0,045	Manual 80% lebih cepat
% Rerata thd kapasitas (10,4 m <sup>3</sup> )	11,4%	14,5%	+3,1 poin persentase
% Maksimum thd kapasitas	11,8%	17,9%	Masih jauh dari batas aman

Meskipun Tabel deskriptif di atas merepresentasikan lonjakan produksi limbah yang amat tajam. Rata-rata volume *sludge* yang terakumulasi di dalam tangki selama penggunaan metode manual meningkat sebesar 24,5% menjadi 1,5025 m<sup>3</sup>. Indikator yang paling mengkhawatirkan adalah akselerasi dari laju produksi limbah. Otomasi sistem mampu menekan penumpukan limbah pada margin 0,025 m<sup>3</sup> per minggu, sementara sistem manual menyebabkan percepatan volume menjadi 0,045 m<sup>3</sup> per minggu, yang mengindikasikan eskalasi hingga 80%. Nilai deviasi standar yang mencapai angka 0,203 mengonfirmasi tingginya varians data yang menggambarkan ketidakstabilan penumpukan material residu pada metode manual.

**Uji Hipotesis Statistik (Mann-Whitney U)**

Pengujian inferensial diaplikasikan guna memvalidasi apakah fenomena perbedaan hasil tersebut bersifat independen secara statistik. Proses verifikasi distribusi data menggunakan uji Shapiro-Wilk menghasilkan koefisien signifikansi (Sig.) sebesar 0,948 untuk fase manual (distribusi normal) dan Sig. 0,038 untuk fase otomatis (tidak berdistribusi normal). Berdasarkan prasyarat tersebut, analisis dialihkan pada pengujian non-parametrik Mann-Whitney U.

Hasil analisis *Test Statistics* Mann-Whitney U mengidentifikasi nilai sebagai berikut:

**Tabel 3.** Hasil Uji Mann-Whitney U — Test Statistics

Statistik	Volume Sludge Tank (m <sup>3</sup> )	Laju Akumulasi (m <sup>3</sup> /minggu)
Mann-Whitney U	2,500	,000
Wilcoxon W	155,500	153,000
Z	-3,847	-4,031
Asymp. Sig. (2-tailed)	<,001	<,001
Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]	<,001	<,001

Probabilitas statistik (*P-value*) yang tertera pada level < 0,001—jauh di bawah batas toleransi deviasi (alpha) 0,05 memutuskan penolakan absolut terhadap Hipotesis Nol (H0). Konklusinya membuktikan bahwa terdapat perbedaan yang sangat signifikan secara statistik pada efektivitas sistem *blow* otomatis bila dibandingkan dengan metode manual. Proporsi *Mean Rank* yang lebih dominan pada kelompok manual (21,50) berbanding kelompok otomatis (9,00) menjadi penegas bahwa laju akumulasi residu pada operasional manual secara konsisten selalu menduduki posisi keparahan tertinggi.

**Analisis Kepatuhan Regulasi MARPOL Annex I**

Evaluasi di tahap akhir dikorelasikan terhadap aspek legalitas kemaritiman internasional. Implementasi dari regulasi MARPOL Annex I Regulation 12 mempersyaratkan kapasitas tangki penyimpanan lumpur yang memadai. Proyeksi teoritis kelayakan kapasitas untuk Kapal SLM Marsha didasarkan pada rumus  $V_1 = K_1 \times C \times D$

- $K_1 = 0,015$  (kriteria untuk klasifikasi *Heavy Fuel Oil* / MFO).
- $C = 30$  Metrik Ton (parameter beban konsumsi operasional harian berdasar nota *bunker*).

- D = 30 hari (proyeksi durasi operasional standar laut bebas).

Hasil formulasi matematis menetapkan batas minimum wajib sebesar:

$$V_1 = 0,015 \times 30 \times 30 = 13,5 \text{ m}^3$$

Akan tetapi, penelusuran terhadap *Sounding Tables for Manual Operation* yang diterbitkan galangan mencantumkan kapasitas riil *sludge tank* kapal sebesar  $10,4 \text{ m}^3$ .

Keadaan ini mengindikasikan adanya defisit volume rancang bangun sebesar  $3,1 \text{ m}^3$  yang menempatkan status tangki kapal dalam kategori *under-capacity*. Mengingat trayek kapal berada di rute pesisir domestik dengan frekuensi sandar tinggi, manajemen risiko mitigasi peluberan ditangani secara proaktif oleh Manajemen Mesin (*Chief Engineer*) melalui koordinasi evakuasi limbah ke truk tangki darat, yang terregistrasi rapi dalam *Oil Record Book* (ORB).

Dalam kondisi ruang tampung yang sangat terbatas, presisi otomasi sistem *blow* memainkan peranan vital. Kalkulasi teoretis terkait durasi operasional hingga tangki menyentuh ambang batas kritis ( $80\%$  atau setara  $8,32 \text{ m}^3$ ) menunjukkan deviasi yang tajam:

- Estimasi Ketahanan Mode Manual:  $(8,32 - 1,51) / (0,045 / 7) = 1.059$  hari.
- Estimasi Ketahanan Mode Otomatis:  $(8,32 - 1,19) / (0,025 / 7) = 1.997$  hari.

Otomatisasi sistem mampu merepresi laju akumulasi residu sedemikian rupa, sehingga durasi toleransi keamanan (*safety margin*) dari potensi peluberan dapat digandakan hampir  $100\%$ . Data dokumentasi ORB Code D turut membuktikan komitmen kepatuhan lingkungan; *Oil Water Separator* (OWS) terpantau bekerja mendegradasi limbah air got sesuai baku mutu buangan  $15 \text{ ppm}$ . Seluruh variabel ini menetapkan kesimpulan bahwa operasional kapal tetap terjaga dalam batas aman dan memenuhi kepatuhan legal tata kelola lingkungan maritim global.

## Pembahasan

### Penyebab Gangguan Sistem Blow Otomatis dan Mekanisme Perbaikan

Kegagalan sistem otomasi pada periode Desember 2024–April 2025 yang memaksa transisi ke mode manual dipicu oleh alarm "*No Sludge Discharge*". Investigasi teknis menunjukkan bahwa *Programmable Logic Controller* (PLC) pada panel Siemens Smart Line mengalami disinkronisasi akibat parameter *Pressure Protection Delay* yang terlalu cepat (20 detik). Akibat durasi tersebut, PLC kehabisan tenggat waktu (*timeout*) sebelum *sludge* keluar sepenuhnya sehingga memicu alarm palsu. Problem ini diperparah oleh keausan *O-ring* pada *bowl sliding piston*. Setelah dilakukan koreksi *delay* menjadi 28 detik dan penggantian *O-ring*, instalasi otomatis kembali presisi. Hal ini menegaskan bahwa insiden tersebut merupakan persoalan kalibrasi teknis, bukan kegagalan prinsip otomasi itu sendiri.

### Pengaruh Sistem Blow terhadap Efisiensi Kerja Purifier

Sistem *blow* otomatis terbukti menjamin konsistensi jadwal pembuangan secara absolut ( $100\%$ ) berkat panduan *timer* elektronik, berbanding terbalik dengan metode manual yang hanya mampu menyentuh efektivitas  $85\text{--}90\%$ . Penurunan konsistensi operasional manual ini menyebabkan penumpukan dan penebalan *sludge* di dinding *bowl*, yang berimbas pada memburuknya kualitas pemisahan sentrifugal minyak serta menambah beban *downtime* awak kapal sekitar  $15\text{--}20$  menit setiap kali alarm palsu berbunyi. Kondisi ini memperkuat bukti bahwa otomasi sangat esensial dalam menjaga ritme kerja *purifier* agar tetap cepat dan terukur.

### Pengaruh Sistem Blow terhadap Volume Sludge Tank

Uji statistik memastikan bahwa pengoperasian manual berdampak signifikan terhadap lonjakan volume limbah, mempercepat laju akumulasi *sludge* hingga  $80\%$  ( $0,045 \text{ m}^3/\text{minggu}$ ) dibandingkan performa sistem otomatis ( $0,025 \text{ m}^3/\text{minggu}$ ). Saat dioperasikan otomatis, volume limbah cenderung stabil pada rentang yang sempit ( $1,15\text{--}1,23 \text{ m}^3$ ), sedangkan operasional manual menunjukkan grafik penumpukan yang terus merangkak naik secara progresif. Alhasil, batas aman keterisian tangki  $80\%$  ( $8,32 \text{ m}^3$ ) akan tersentuh jauh lebih cepat dalam waktu sekitar  $1.059$  hari pada mode manual, dibandingkan mode otomatis yang mampu bertahan hingga hampir  $1.997$  hari.

### Pengaruh OWS terhadap Pengelolaan Limbah Minyak Kapal

*Oil Water Separator* (OWS) berfungsi melengkapi sistem pengolahan limbah dengan menangani air got (*bilge water*), berdampingan dengan *purifier* yang mengurus residu pelumas (*sludge*). Saat efisiensi *blow purifier* merosot di mode manual, risiko pelumas bocor ke drainase kamar mesin semakin membesar, yang pada akhirnya akan melipatgandakan beban filtrasi OWS. Meski begitu, rekam jejak pada buku harian operasional mengonfirmasi bahwa unit OWS tetap bekerja secara presisi dalam mengelola volume limbah pembuangan ke laut sesuai dengan parameter keamanan maritim.

### Kedalaman Analisis Kinerja dan Visualisasi Akumulasi Sludge

Pengoperasian otomatis sukses mempertahankan konsistensi interval *blow*  $100\%$ , berbanding terbalik dengan mode manual yang hanya di kisaran  $85\text{--}90\%$ . Penurunan efisiensi manual ini memicu dampak domino pada mekanika fluida di dalam mangkuk *purifier*. Saat *blow* tertunda, lapisan kotoran (*sludge*) menebal dan mendesak batas pemisah antarmuka (*interface*) antara minyak dan air. Akibatnya, sebagian minyak pelumas yang sebenarnya masih bersih ikut terlempar keluar dari *bowl* menuju pembuangan *sludge port*.

Secara statistik (uji Mann-Whitney U;  $p$ -value  $< 0,001$ ), pengoperasian manual berdampak signifikan terhadap lonjakan laju akumulasi *sludge* hingga 80% ( $0,045 \text{ m}^3/\text{minggu}$ ) dibandingkan sistem otomatis ( $0,025 \text{ m}^3/\text{minggu}$ ). Perbedaan mencolok ini secara visual dapat diinterpretasikan melalui grafik tren (direpresentasikan melalui fluktuasi catatan ORB): pada mode otomatis, grafik volume *sludge* membentuk garis datar yang sangat stabil di kisaran sempit ( $1,15$ – $1,23 \text{ m}^3$ ). Sebaliknya, *trendline* pada periode manual menunjukkan kurva tanjakan yang terus mendaki secara agresif dari minggu ke minggu hingga mencapai puncaknya pada level  $1,86 \text{ m}^3$ .

### Perbandingan Literatur (Literature Comparison)

Temuan empiris di atas sangat sejalan dan menguatkan kajian teoritis yang dilakukan oleh Ahn et al. (2018) terkait otomasi sistem separator kapal. Dalam studinya, Ahn membuktikan bahwa kontrol otomatisasi meminimalisasi *oil loss* (kehilangan minyak lumas) secara drastis dibandingkan operasional konvensional, karena parameter sensor jauh lebih reaktif dalam membuka pintu *sludge* pada momentum viskositas yang tepat. Penelitian ini melengkapi temuan tersebut dengan pembuktian di lapangan (kapal kargo riil) bahwa kegagalan *timing* otomatisasi (yang beralih ke manual) berkontribusi langsung pada pembengkakan beban *sludge tank*.

### Implikasi terhadap Kepatuhan MARPOL Annex I

Meskipun ukuran bawaan *sludge tank* kapal tersebut tidak mencapai standar kapasitas minimum MARPOL, operasionalnya tetap berstatus legal karena realisasi pengisian tangki secara faktual sangat minim, yakni tidak pernah melampaui angka 17,9%. Mengingat kapal tidak dilengkapi dengan tungku pembakar (*incinerator*), kepatuhan lingkungan dijaga secara disiplin melalui strategi pembuangan limbah berkala ke fasilitas pelabuhan darat (*port reception facility*) dengan pencatatan administratif yang akurat. Untuk mengimbangi laju penumpukan limbah yang lebih agresif saat menggunakan *blow* manual, awak kapal dituntut untuk membuat perencanaan jadwal pembuangan yang jauh lebih proaktif.



Gambar 1. L.O Purifier

### Kritik Kepatuhan MARPOL (Risiko Desain Under-Capacity)

Berdasarkan kalkulasi regulasi MARPOL Annex I Regulation 12 (estimasi konsumsi  $30 \text{ MT}/\text{hari} \times 30 \text{ hari} \times 0,015$ ), Kapal SLM Marsha diwajibkan memiliki *sludge tank* minimum  $13,5 \text{ m}^3$ . Namun kenyataannya, kapasitas spesifikasi tangki kapal hanya  $10,4 \text{ m}^3$ . Fakta bahwa operasional saat ini tetap patuh (keterisian maksimal hanya menyentuh 17,9% tanpa adanya pembuangan ilegal ke laut) semata-mata karena adanya mitigasi manajerial yang baik dari awak kapal yakni pembuangan intensif dan terdokumentasi ke fasilitas penerima (*port reception facility*) di pelabuhan.

Namun, ditinjau secara kritis, kondisi *under-capacity* ini merupakan potensi risiko desain yang serius. Mengingat kapal ini tidak dilengkapi *incinerator*, kapal SLM Marsha memiliki kerentanan (*vulnerability*) tingkat tinggi jika sewaktu-waktu mengalami penundaan sandar panjang di tengah laut (misalnya akibat cuaca buruk) atau berlabuh di pelabuhan yang fasilitas pembuangan limbah daratnya tidak memadai. Dalam skenario darurat seperti itu, laju akumulasi *sludge* tinggi pada mode manual akan dengan cepat mereduksi toleransi batas aman (*safety margin*) tangki, yang memicu risiko lingkungan.

### Keterbatasan Penelitian

Untuk menjaga objektivitas hasil, penelitian ini memiliki beberapa batasan. Pertama, penelitian ini merupakan studi kasus tunggal (*single-case study*) pada satu unit armada (SLM Marsha) dengan spesifikasi permesinan Siemens Smart Line tertentu, sehingga hasilnya mungkin bervariasi jika diterapkan pada kapal dengan jenis kontrol *purifier* yang berbeda. Kedua, ukuran sampel data log operasional yang diolah relatif terbatas pada periode masa praktik layar ( $N=25$  observasi pengelompokan), sehingga penelitian belum memotret fluktuasi siklus limbah kapal dalam durasi tahunan penuh. Ketiga, studi ini tidak menggunakan uji laboratorium eksperimental secara langsung untuk mengecek kualitas fisik residu minyak (seperti viskositas dan kadar partikel) yang dihasilkan dari kedua *mode* tersebut.

## Simpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa sistem *blow purifier* otomatis memiliki keandalan dan efisiensi yang jauh lebih tinggi dibandingkan sistem manual karena mampu mempertahankan konsistensi operasional secara mutlak hingga 100%. Sebaliknya, pengoperasian manual hanya mencapai tingkat efektivitas 85–90% akibat tingginya ketergantungan pada faktor ketelitian manusia. Malfungsi yang sempat terjadi pada mode otomatis murni disebabkan oleh kendala teknis, yakni keausan *seal/O-ring* serta pengaturan waktu *Pressure Protection Delay* yang terlalu cepat (20 detik). Melalui penggantian komponen karet dan kalibrasi parameter menjadi 28 detik, sistem otomatis terbukti dapat kembali beroperasi secara normal dan presisi.

Dari segi pengelolaan limbah, sistem *blow* otomatis sangat efektif dalam menekan laju akumulasi *sludge* hingga 0,025 m<sup>3</sup>/minggu, atau 80% lebih rendah daripada metode manual. Meskipun kapasitas bawaan tangki *sludge* kapal secara teknis berada di bawah standar minimum MARPOL yang merupakan sebuah risiko desain yang rentan, operasionalnya saat ini tetap memenuhi regulasi karena level keterisian faktual tertinggi hanya mencapai 17,9%. Kepatuhan lingkungan ini terjaga berkat kedisiplinan kru dalam pencatatan *Oil Record Book* (ORB) dan manajemen pembuangan yang sistematis. Pada akhirnya, seluruh prosedur teknis ini bermuara pada prinsip bahwa keselamatan dan keamanan merupakan faktor fundamental yang harus diperhatikan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam menentukan kelayakan pelayanan transportasi laut kepada masyarakat [23].

Awak kapal disarankan secara operasional untuk rutin menginspeksi kondisi komponen kritis seperti *seal/O-ring* serta melakukan kalibrasi panel kontrol secara berkala agar sinkron dengan kondisi aktual mesin. Pihak manajemen perusahaan pelayaran perlu mendukung kelancaran operasional ini dengan menjamin ketersediaan suku cadang di atas kapal guna meminimalkan *downtime*. Selain itu, penyusunan *Standard Operating Procedure* (SOP) khusus penanganan alarm, pemanfaatan data riil ORB untuk jadwal pembuangan yang presisi, serta pertimbangan matang mengenai instalasi *incinerator* sangat dianjurkan untuk memitigasi risiko desain kapasitas tangki.

Untuk ranah akademik, integrasi materi *troubleshooting* berbasis *Programmable Logic Controller* (PLC) pada *purifier* modern ke dalam kurikulum pendidikan maritim sangat diperlukan agar para taruna lebih siap menghadapi realita teknologi di lapangan. Upaya peningkatan pengetahuan melalui pelaksanaan pelatihan bagi awak kapal secara berkelanjutan juga menjadi langkah krusial untuk meningkatkan keterampilan pelaut sehingga seluruh prosedur pengawasan dan perawatan permesinan berjalan optimal [24]. Ke depannya, penelitian serupa diharapkan dapat diperluas skalanya dengan melibatkan berbagai jenis armada dan tipe *purifier*, serta mencakup analisis langsung terhadap kualitas fisik minyak pelumas untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai efektivitas sistem pemurnian ini.

## Daftar Pustaka

- [1] P. Ehlers, "MARPOL Annex I: Prevention of pollution by oil from ships," in *International Maritime Environmental Law*, Springer, 2024, pp. 45-78.
- [2] K. Venkatraman and N. Bhatt, "Polusi laut dan penegakan regulasi maritim: Tinjauan sistem operasional," *Journal of Ocean Management*, vol. 12, no. 3, pp. 45-56, 2021.
- [3] International Maritime Organization (IMO), *MARPOL Consolidated Edition 2024: Articles, protocols, annexes and unified interpretations*, London: IMO, 2024.
- [4] International Maritime Organization (IMO), *MARPOL Annex I Regulation 12: Tanks for oil residues (sludge)*, London: IMO, 2021.
- [5] Haag and Reuter, "Satellite monitoring of operational oil spills in archipelagic waters," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 142, pp. 110-120, 2019.
- [6] ITOPF, *Oil Tanker Spill Statistics 2023*, London: International Tanker Owners Pollution Federation, 2023.
- [7] D. Effendi and A. Suryana, "Penegakan Regulasi MARPOL di Perairan Indonesia: Studi Kasus Tumpahan Minyak Operasional," *Jurnal Hukum Kelautan*, vol. 8, no. 2, pp. 33-45, 2022.
- [8] D. A. Taylor, *Introduction to Marine Engineering*, 3rd ed., Elsevier, 2023.
- [9] D. Woodyard, *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines*, 9th ed., Butterworth-Heinemann, 2009.
- [10] A. Karar and Y. Helali, "Operational challenges in marine centrifugal purifiers: Sludge accumulation and manual oversight," *Marine Engineering Review*, vol. 22, pp. 88-95, 2020.
- [11] G. Z. Kyzas and P. Chrysalidis, "Regulations for the management of oily wastes from ships: A comprehensive review," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 389, p. 121927, 2020.
- [12] G. Mallouppas and E. A. Yfantis, "Decarbonization in shipping industry: A review of research, technology development, and innovation proposals," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no. 4, p. 415, 2021.
- [13] X. Xiong, et al., "Technological advancements in shipboard purifier systems for energy efficiency," *Ocean Engineering*, vol. 210, p. 107532, 2020.
- [14] Sugiyono, *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*, 3rd ed., Bandung: Alfabeta, 2022.
- [15] U. Sekaran and R. Bougie, *Research Methods for Business: A Skill-Building Approach*, 7th ed., Wiley, 2016.

- [16] A. Rachmaniar and T. Haryono, "Validitas engine log book sebagai sumber data primer dalam penelitian operasional permesinan kapal," *Jurnal Penelitian Transportasi Laut*, vol. 24, no. 1, pp. 55-68, 2022.
- [17] A. Hussain, M. Rahman, and S. Lee, "MARPOL Annex I compliance assessment: Analysis of oil record book data from Port State Control inspections," *Marine Policy*, vol. 148, p. 105444, 2023.
- [18] L. J. Moleong, *Metodologi Penelitian Kualitatif*, Edisi Revisi, Bandung: PT Remaja Rosdakarya, 2017.
- [19] I. Ghazali, *Aplikasi Analisis Multivariate dengan Program IBM SPSS 26*, 10th ed., Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro, 2021.
- [20] J. W. Creswell and J. D. Creswell, *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*, 6th ed., SAGE Publications, 2023.
- [21] N. Indriantoro and B. Supomo, *Metodologi Penelitian Bisnis untuk Akuntansi & Manajemen*, Yogyakarta: BPF, 2018.
- [22] C. Ahn, M. Kim, and J. Choi, "Development of automatic system to discharge sludge in oil separator of marine engine," *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 412-421, 2018.
- [23] M. . Retno Gunarti and R. . Sugiharto, "Pengaruh Penerapan Ism Code Aturan 10 Tentang Pemeliharaan Kapal Dan Perlengkapannya Terhadap Keselamatan Transportasi Laut Studi Empiris Di Pt. Pelni (PERSERO)", *7samudra*, vol. 4, no. 1, Jun. 2019.
- [24] E. Kusumawati. "Analysis of the Improvement of Maritime Safety through Seafarer Skills Training Cooperation between Poltepel Surabaya and the Main Shipping Office of Tanjung Perak" *Devotion: Journal of Research and Community Service*, Vol 4 No.12, 2023.