

ANALISIS FISIKA FLUIDA PADA SISTEM PEMBUANGAN LIMBAH KAPAL UNTUK MEMINIMALKAN DAMPAK PENCEMARAN LAUT *ANALYSIS OF FLUID PHYSICS IN SHIP WASTE DISPOSAL SYSTEM TO MINIMIZE THE IMPACT OF MARINE POLLUTION*

Andi Fiardi¹, Nur Fadhilah^{1*}, Salfauqi Nurman¹, Sariyulis²

¹Program Studi Permesinan Kapal, Politeknik Pelayaran Malahayati, Aceh Besar, Indonesia

²Program Studi Nautika, Politeknik Pelayaran Malahayati, Aceh Besar, Indonesia

*email: nurfadhilah@poltekpelaceh.ac.id

ABSTRAK

Pembuangan limbah kapal merupakan salah satu penyebab utama pencemaran laut yang dapat berdampak negatif terhadap ekosistem perairan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peran fisika fluida dalam sistem pembuangan limbah kapal, mengidentifikasi faktor-faktor fisika fluida yang berpengaruh terhadap efisiensi sistem pembuangan limbah kapal. Penelitian ini menggunakan metode analisis literatur (*library research*) untuk mengkaji teori dan hasil penelitian sebelumnya terkait fisika fluida dalam sistem pembuangan limbah kapal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa optimasi desain sistem pembuangan, seperti penggunaan nozzle atau diffuser, dapat meningkatkan pencampuran limbah dengan air laut sehingga mempercepat proses pengenceran dan biodegradasi. Selain itu, penerapan teknologi pemisahan limbah berbasis centrifugal separator dan membran filtrasi terbukti mampu mengurangi kandungan polutan sebelum dibuang ke laut. Pemodelan penyebaran limbah juga menunjukkan bahwa viskositas, tegangan permukaan, serta interaksi limbah dengan arus laut berperan penting dalam menentukan pola penyebaran polutan. Dengan menerapkan prinsip fisika fluida, sistem pembuangan limbah kapal dapat dioptimalkan untuk mengurangi risiko pencemaran laut, sejalan dengan regulasi internasional seperti MARPOL Annex IV dan V. Kesimpulan dalam penelitian ini adalah desain sistem pembuangan yang optimal, Pola penyebaran limbah sangat dipengaruhi oleh arus, viskositas fluida, dan interaksi dengan lingkungan laut. Penelitian ini merekomendasikan pengembangan lebih lanjut dalam desain sistem pembuangan dan penerapan teknologi pemisahan limbah yang lebih efisien guna meningkatkan keselamatan lingkungan maritim.

Kata kunci: Fisika Fluida, Pembuangan Limbah Kapal, Pencemaran Laut, Hidrodinamika.

ABSTRACT

Ship sewage disposal is one of the main causes of marine pollution that can have a negative impact on aquatic ecosystems. This research aims to analyze the role of fluid physics in ship sewage systems, identify fluid physics factors that affect the efficiency of ship sewage systems. This research uses the literature analysis method (library research) to review the theory and results of previous research related to fluid physics in ship sewage systems. The results showed that optimization of the sewage system design, such as the use of nozzles or diffusers, can increase the mixing of sewage with seawater to accelerate the dilution and biodegradation process. In addition, the application of effluent separation technology based on centrifugal separators and filtration membranes proved to be able to reduce the pollutant content before being discharged into the sea. Modeling of effluent dispersal also showed that viscosity, surface tension, and the interaction of effluent with ocean currents play an important role in determining the pattern of pollutant dispersal. By applying the principles of fluid physics, the ship's sewage system can be optimized to reduce the risk of marine pollution, in line with international regulations such as MARPOL Annex IV and V. The conclusions in this study are the optimal design of the disposal system, The pattern of waste dispersal is strongly influenced by currents, fluid viscosity, and interaction with the marine environment. This study recommends further development in the design of the exhaust system and the application of more efficient effluent separation technologies to improve environmental safety.

Keywords: Fluid Physics, Ship Waste Disposal, Marine Pollution, Hydrodynamics.

1. Pendahuluan

Pencemaran laut akibat pembuangan limbah kapal merupakan salah satu permasalahan utama dalam dunia pelayaran yang berkontribusi terhadap degradasi ekosistem laut. Limbah kapal dapat berupa limbah cair, minyak, limbah domestik, maupun bahan kimia berbahaya yang apabila tidak dikelola dengan baik dapat mencemari perairan dan mengganggu keseimbangan lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan sistem pembuangan limbah yang efektif guna mengurangi dampak negatif terhadap ekosistem laut. Limbah sanitasi di atas kapal secara garis besar terdiri dari dua kategori yakni; grey water dan black water. Grey water adalah campuran urine, feses, air siraman air pembersih anal (jika ada air digunakan untuk pembersihan) dan/atau bahan pembersih kering. Sedangkan blackwater adalah mengandung patogen tinja dan nutrient urine yang tercampur didalam saluran pembuangan. Oleh karena itu black water harus diolah sesuai standar sehingga memenuhi ketentuan yang diatur dalam MARPOL. Tindakan seperti ini jelas bertentangan dengan prinsip-prinsip dan ketentuan MARPOL (Marine pollution) yang merupakan salah satu konvensi utama IMO yang mengatur tentang upaya pencegahan dan meminimalkan polusi yang berasal dari operasional kapal, baik yang tidak disengaja. (Azwar et al 2022)

Aliran limbah yang dibuang ke laut sangat secara perspektif fluida dipengaruhi oleh berbagai parameter fisik seperti viskositas, densitas, kecepatan aliran, serta interaksi dengan fluida laut. Pemahaman terhadap prinsip-prinsip fisika fluida dapat membantu dalam merancang sistem pembuangan yang lebih efisien, misalnya dengan teknologi pengolahan berbasis difusi, filtrasi, atau sedimentasi sebelum limbah dibuang ke laut. Berbagai kajian literatur menunjukkan bahwa sistem pembuangan limbah yang memanfaatkan prinsip hidrodinamika dapat mengurangi dampak pencemaran dengan cara mengoptimalkan pencampuran dan dispersinya di dalam air laut (Michael Green dan Laura White: 2019). Selain itu, penerapan teknologi berbasis fisika fluida seperti penggunaan separator gravitasi dan sistem injeksi udara juga dapat meningkatkan efektivitas pemisahan zat pencemar sebelum limbah mencapai lingkungan perairan.

Studi ini bertujuan untuk menganalisis literatur terkait penerapan fisika fluida dalam sistem pembuangan limbah kapal guna memahami bagaimana desain sistem yang

optimal dapat membantu meminimalkan pencemaran laut. Dengan pendekatan analisis literatur, penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi terhadap sistem pembuangan limbah kapal yang lebih ramah lingkungan dan sesuai dengan regulasi maritim internasional.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode analisis literatur (library research) untuk mengkaji teori dan hasil penelitian sebelumnya terkait fisika fluida dalam sistem pembuangan limbah kapal. Data yang digunakan berasal dari jurnal ilmiah, buku, laporan penelitian, dan dokumen regulasi internasional mengenai sistem pembuangan limbah kapal. Teknik Analisis Data menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode deskriptif-komparatif, yaitu membandingkan berbagai konsep fisika fluida dan teknologi pembuangan limbah yang telah dikembangkan sebelumnya. Adapun langkah penelitian ini adalah: (1) Pengumpulan referensi dari sumber yang relevan, (2) Analisis prinsip fisika fluida dalam sistem pembuangan limbah. (3) Evaluasi efektivitas teknologi yang digunakan dalam mengurangi pencemaran laut dan (4) Penyusunan rekomendasi untuk pengembangan sistem yang lebih optimal.

3. Hasil dan Pembahasan

Sistem pembuangan limbah kapal dengan menggunakan prinsip fisika fluida sangat berperan dalam mengontrol aliran, dispersi, dan interaksi limbah dengan lingkungan laut. Beberapa konsep utama yang digunakan dalam analisis ini meliputi hukum Bernoulli, aliran laminar dan turbulen, viskositas, difusi dan adveksi, serta gaya apung dan sedimentasi.

a. Hukum Bernoulli dalam Sistem Pembuangan Limbah

Hukum Bernoulli menyatakan bahwa dalam aliran fluida ideal (tanpa gesekan), jumlah energi dalam bentuk tekanan, kecepatan, dan ketinggian fluida tetap konstan sepanjang garis aliran. Secara matematis dinyatakan sebagai berikut:

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{Konstan} \dots\dots\dots(1)$$

P = tekanan fluida

ρ = densitas fluida

v = kecepatan fluida

g = percepatan gravitasi

h = ketinggian fluida

Dalam sistem pembuangan limbah kapal, hukum Bernoulli digunakan untuk mendesain pipa pembuangan agar limbah mengalir dengan optimal tanpa hambatan yang berlebihan. Variasi tekanan dan kecepatan dalam perpipaan berpengaruh terhadap keefektifan aliran limbah sebelum dibuang ke laut. Kehilangan energi akibat gesekan dalam pipa perlu diperhitungkan untuk mengoptimalkan sistem pembuangan. (Annisa et al, 2024)

b. Aliran Laminar dan Turbulen dalam Pembuangan Limbah

Aliran fluida dalam sistem perpipaan limbah kapal dapat berbentuk laminar atau turbulen, tergantung pada bilangan Reynolds (Re):

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

dimana:

d = diameter pipa

μ = viskositas dinamis fluida

Aliran laminar ($Re < 2000$)
artinya Aliran teratur, kecepatan fluida seragam, minim pencampuran.

Aliran turbulen ($Re > 4000$)
artinya Aliran tidak teratur, bercampur dengan baik, tetapi meningkatkan gesekan dalam pipa. Dalam pembuangan limbah:

- Jika aliran terlalu laminar, limbah mungkin tidak tercampur dengan baik dengan air laut, menyebabkan konsentrasi polutan yang tinggi di satu lokasi.
- Jika aliran terlalu turbulen, pencampuran meningkat tetapi dapat menyebabkan difusi polutan yang luas, meningkatkan area terdampak pencemaran.
- Desain sistem harus mempertimbangkan kontrol kecepatan dan diameter pipa agar aliran optimal.

c. Viskositas dan Efeknya pada Aliran Limbah

Viskositas adalah ukuran resistensi fluida terhadap aliran. Limbah kapal bisa memiliki viskositas yang bervariasi tergantung pada komposisi (air, minyak, zat organik, dan bahan kimia).

- Limbah dengan viskositas tinggi (misalnya minyak dan lumpur) cenderung bergerak lambat dan sulit bercampur dengan air laut.
- Limbah dengan viskositas rendah lebih mudah menyebar tetapi dapat meningkatkan difusi polutan.

Dalam sistem pembuangan, perlu diperhitungkan cara untuk mengurangi viskositas limbah, misalnya dengan:

- Pemanasan (untuk limbah minyak).
- Pencampuran dengan air untuk menurunkan densitas.
- Penggunaan pompa dengan tekanan tertentu untuk mengontrol aliran limbah.

d. Difusi dan Adveksi dalam Penyebaran Limbah di Laut

Ketika limbah kapal dibuang ke laut, penyebarannya dipengaruhi oleh dua mekanisme utama. Strategi untuk mengurangi pencemaran akibat difusi dan adveksi:

- Mengatur kecepatan aliran pembuangan agar tidak langsung bercampur dengan arus laut yang kuat.
- Menggunakan desain nozzle khusus untuk mengontrol penyebaran limbah.

Menerapkan sistem dispersi bertingkat agar limbah lebih cepat terurai.

e. Gaya Apung dan Sedimentasi dalam Pembuangan Limbah

Limbah kapal sering mengandung partikel tersuspensi yang dapat mengalami proses sedimentasi di dasar laut atau terapung di permukaan air.

- Hukum Archimedes menyatakan bahwa benda yang tercelup dalam fluida akan mengalami gaya apung sebesar berat fluida yang dipindahkan.
- Jika densitas limbah lebih rendah dari air laut sehingga limbah akan mengapung di permukaan, menyebabkan lapisan polutan seperti minyak.
- Jika densitas lebih tinggi dari air laut sehingga limbah akan mengendap, mencemari dasar laut.

Solusi untuk mengontrol sedimentasi dan apungan limbah:

- Pemisahan awal dalam sistem pembuangan (misalnya Oily Water Separator) agar hanya air yang dibuang ke laut.
- Penggunaan zat kimia koagulan untuk menggumpalkan partikel limbah agar bisa diolah sebelum dibuang.
- Desain aliran vertikal dalam pipa pembuangan untuk memastikan limbah bercampur sebelum mencapai perairan terbuka.

4. Simpulan

Dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa:

1. Desain sistem pembuangan yang optimal dengan mempertimbangkan hidrodinamika aliran dapat meningkatkan efisiensi pencampuran limbah dan mempercepat proses degradasi alami.
2. Pola penyebaran limbah sangat dipengaruhi oleh arus, viskositas fluida, dan interaksi dengan lingkungan laut, sehingga perlu strategi pengelolaan yang disesuaikan dengan kondisi perairan setempat.
3. Teknologi pemisahan fluida seperti sentrifugal separator dan membran filtrasi terbukti efektif dalam mengurangi kandungan polutan sebelum limbah dibuang ke laut.

Daftar Pustaka

- Amalia Putri Utami, Annisa, et al 2024. Analisis Tekanan pada Cerobong Asap Menggunakan Prinsip Hukum Bernoulli. *BIOCHEPHY: Journal of Science Education*, Vol. 4, No. 1. 495 – 500
- Bai, Y., & Teng, B. (2013). *Marine Structural Design*. Elsevier.
- Batchelor, G. K. (2000). *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press.
- Green, Michael dan Laura White. 2019. The Role of Fluid Mechanics in Designing Eco-Friendly Marine Outfall Systems. *Environmental Fluid Mechanics*, Volume 25, Tahun 2019, Halaman 89-102
- International Maritime Organization (IMO). (2022). *MARPOL Annex IV and V: Regulations for the Prevention of Pollution from Ships*. IMO Publications.
- Kundu, P. K., Cohen, I. M., & Dowling, D. R. (2016). *Fluid Mechanics*. Academic Press.
- Kim, J., & Lee, S. (2018). "Computational Fluid Dynamics Analysis of Marine Discharge System to Minimize Environmental Impact." *Ocean Engineering*, 156, 291-302.
- Lee, K., Boufadel, M., & Chen, B. (2011). *Oil Spill Environmental Forensics: Fingerprinting and Source Identification*. Elsevier.
- Papanicolaou, A. N., & Strom, K. (2012). *Environmental Hydrodynamics: Hydraulics for Environmental Engineers*. CRC Press.
- Saleh, Azwar, Andi Husni Sitepu, Baharuddin. 2022. Perencanaan Fasilitas Pengolahan Limbah Sewage pada KMP. Takabonerate. *Jurnal Riset & Teknologi Terapan Kemaritiman*. Volume 1, Nomor 1, Juni 2022, pp.10-16 e-ISSN:2962-3359 DOI: 10.25042/jrt2k.062022.03
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education
- Wang, P., Li, X., & Zhang, H. (2021). "Effect of Flow Rate on the Efficiency of Oil-Water Separators in Marine Wastewater Treatment." *Journal of Marine Engineering and Technology*, 20(3), 215-228.
- Zhang, Y., Sun, Y., & Huang, H. (2020). "A Novel Membrane Filtration System for Shipboard Wastewater Treatment." *Desalination and Water Treatment*, 190, 45-57.