

OPTIMALISASI *SCRUBBER* DALAM MENURUNKAN KADAR SULFUR DIOKSIDA DI KAPAL MV. CMA CGM ELBE

OPTIMALISATION SCRUBBER FOR REDUCE SULPHUR DIOXIDE ON VESSEL MV.CMA CGM ELBE

Akhmad Ikhsanul Kamal^{1*}, R. Bagus Wicaksono¹, Muhammad David², Benny Hidayat¹, Salfauqi Nurman¹

¹Program Studi Permesinan Kapal, Politeknik Pelayaran Malahayati

²Program Studi Sistem Kelistrikan Kapal, Politeknik Pelayaran Malahayati

*email: kamal.ikhsan68@gmail.com

ABSTRAK

Scrubber atau sering disebut juga sebagai "*scrubber* kapal", adalah perangkat yang digunakan pada kapal untuk mengurangi emisi gas buang dari mesin pembakaran internal yang menggunakan bahan bakar berbasis minyak, seperti diesel atau bunker fuel. *Exhaust gas cleaning systems (EGCS) scrubber* menjadi teknologi yang lebih sering digunakan kapal untuk mencapai kepatuhan terhadap batas sulphur. *Scrubber* ini bertujuan untuk mengurangi emisi gas sulphur dioksida (SO₂) pada nilai ambang batas 0.5% kandungan gas buang. Sulfur dioksida adalah salah satu spesies dari gas-gas oksida sulfur (SO_x). Gas ini sangat mudah terlarut dalam air, memiliki bau namun tidak berwarna, SO₂ dan gas-gas oksida sulfur lainnya terbentuk saat terjadi pembakaran bahan bakar fosil yang mengandung sulfur. Optimalisasi berasal dari kata optimal berarti terbaik, tertinggi. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode kualitatif deskriptif. Penelitian kualitatif adalah penelitian yang bersifat deskriptif dan cenderung menggunakan analisis. Landasan teori dimanfaatkan sebagai pemandu agar fokus penelitian sesuai dengan fakta di lapangan. Seperti peraturan IMO (Organisasi Maritim Internasional) yang membatasi kadar sulphur dalam bahan bakar kapal. Penelitian kualitatif adalah penelitian yang bersifat deskriptif dan cenderung analisis. Proses dan makna dimanfaatkan sebagai pemandu agar focus penelitian sesuai dengan fakta di lapangan. Penelitian ini adalah tentang optimalisasi *Scrubber* dalam menurunkan kadar sulphur dioksida di kapal MV. CMA CGM ELBE. Penyebab CEMS (*continuous emission monitoring system*) mengalami alarm *out of compliance* dikarenakan penurunan ph yang drastic. Ph yang tinggi dibutuhkan untuk mengikat kandungan Sulphur pada gas buang. Penurunan ph ini disebabkan bocornya pipa tanki air kapur karena terjadi penyumbatan pada pipa. Pressure pompa yang tinggi, dan adanya penyumbatan menyebabkan pipa mengalami kebocoran. Perawatan yang dilakukan adalah melakuka system bubling untuk menjaga pengendapan air kapur pada tangka. Serta melakukan flushing line dengan air tawar agar tidak ada air kapur yang tersisa pada pipa untuk menghindari penyumbatan.

Kata Kunci: *Scrubber*, SO₂, Optimalisasi

ABSTRACT

A scrubber or often referred to as a "ship scrubber", is a device used on ships to reduce exhaust emissions from internal combustion engines that use oil-based fuel, such as diesel or bunker fuel. Exhaust gas cleaning systems (EGCS) scrubber are becoming a technology more frequently used by ships to achieve compliance with sulfur limits. This scrubber aims to reduce sulfur dioxide (SO₂) gas emissions at a threshold value of 0.5% exhaust gas content. Sulfur dioxide is a species of sulfur oxide gas (SO_x). This gas dissolves very easily in water, has an odor but is colorless, SO₂

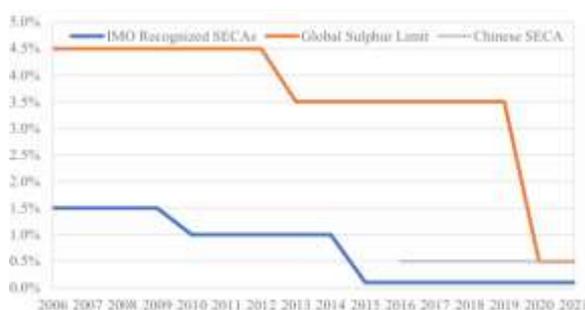
and other sulfur oxide gases are formed when fossil fuels containing sulfur are burned. Optimization comes from the word optimal meaning best, highest. The method used in this research is a descriptive qualitative method. Qualitative research is research that is descriptive and tends to use analysis. The theoretical basis is used as a guide so that the research focus is in accordance with the facts in the field. Such as IMO (International Maritime Organization) regulations which limit sulfur levels in ship fuel. Qualitative research is research that is descriptive and tends to be analytical. Process and meaning are used as guides so that the research focus is in accordance with the facts in the field. This research is about optimizing scrubber in reducing sulfur dioxide levels on MV ships. CMA CGM ELBE. The cause of the CEMS (continuous emission monitoring system) experiencing an out of compliance alarm is due to a drastic decrease in pH. A high pH is needed to bind the sulfur content in exhaust gas. This decrease in pH was caused by a leak in the lime water tank pipe due to a blockage in the pipe. High pump pressure and blockages cause pipes to leak. The maintenance carried out is to carry out a bubbling system to prevent the deposition of lime water on the stem. As well as flushing the line with fresh water so that there is no lime water left in the pipe to avoid blockages.

Keywords: Scrubber, SO₂, Optimization

1. Pendahuluan

Banyaknya transportasi laut yang beroperasi di dunia dan lebih dari 18% kapal menyumbangkan polusi udara. Perdagangan global melalui laut menyumbang 80% volume perdagangan internasional dan terus berkembang (UNCTAD, 2019). Kegiatan ini mengakibatkan pencemaran udara baik di laut maupun di wilayah pesisir. Emisi dari pelayaran diperkirakan menyebabkan 14% oksida nitrat (NO_x), 16% oksida sulphur (SO_x) dan 5% materi partikulat (PM 2.5) di wilayah pesisir dan menyebabkan kerusakan lingkungan, dampak kesehatan dan iklim (Weihsan Peng, 2020).

Gambar 1. 1 Diagram regulasi SO₂ oleh IMO



Sumber :

[https://www.researchgate.net/figure/Compari](https://www.researchgate.net/figure/Compari-son-among-China-and-IMO-sulphur-regulation-standards_fig1_338157929)

[son-among-China-and- IMO-sulphur-regulation-standards_fig1_338157929](https://www.researchgate.net/figure/Compari-son-among-China-and-IMO-sulphur-regulation-standards_fig1_338157929)

Optimalisasi menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia, berasal dari kata optimal terbaik; tertinggi, dengan demikian optimalisasi berarti suatu proses meninggikan atau meningkatkan. Optimalisasi *scrubber* basah menunjukkan nilai ekonomis dan penerapan yang unggul untuk menghilangkan SO₂ dan NO_x secara bersamaan (Mengjing Zhao, 2021).

Organisasi Maritim Internasional (IMO) telah menetapkan batasan kandungan sulfur dalam bahan bakar transportasi laut. Namun, kapal tetap menggunakan sisa bahan bakar bersulfur tinggi yang dikombinasikan dengan sistem pembersihan gas buang (*scrubber*). Selain kandungan sulfur yang tinggi, pembakaran bahan bakar ini juga menghasilkan emisi kontaminan yang lebih tinggi termasuk logam dan PAH. Dalam *scrubber*, gas buang disemprotkan dengan air untuk menghilangkan SO_x, sehingga menghasilkan air pencuci yang bersifat asam dengan konsentrasi kontaminan tinggi yang dibuang ke ekosistem perairan. Jumlah kapal

yang dilengkapi *scrubber* meningkat pesat, namun pengetahuan mengenai kualitas dan dampak air cucian masih terbatas (Johannes Teuchies, 2020).

Scrubber adalah suatu alat yang dipasang pada saluran pembuangan sistem setelah mesin atau boiler yang mengolah gas buang dengan berbagai zat termasuk laut air, air tawar yang diolah secara kimia atau kering zat, sehingga dapat menghilangkan sebagian besar SO_x dari knalpot. Ada dua jenis *scrubber*: basah dan kering. *Scrubber* kering menggunakan bahan kimia kering, dan basah *scrubber* menggunakan air sebagai media *scrubber*. Basah *scrubber* lebih dapat diterima untuk kapal karena harga yang lebih rendah dan dimensi unit yang lebih kecil. Itu sebabnya *scrubber* jenis basah paling banyak banyak digunakan dalam pembuatan kapal (I. Panasiuk, 2014)

Scrubber multi saluran masuk dapat mengolah gas buang dari beberapa mesin, sedangkan *scrubber* saluran masuk tunggal hanya melayani satu mesin. Penting untuk mempertimbangkan semua pilihan kapal dan pola perdagangan tertentu secara hati-hati untuk memastikan keberlanjutan ekonomi dari solusi yang dipilih. berlaku mulai 1 Januari 2020 secara global, ketika semua kapal yang berlayar di laut lepas harus menggunakan bahan bakar dengan kandungan sulphur kurang dari 0,5%. Batasan ini lebih ketat untuk pengendalian emisi sulphur yang diakui secara global area (SECA), yang sebesar 0,1% sejak 1 Januari 2015. Hasil kami menemukan bahwa sistem *scrubber* adalah pilihan yang cocok untuk dipatuhi batas sulphur global sebesar 0,5%, dan efisiensi pengurangan sulphur yang lebih tinggi dapat dicapai melalui opsi sistem *scrubber* (Lixian Fan and Bingmei Gu, 2019).

Kandungan yang akan dibersihkan oleh *scrubber* adalah SO₂, NO_x dan PM. Kandungan ini sangat berbahaya bagi

mahluk hidup di dunia. Akibat yang dihasilkan oleh kandungan tersebut adalah SO₂ bukan merupakan komponen udara, namun merupakan polutan di atmosfer. Ketika gunung berapi meletus, ia mengeluarkan SO₂. Dalam proses industri, pembakaran batu bara dan minyak bumi yang mengandung sulfur juga akan menghasilkan SO₂. SO₂ merupakan faktor utama penyebab serangkaian permasalahan pencemaran lingkungan seperti hujan asam dan kabut asap (Lining Zhu, 2021).

Setelah itu NO_x merupakan polutan yang berkontribusi besar terhadap polusi atmosfer regional dan kualitas lingkungan, serta berperan penting dalam pembentukan O₃ troposfer, peroksiasetil nitrat (PAN), dan aerosol. Emisi nitrogen oksida dan konsentrasi deteksi terus meningkat setiap tahun. NO_x mencakup senyawa seperti dinitrogen oksida (N₂O), oksida nitrat (NO), NO₂, dinitrogen trioksida (N₂O₃), dan dinitrogen tetraoksida (N₂O₄). NO dan NO₂ merupakan senyawa NO_x utama di atmosfer yang mempengaruhi kesehatan manusia dan lingkungan ekologi, sedangkan asam nitrat dan nitrat yang terbentuk dari oksidasi NO₂ (dibentuk oleh fotooksidasi NO dan hidrokarbon (HC) dan O₃) adalah senyawa utama. sumber hujan asam nitrat. NO dapat mengiritasi sistem pernapasan; ia juga dapat mengikat heme untuk membentuk nitrosohemoglobin dan beracun. NO₂ dapat merangsang sistem pernapasan dan mengakibatkan nitrosasi heme, dan lebih berbahaya bagi lingkungan dibandingkan NO karena membentuk polusi hujan asam (Lijun Wang, 2019)

Particulate matter merupakan komponen penting dari campuran polusi udara yang telah dikaitkan dengan berbagai dampak buruk terhadap kesehatan serta dampak lingkungan secara umum. Belum jelas agen penyebab dan mekanisme

mendasar mana yang bertanggung jawab atas dampak buruk terhadap kesehatan ini. Namun, kemungkinan besar sumber partikel, sebuah faktor yang mempengaruhi karakteristik dan komposisinya, berperan dalam menentukan dampak kesehatan dari partikel tersebut (Marko Vallius, 2005).

Pada kapal CMA CGM ELBE untuk mematuhi regulasi IMO MARPOL 73/78 ANNEX VI. MV CMA CGM ELBE menggunakan *scrubber* guna menurunkan kadar Sulphur untuk mengurangi polusi udara. Serta menggunakan bahan bakar berjenis HFO dengan kandungan Sulphur 0.98% m/m lebih tinggi dari bahan bakar lainnya seperti HLSFO dan MDO.

2. Metode Penelitian

Metode yang dipergunakan oleh penulis adalah metode penelitian kualitatif. Penelitian kualitatif adalah kerangka metodologis yang berupaya untuk memahami, menyelidiki, dan menganalisis secara komprehensif aspek rumit dari pertemuan manusia, perilaku, dan kejadian di masyarakat. Creswell dan Poth (2017). Penelitian kualitatif biasanya menggunakan beberapa metode pengumpulan data, seperti wawancara mendalam, observasi partisipan, kelompok fokus, dan analisis dokumen. Patton (2015).

3. Hasil dan Pembahasan

Pada tahun 2020 IMO memperbarui regulasi MARPOL 73/78 ANNEX VI untuk mengurangi pencemaran udara diseluruh dunia. Untuk mematuhi regulasi tersebut MV CMA CGM ELBE melakukan pemasangan *scrubber*. Pemasangan *scrubber* dipilih untuk operasi pelayaran yang lebih efisien dan ekonomi. Prinsip kerja dari *scrubber* di bagi menjadi dua, *Open loop* dan *Close loop*.

Perawatan *Scrubber* dilakukan secara rutin untuk menunjang kelancaran pelayaran.

scrubber dituntut untuk dapat bekerja dengan baik, maka dari itu maintenance serta kalibrasi system dilakukan secara berkala. System monitoring pada *scrubber* sangat penting, apabila system mengalami kendala, pemantauan emisi serta pemantaun pH dan PAH untuk pembuangan air *scrubber* ke laut tidak dapat dilakukakan. System ini tidak hanya terhubung pada internal kapal, tetapi dari pihak office akan selalu memantau karena berkaitan dengan polusi udara di dunia. Pada monitoring system terdapat pipa- pipa kecil serta pompa guna pengambilan sampel dari air *scrubber* dan gas buang yang telah di cuci oleh air *scrubber*. Pipa-pipa sering mengalami kebocoran. Kebocoran tersebut sering mengakibatkan pompa tidak berfungsi karena disebabkan oleh air yang keluar dari pipa tersebut dan mengenai pompa. Dalam pengoperasiannya, pH sangat penting untuk mengikat kadar Sulphur agar tidak mencemari polusi udara. SO₂ yang memiliki kandungan asam di ikat oleh air *scrubber* kadar pH tinggi akan mengurangi kadar SO₂ pada gas buang tersebut.

Dalam menjalankan tugasnya *scrubber* memiliki komponen utama yang memiliki fungsi masing-masing:

1. Pompa air laut

Pompa air laut sangat penting berperan dalam pembersihan gas buang. Pompa air laut mengalirkan air bertekanan tinggi guna menyemprotkan air didalam cerobong gas buang. Biasanya dalam SECA area memerlukan dua pompa guna menurunkan kandungan Sulphur pada nilai 0.1%.

2. WMU

Water monitoring unit sangat penting berperan dalam air *scrubber*. Pemantauan dari air masuk hingga air di dikeluarkan kembali ke laut harus termonitoring. Air masuk harus

memiliki kadar Ph di atas 8. Hal ini bertujuan agar kadar alkali bias terpantau. Kadar pH harus memiliki 6-9. Biasanya pada mode *close loop*, air laut yang akan di buang mengalami penurunan ph. Maka dari itu diperlukan penambahan *chemical alkali* pada *water tereatment unit* untuk meningkatkan kadar ph, agar nantinya air laut bersih yang telah di pisahkan oleh lumpur dapat dibuang dan tidak menyebabkan polusi pada ekosistem laut.

3. CEMS

Continuous Emission Monitoring System penting karena membantu mencegah pelepasan bahan kimia berbahaya ke udara. Alat ini juga penting untuk memastikan bahwa suatu industri beroperasi sesuai standar lingkungan. CEMS digunakan untuk memantau kadar oksigen, karbon monoksida, dan karbon dioksida dalam gas buang, yang terjadi akibat pembakaran dalam proses industri. CEMS bekerja dengan mengambil sampel gas buang dari pipa gas buangan. Gas buang bisa menjadi panas, basah atau lengket tergantung pada polutan di dalamnya, oleh karena itu harus diencerkan sebelum dipindahkan sample line ke *gas analyzer*.

4. Water tereatment unit (WTU)

WTU digunakan saat mode *close loop*. Dikarenakan air yang telah dipakai untuk pencucian tidak bisa dibuang karena aturan SECA. Maka WTU berperan untuk membersihkan air *scrubber*, agar air tersebut dapat disirkulasikan untuk pembersihan gas buang kembali. WTU menggunakan dua metode, yakni metode separator dan metode *filter*. air *scrubber* didalam separator akan mengalami gaya sentrifugal serta gravity. Nantinya air *scrubber* yang bersih akan masuk ke tahap berikutnya, sedangkan lumpur hasil pemisahan akan di tamping

dalam recidu tank dan akan dibuang di pelabuhan nantinya.

5. Slurry tank

Tangki lumpur digunakan untuk menyiapkan dan menyimpan larutan *scrubber*, yang biasanya berupa campuran air dan reagen seperti batu kapur atau kapur. Tangki slurry merupakan tempat reagen dicampur dengan air hingga membentuk slurry, yang kemudian disemprotkan ke dalam ruang *scrubber* untuk bereaksi dengan polutan pada gas buang. Tangki air kapur memastikan pasokan larutan *scrubber* secara terus menerus ke *scrubber*.

6. Process tank

Process tank adalah tanki untuk menampung air yang telah digunakan untuk pembersihan gas buang. Air tersebut disirkulasikan kembali untuk proses pencucian. Metode ini hanya berjalan saat mode *close loop*.

7. Cooler

Cooler digunakan untuk mendinginkan air dari tanki proses. Air yang berada di tanki proses memiliki suhu yang cukup tinggi, karena telah melakukan pencucian pada gas buang. Air yang di sirkulasikan kembali untuk proses pencucian harus melewati pendingin oleh air laut.

8. Holding Tank

Holding Tank adalah tanki untuk menampung air laut yang telah dibersihkan namun tidak dapat dibuang kelaut. Pada SECA (*Sulphur Emission Control Area*). Air laut yang telah melewati tahap pencucian tidak dapat dibuang kelaut atau 0 discharge. Karena dikhawatirkan partikel yang tersisa dapat mencemari area tersebut. Area ini biasanya sangat dekat dengan bibir pantai.

Scrubber di operasikan menggunakan dua metode yakni *open loop* dan *close loop*.

Pada *open loop* menurut (Lauri Aakko,2018) *Scrubber* loop terbuka membutuhkan air dengan alkalinitas alami dan oleh karena itu dirancang terutama untuk digunakan di air laut. Banyak sistem yang terbukti mampu beroperasi juga di Laut Baltik, yang memiliki alkalinitas lebih rendah, namun mungkin terdapat masalah. Aliran air mungkin perlu ditingkatkan, yang berarti peningkatan konsumsi daya. Salah satu pilihannya adalah menambahkan natrium hidroksida (NaOH) ke dalam air laut yang dimasukkan untuk meningkatkan kapasitas pengikatan asam air.

Scrubber close loop adalah sistem yang menggunakan air tawar dengan tambahan soda kaustik (NaOH) sebagai cairan pembersih. Cairan *scrubber* juga bisa berupa air laut dan NaOH yang bisa didapatkan dari air kapur. NaOH digunakan untuk meningkatkan alkalinitas segar air yang mempunyai nilai PH antara 7,5-8,5 sebelum masuk ke *scrubber*. NaOH disimpan dalam 50% dalam air solusi. Cairan *scrubber* didinginkan dengan air laut yang dialirkan pada heat- exchanger untuk mereduksinya suhu air tawar yang masuk ke *scrubber* dan akibatnya mengurangi konsumsi air sebesar meminimalkan penguapan air. Air tawar dipompa dari tangki penyangga, tempat air tersebut bercampur NaOH, melewati penukar panas dan kemudian masuk ke *scrubber*.

Di dalam *scrubber*, cairan *scrubber* bersentuhan dengan SO_x untuk menyerap dan menetralsirnya. Setelah gas buang dibersihkan melalui proses yang disebutkan di atas, sisa air dari menara pembersih dialirkan melalui serangkaian pipa dan katup, ke unit pengolahan air. Pada saat itu, sisa air sedang diolah dan tergantung pada pabrikan dan desain sistem, prosesnya dapat berubah. Umumnya terdapat pipa yang dipasang pada unit pengolahan air dengan air laut untuk menurunkan konsentrasi molekul asam sulfat, logam berat dan hidrokarbon polisiklik

aromatik, antara lain komponen-komponen yang semuanya terbentuk setelah tercampurnya air laut dengan gas buang dari mesin, selama proses pembersihan di menara *scrubber*. Reaksi yang dihasilkan antara air laut dan sulfur dioksida adalah sebagai berikut: $SO_2 + H_2O = H_2SO_3$. Ingatlah bahwa molekul sulfur dioksida dibentuk oleh 2 atom oksigen dan 1 atom sulfur. Ketika belerang dioksida dilarutkan dalam air, atom belerang bekerja dengan bilangan oksidasi 4 membentuk zat baru yang disebut asam belerang atau H₂SO₃ (Nelson Gustavo D.D, 2020).

Gambar 3. 1 *Scrubber pump*



Sumber : Dokumentasi Pribadi

Gambar 3. 2 *Water monitoring unit*



Sumber : Dokumentasi Pribadi

Gambar 3. 3 CEMS



Sumber:

<https://www.yangertec.com/trending-products-expansion-joint-for-egcscrubber-cems%EF%BC%88continuous-emission-monitoring-system%EF%BC%89-yanger-product/>

Gambar 3. 4 *Water treatment unit*



Sumber : Dokumentasi Pribadi

Gambar 3. 5 *Cooler*



Sumber : Dokumentasi Pribadi

Dari kondisi ini maka yang jadi pokok permasalahan akibat terjadinya kendala pada monitoring system, *scrubber* mengalami stop running adalah :

1. Pipa pada air kapur yang digunakan untuk meningkatkan kandungan pH didalam process tank mengalami penyumbatan. Karena sifat dari air kapur sendiri mudah mengendap yang apabila tidak dilakukan bubling secara berkala serta *flushing line* maka akan menimbulkan penumpukan pada pipa air kapur itu sendiri. Bubling yang dilakukan didalam tangki air kapur bertujuan agar air kapur terus diaduk untuk menghindari pengendapan. Serta *flushing line* yang diberikan sambungan air tawar pada pipa air kapur bertujuan agar pipa tersebut bersih dari penyumbatan akibat pengendapan didalam pipa.

2. Kerusakan pada *pressure transmitter Pressure Transmitter* adalah sebuah alat pembacaan tekanan tangki/pipa

langsung pada display alatnya yang memungkinkan pengguna dapat langsung melihat nilai dari pada tekanan terukur tersebut. Air kapur yang sudah menumpuk menjadi penyebab kerusakan *Pressure transmitter*. Air kapur yang terus dipompa dengan *pressure* tinggi, dan pipa yang sudah tersumbat mengakibatkan kerusakan pada transmitter.

Gambar 3. 6 Penyumbatan pada pipa air kapur



Sumber : Dokumentasi Pribadi

Gambar 3. 7 Retaknya Pressure Transmitter



Sumber : Dokumentasi Pribadi

4. Simpulan

Berdasarkan pembahasan pada bab-bab sebelumnya tentang penyebab *Scrubber* milik kapal MV. CMA CGM ELBE yang mengalami *stop running* secara mendadak pada *scrubber* dan komponenen WMU maka dapat di tarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Adanya kebocoran pada pipa tangka air kapur yang memiliki peran untuk meningkatkan kadar Ph. Kebocoran ini disebabkan penyumbatan air kapur yang menjadi beku dikarenakan kurangnya sirkulasi air pada tangki serta melakukan system bubling untuk mengaduk air kapur dalam tangka. Karena air kapur inilah system CEMS dan WMU inlet menunjukkan sinyal low Ph dan tekanan aliran pipa berkurang. Hal ini membuat *scrubber* harus berhenti secara otomatis karena kurangnya kadar ph pada air *scrubber*.

2. Transmitter Pressure yang mengalami keretakan akibat dari penumpukan air kapur. air kapur harus sering di sirkulasi dan di lakukan flushing air tawar untuk melakukan pembersihan pada pipa air kapur tersebut. Apabila perawatan pipa tersebut kurang dan sifat dari air kapur sangat mudah mengendap maka penyumbatan akan cepat terjadi, sehingga pada kasus tersebut penyumbatan tepat ada di Transmitter pressure. Sehingga saat pompa dijalankan dan aliran pipa sudah tersumbat maka transmitter pressure retak dan fluida keluar.

Ucapan Terimakasih

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu sehingga tugas akhir ini dapat dilaksanakan, antara lain kepada:

1. Capt. Dedy Kurniadi, M.M., selaku Direktur Politeknik Pelayaran Malahayati Aceh.

2. Bapak dan Ibu Dosen Politeknik Pelayaran Malahayati Aceh khususnya Program Studi Permesinan Kapal yang telah membagikan ilmunya selama masa pembelajaran. Dan terimakasih kepada seluruh civitas akademik Politeknik Pelayaran Malayahati Aceh yang telah membantu kebutuhan administrasi selama masa pembelajaran.
3. Nahkoda dan awak kapal CMA CGM Elbe yang telah memberikan ilmu selama penulis praktek.
4. General Manajer PT. EQUINOX BAHARI UTAMA yang telah memberikan penulis kesempatan untuk praktek dikawal CMA CGM Elbe..
5. Kedua orang tuaku tercinta yang selalu memberikan motivasi serta doa yang selalu mengalir.
6. Seluruh rekan-rekan perjuangan kelas Permesinan Kapal C dan rekan-rekan angkatan 8.
7. Seluruh teman-teman yang tidak bisa disebutkan satu persatu terima kasih telah membantu dan memberi doa.

Tugas Akhir ini tentu masih ada kekurangan didalamnya, oleh karena itu segala kritikan dan saran yang membangun akan penulis terima dengan baik.

Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi kita semua.

Daftar Pustaka

- Aakko, L. (2018). *Use of open loop scrubber in Gulf of Finland*. Turku : Degree Programme in Maritime Management
- Beijing : Beijing University of Technology
- Confuorto N (2012). *A practical guide to exhaust gas cleaning systems for the maritime industry*. New Jersey, Sustainable Maritime Solution Ltd.
- Delgado N.G.D (2020). *Open loop Exhaust Gas Cleaning System, A Deep Analysis Of Effects Produced By Its Residual Waters*. Barcelona : Department of Engineering and Nautical Sciences
- Elmari E (2020). *Closed Loop Wet Scrubber System for Maritime Application*. Delft, Delft University of Technology
- Fan,l and Bingmei, Gu (2019). *Impacts of the Increasingly Strict Sulphur Limit on Compliance Option Choices: The Case Study of Chinese SECA Alexander*. Shanghai : Shanghai University
- H Asep & M.I. (2022). *Optimalisasi Penyusunan Dan Pembuatan Laporan Untuk Mewujudkan Good Governance*. Bandung : Universitas Islam Negeri Bandung.
- Hidayat, H. (2021). *Optimalisasi Penggunaan Alat Bantu Scrubber Dalam Mengatasi Pencemaran Udara Dengan Metode Egcs (Exhaust Gas Cleaning System) Di MV. Hl Port Hedland*. Semarang, Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang. Klaipėda : PhD student at Klaipėda University
- Mengjing Zhao (2021). *A review of removing SO2 and NOX by wet scrubber*.
- Panasuik I (2014). *Selection of Exhaust Scrubber: Concept for Optimal Solution*.
- Suganjar (2024). *Pengaruh Pemanfaatan Air Scrubber Dalam Mengurangi Pencemaran Udara Dari Kapal Sesuai Marpol 73/78 Annex VI*. Semarang: Universitas AMNI Sermarang
- Teuchies, J. (2020) *The impact of scrubber discharge on the water quality in estuaries and ports*. Belgium : University of Antwerp
- Vallius M (2005). *Characteristics And Sources Of Fine Particulate Matter In Urban Air*. Finland, University Of Kuopio
- Wang L (2019). *Analysis of NOx Pollution Characteristics in the Atmospheric Environment in Changchun City*. Changchun : Jilin University

- Weihen, P. (2020). *Comprehensive analysis of the air quality impacts of switching a marine vessel from diesel fuel to natural gas. United States : University of California* Zhu L (2021). *Spatio-Temporal Characteristics of SO₂ across Weifang from 2008 to 2020*. Beijing : Chinese Academy of Surveying and Mapping
- Martena (2024). *The history of scrubber in the marine market (online)*
https://www.martenaengineering.com/martena/index.php?option=com_content&task=view&id=129&Itemid=340.
- UNCTAD (2019). *UNCTAD Annual Report 2019*
<https://unctad.org/annualreport/2019/Pages/index.html> diakses pada tanggal 07 April 2024.
- GAWPALU (2024) Sulfur Dioksida (SO₂) (online)
<https://gawpalu.id/index.php/informasi/kimia-atmosfer/gas-reaktif/sulfur-dioksida> Di akses pada tanggal 08 April 2024