

Analisis multi-kriteria bahan bakar rendah sulfur untuk mesin diesel kapal tanker: Kinerja, emisi, dan biaya

Muhammad Arif Budiyanto^{a,b,1}, Hanin Safiya^a, Muhammad Agung Santoso^b

^aProgram Studi Teknik Perkapalan, Universitas Indonesia, Depok, Jawa Barat, 16424

^bProgram Studi Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Depok, Jawa Barat, 16424

¹Email korespondensi: arif@eng.ui.ac.id

Abstrak. Masalah pencemaran lingkungan akibat aktivitas transportasi laut menjadi perhatian utama bagi International Maritime Organization (IMO) dan para pemangku kepentingan. Untuk mengurangi dampak negatif emisi dari kapal terhadap kualitas udara, IMO menetapkan regulasi global melalui MARPOL 73/78. Penelitian ini menggunakan pendekatan komparatif untuk mengevaluasi efektivitas empat jenis bahan bakar berdasarkan kinerja mesin, tingkat emisi, dan aspek biaya. Analisis dilakukan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak Diesel-RK serta perhitungan manual pada mesin diesel laut empat langkah tipe C32 ACERT yang umum digunakan pada kapal tanker minyak. Keempat jenis bahan bakar yang diuji, yakni High Sulfur Fuel Oil (HSFO), Low Sulfur Fuel Oil (LSFO), Ultra-Low Sulfur Fuel Oil (ULSFO), dan Biosolar B30, memiliki kadar sulfur yang berbeda, namun digunakan pada mesin yang sama. Secara umum, HSFO merupakan bahan bakar dengan harga paling ekonomis dibandingkan dengan ketiga bahan bakar lainnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Biosolar B30 memberikan performa mesin tertinggi dengan capaian sebesar 88,88%. Dari sisi emisi, ULSFO menunjukkan tingkat emisi NO_x dan SO₂ paling rendah, masing-masing dengan persentase rata-rata 39,1% dan 0,02% dibandingkan dengan emisi tertinggi. Sementara itu, untuk emisi CO₂, Biosolar B30 menghasilkan emisi paling rendah dengan rata-rata pengurangan sebesar 90%. Di sisi lain, dari aspek biaya operasional tanpa penggunaan scrubber, Biosolar B30 tercatat sebagai bahan bakar dengan harga tertinggi, yakni sebesar 77% dari total biaya operasional.

Keywords: IMO, MARPOL, HSFO, LSFO, ULSFO

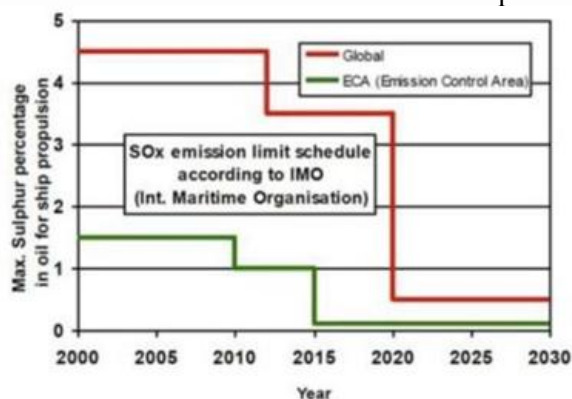
Received: 30 September 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/c7mkvj59>

PENDAHULUAN

Isu pencemaran lingkungan yang dihasilkan oleh transportasi laut menjadi perhatian serius bagi IMO dan stakeholder. Hasil pembakaran yang berupa gas buang dari bahan bakar di mesin diesel dianggap sebagai salah satu penyebab utama pencemaran lingkungan di laut. Hasil pembakaran berupa CO, CO₂, SO_x, dan NO_x ini merupakan hasil reaksi oksigen bersama dengan sisa bahan bakar dalam bentuk karbon, sulfur, dan nitrogen. Organisasi Maritim Internasional (IMO) mengeluarkan peraturan

global terkait pencegahan polusi dari kapal melalui Marine Pollution (MARPOL) 73/78 untuk membatasi dampak berbahaya dari emisi kapal terhadap kualitas udara. Peraturan ini bertujuan untuk mengurangi SO_x dan NO_x dari mesin diesel. IMO mengeluarkan Annex VI Regulasi 14 untuk mengurangi SO_x dan mewajibkan semua kapal di seluruh dunia untuk menggunakan bahan bakar sulfur rendah dengan kadar maksimum 0,1% m/m untuk daerah kontrol emisi dan kadar maksimum 0,5% untuk daerah global. Penegakan tenggat waktu MARPOL Annex VI dapat dilihat dari data pada Gambar 1.

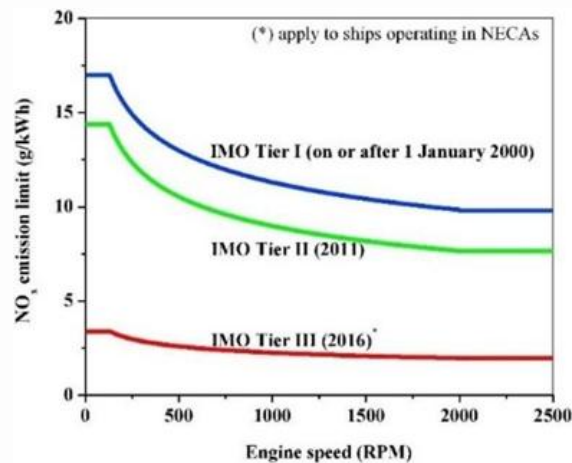


Gambar 1. Peraturan IMO mengenai batasan kandungan sulfur

Sumber: (Livaniou et al., 2022).

Lalu, mengeluarkan MARPOL ANNEX VI regulasi 13 untuk pembatasan emisi NO_x berdasarkan

peletakkan keel dan kecepatan mesin yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Peraturan IMO mengenai penetapan batas emisi NO_x IMO, 1999

Sumber: (Chu Van et al., 2019)

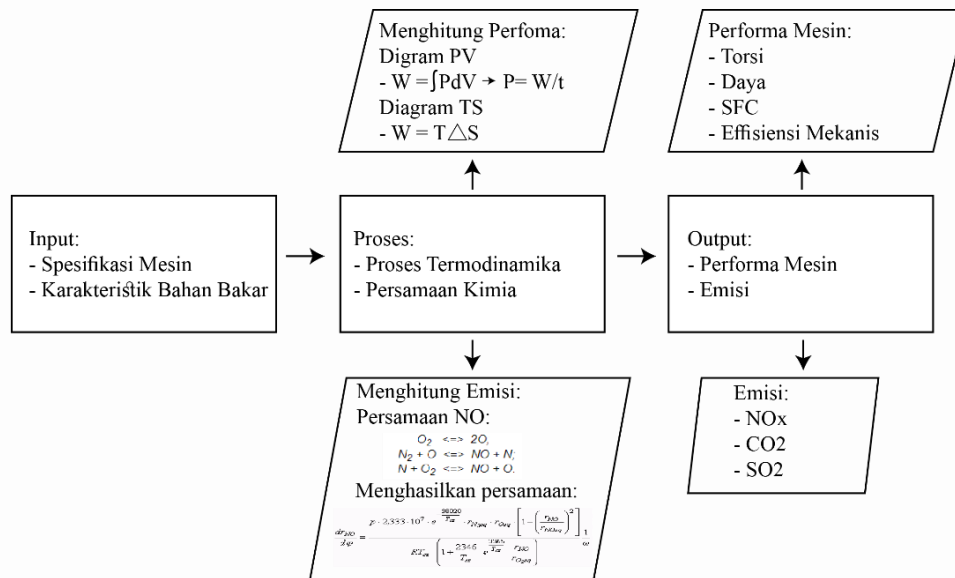
Di sisi lain, bahan bakar yang biasanya digunakan di industri perkapalan untuk melakukan pengiriman adalah bahan bakar yang mengandung sulfur yang tinggi (HSFO). Karena tingginya kandungan sulfur pada bahan bakar, harganya akan lebih terjangkau. Serta ketersediaan HSFO lebih besar dibandingkan dengan bahan bakar lain. Namun, bahan bakar ini sering disebut sebagai minyak kelas terendah dan penghasil emisi gas buang yang tinggi. Hal ini didukung oleh data bahwa setiap tahunnya marine diesel engine mengeluarkan 10 juta ton SO_x dan 20 juta ton NO_x (Ni et al., 2020). Hal ini membuat kekhawatiran menjadi berkembang terhadap emisi gas rumah kaca (GRK) yang dihasilkan oleh mesin kapal. Dikarenakan emisi SO_x, NO_x, dan CO₂ yang dikeluarkan oleh kapal menyumbang polusi antropogenik secara global sekitar 4-9%, 15%, dan 2,7% (Ni et al., 2020). Untuk mengurangi kehadiran emisi SO_x, NO_x, dan CO₂, industri perkapalan melakukan berbagai cara, seperti menggunakan bahan bakar berupa HSFO yang dilengkapi dengan scrubber. Lalu, kapal dapat menggunakan bahan bakar LSFO, ULSFO, dan bahan bakar biodiesel yang dipasarkan, yaitu B30.

Oleh karena itu tujuan penelitian ini adalah melakukan perbandingan dari keempat tipe bahan bakar dalam mengurangi emisi-emisi di kapal yang dihasilkan oleh marine diesel engine dari segi performa mesin, seperti nilai daya, torsi, Specific Fuel Consumption (SFC),

dan mechanical efficiency mesinnya. Lalu, biaya yang dibutuhkan untuk menggunakan keempat bahan bakar tersebut. Serta dari segi emisi yang dihasilkan dari penggunaan keempat bahan bakar tersebut. Metode yang digunakan untuk membantu penelitian ini adalah metode perbandingan. Dengan perhitungan daya dan emisi menggunakan perangkat lunak (software) yang bernama Diesel-RK. Terkait biaya, dilakukan dengan melihat harga pasar dan kalkulasi manual.

METODOLOGI

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode perbandingan atau metode komparatif. Metode ini digunakan untuk mengetahui bahan bakar yang memiliki tingkat efisiensi tinggi terhadap performa mesin, mengetahui bahan bakar yang memiliki emisi rendah, dan mengetahui biaya per bahan bakar. Perhitungan performa mesin dan emisi seperti daya, torsi, SFC, *Mechanical Efficiency*, emisi NO_x, emisi CO₂, dan emisi SO₂. Perhitungan ini dilakukan dengan mensimulasikan kecepatan mesin dari yang paling minimal hingga kecepatan mesin maksimal dengan selisih 100 rpm menggunakan Diesel-RK. Yang mana kecepatan minimal pada mesin ini adalah sebesar 600 rpm dan kecepatan maksimalnya sebesar 1800 rpm. Gambar 3 merupakan langkah-langkah dalam mencari nilai performa dan emisi dengan menggunakan Diesel-RK:



Gambar 3. Langkah-langkah Diesel-RK

Setelah mengetahui data performa mesin dan emisi. Lalu, mencari nilai biaya operasional dengan mencari nilai konsumsi bahan bakar pada keempat bahan bakar (HSFO, LSFO, ULSFO, dan Biosolar

B30) dan per putaran mesinnya dari putaran 600–1800 rpm. Setelah itu, dikalikan dengan harga pasaran per bahan bakarnya. Persamaan 3.1 merupakan rumus konsumsi bahan bakar.

$$FC = (P \times SFOC \times t) / \rho_{fo} \quad (3.1)$$

Dimana:

P = Daya yang dihasilkan (kW)

FC = Total Konsumsi Bahan Bakar (m³)

SFOC = Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (gr/kWh)

t = Durasi perjalanan kapal saat berlayar (jam atau hours)

ρ_{fo} = Massa jenis bahan bakar (ton/m³)

Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan persamaan 3.2. Hasil dari perhitungan biaya tersebut nanti akan dibandingkan karena ada empat bahan bakar yang berbeda. Keempat bahan bakar

tersebut adalah HSFO, LSFO, ULSFO, dan B30. Keempat bahan bakar ini digunakan karena berfokus pada komposisi sulfurnya.

$$BOP = FC \times HBB \quad (3.2)$$

Dimana:

BOP = Biaya Operasional (Rp)

FC = Total Konsumsi Bahan Bakar (ton)

HBB = Harga Bahan Bakar (Rp/KL)

Selain menghitung biaya operasional bahan bakar, juga menghitung biaya estimasi insentif oleh pemerintah untuk menurunkan emisi pada keempat

bahan bakar. Persamaan 3.3 merupakan persamaan yang digunakan untuk mencari nilai tersebut.

$$BI = \frac{\Delta EM_x}{\Delta BOP} \quad (3.3)$$

Di mana:

BI = Biaya Insentif (Rp/g)

ΔEM_x = Selisih Perbandingan Emisi NO_x/CO₂/SO₂ yang Dihasilkan oleh Bahan Bakar

LSFO, ULSFO, dan Biosolar B30 dengan Bahan Bakar HSFO (g)
 ΔBOP = Selisih Biaya Trip (Rp)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, metode pengumpulan data yang digunakan ada dua, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer yang didapatkan adalah data harga bahan bakar dari PT. XYZ. Sedangkan data sekunder yang digunakan didapatkan dari hasil penelitian yang ada pada studi literatur:

Data-data yang dibutuhkan dalam penyelesaian penelitian ini, antara lain:

1. Tipe Kapal
2. Kecepatan Kapal

3. Rute Pelayaran
4. Voyage
5. Mesin Kapal
6. Spesifikasi Mesin
7. Properti Bahan Bakar HSFO, LSFO, ULSFO, dan B30
8. Harga Bahan Bakar HSFO, LSFO, ULSFO, dan B30

Data kapal yang digunakan adalah Oil Tanker terlihat pada Tabel 1

Tabel 1 Data kapal.

Spesifikasi	Keterangan
Tipe kapal	<i>Oil products Tanker</i>
LOA	76.89 m
LPP	73.81 m
LWL	75.29 m
<i>Breadth</i>	13.01 m
<i>Height</i>	5.91 m
<i>Draught</i>	7.3 m
Cb	0.75
<i>Sea speed</i>	10 knot

Data mesin yang dikumpulkan untuk subjek penelitian terlihat pada Tabel 2

Tabel 2. Data spesifikasi mesin.

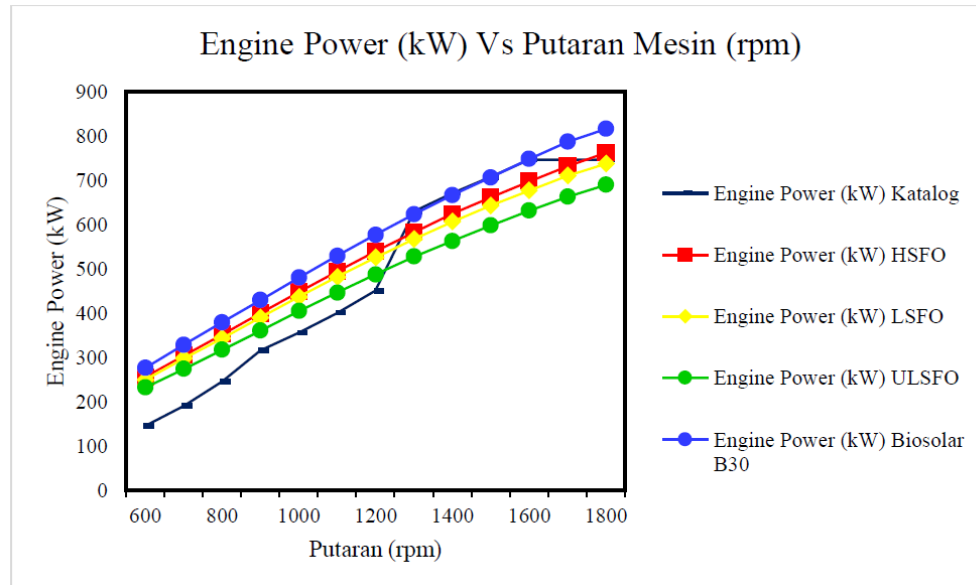
Spesifikasi	Keterangan
Tipe Mesin	C 32 ACERT IMO II
Max Power	1014.28 hp /746 kW at 1800 rpm
Working Cycle	Four-Stroke Cycle
Fuel and Method of Ignition	DI Diesel
Desain mesin	V-line engine
No Silinder	12 silinder
Diameter silinder	5.7 inch = 145 mm
Stroke	6.38 inch = 162 mm
Compression ratio	15:1
Break mean effective pressure at nominal RPM	15.5 bar = 2.59
Cooling system	Liquid Cooling
	Turbocharged Diesel Engine
	Intecooler System
Application	Overland application

Sumber: katalog mesin C32 ACERT

Hasil Performa Mesin Keempat Bahan Bakar dengan Katalog Mesin

Diketahui variasi daya sebagai fungsi putaran hampir sama untuk semua bahan bakar yang diuji dalam penelitian ini, terlihat dari Gambar 4. Jika dibandingkan dengan bahan bakar lainnya, Biosolar B30 memiliki

daya mesin yang lebih tinggi daripada katalog. Peningkatan daya pada Biosolar B30 dapat disebabkan oleh efisiensi pembakaran biodiesel yang lebih baik dibandingkan dengan bahan bakar yang digunakan oleh katalog dan ketiga bahan bakar lainnya, dengan daya maksimum sebesar 815,29 kW dengan putaran 1800 rpm.



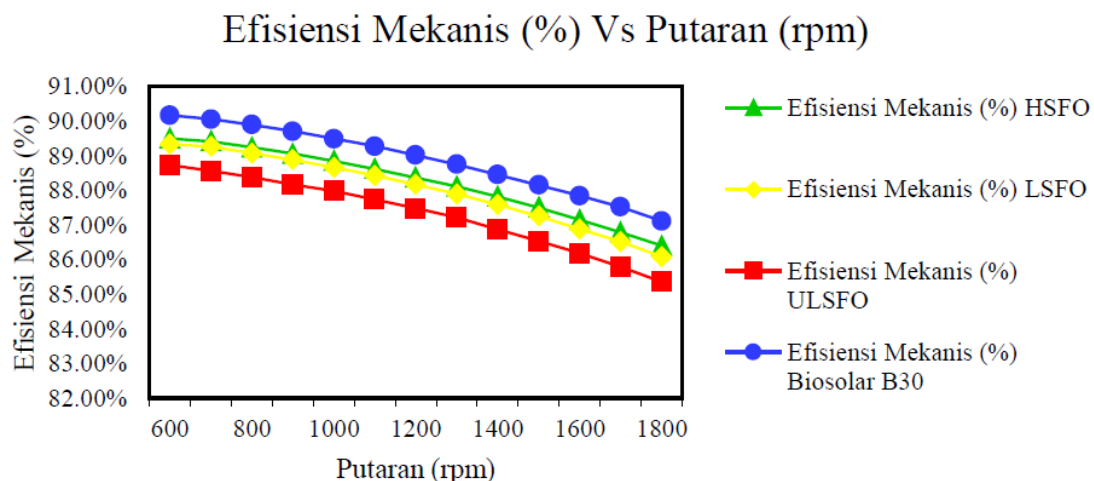
Gambar 4. Variasi daya mesin untuk empat bahan bakar pada berbagai putaran mesin.

Sumber data perbandingan: Katalog mesin C 32 Acert

Hasil Efisiensi Mekanis (EM)

Efisiensi mekanis (EM) digunakan untuk mengetahui penggunaan bahan bakar yang lebih efisien. Hal ini dikarenakan apabila mesin diesel yang memiliki efisiensi mekanis tinggi menghasilkan lebih banyak daya dari setiap tetes bahan bakar yang digunakan. Dengan kata lain, mesin dapat menghasilkan daya yang lebih besar dengan jumlah bahan bakar yang sedikit.

Variasi EM untuk keempat bahan bakar pada berbagai putaran ditunjukkan pada Gambar 5. Diketahui bahwa EM tertinggi dihasilkan oleh bahan bakar Biosolar B30 pada putaran 600 rpm dengan nilai sebesar 90,17%. Dari Gambar 7 juga dapat diketahui bahwa peningkatan putaran mesin menyebabkan terjadinya penurunan EM. Hal ini dapat disebabkan oleh hilangnya energi, terjadinya gesekan, dan ketidaksempurnaan pembakaran.



Gambar 5. Variasi EM mesin untuk empat bahan bakar pada berbagai putaran mesin.

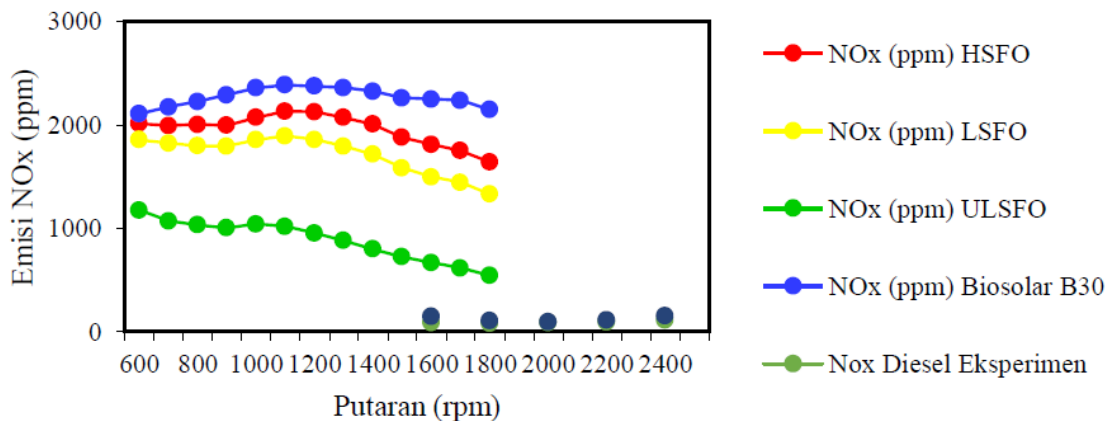
Sumber data perbandingan: Katalog mesin C 32 Acert

Hasil Emisi Keempat Bahan Bakar

Nitrogen oksida (NO_x) adalah produk sampingan (polutan) yang memiliki hubungan positif dengan suhu pembakaran, yang secara langsung dipengaruhi oleh mesin (Sutrisno et al., 2020). Secara umum, peningkatan NO_x berhubungan langsung dengan parameter mesin seperti suhu pembakaran di dalam silinder yang lebih tinggi, ketersediaan oksigen yang

diberikan oleh bahan bakar, dan waktu (Abed et al., 2019). Pada penelitian eksperimen, bahan bakar B30 memiliki emisi NO_x yang lebih tinggi dibandingkan dengan diesel. Begitu juga pada penelitian ini, pada bahan bakar Biosolar B30, emisi NO_x lebih tinggi dibandingkan dengan tiga bahan bakar lainnya yang bukan merupakan bahan bakar campuran. Terlihat pada Gambar 6.

Emisi NO_x (ppm) Vs Putaran (rpm)



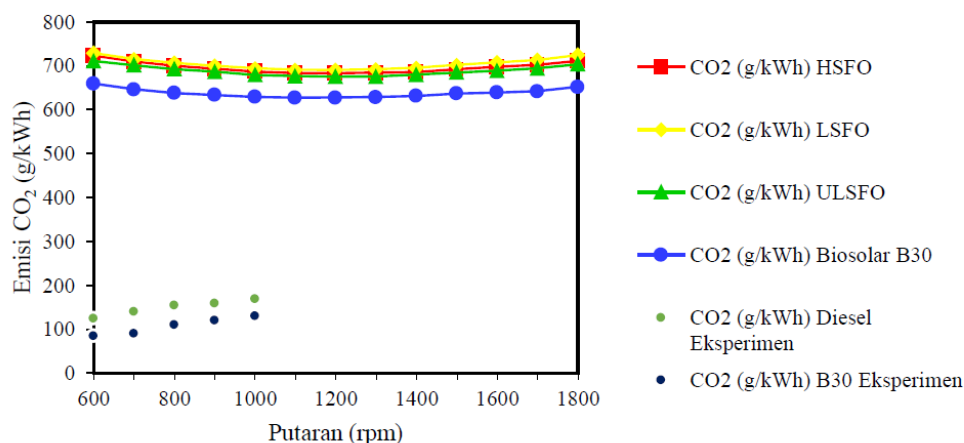
Gambar 6. Variasi dari emisi NO_x untuk keempat bahan bakar pada berbagai putaran (rpm)

Sumber perbandingan: (Sutrisno et al., 2020).

Pada biodiesel, emisi CO₂ memiliki rasio karbon terhadap hydrogen yang rendah. Sehingga dapat meningkatkan oksidasi molekul CO menjadi CO₂ sehingga terbentuk lebih banyak air dan gas CO₂ lebih sedikit (Abed et al., 2019). Pada penelitian

terdahulu (eksperimen) dan hasil penelitian menunjukkan bahwa bahan bakar diesel/fossil menghasilkan emisi CO₂ yang lebih tinggi dibandingkan bahan bakar B30, dapat dilihat pada Gambar 7.

Emisi CO₂ (g/kWh) Vs Putaran (rpm)



Gambar 7. Variasi dari emisi CO₂ untuk keempat bahan bakar pada berbagai putaran (rpm)

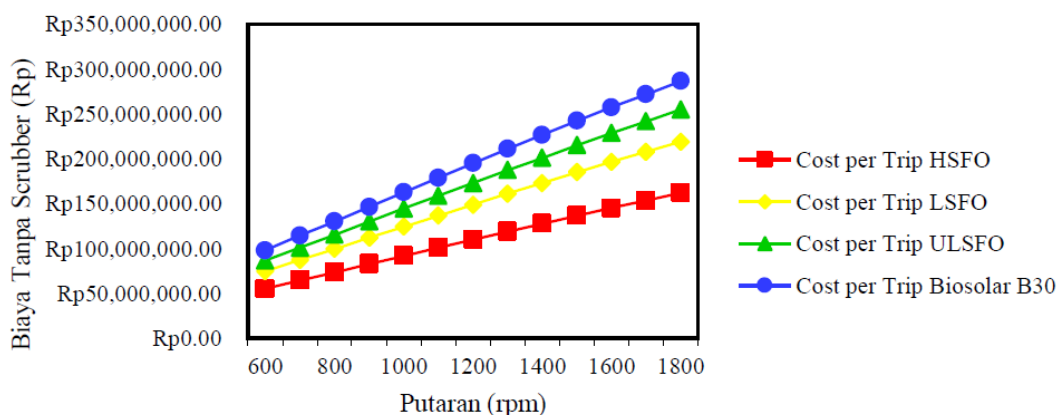
Sumber perbandingan: (Sutrisno et al., 2020)

Hasil Perbandingan Biaya Keempat Bahan Bakar

Variasi biaya keempat bahan bakar pada putaran mesin 600-1800 rpm yang mana HSFO tanpa Scrubber pada Gambar 11, menunjukkan bahwa harga bahan bakar Biosolar B30 paling mahal dibandingkan biaya

operasional lainnya. Hal ini disebabkan harga bahan bakar Biosolar B30 itu sendiri sudah mahal dari pasarannya. Sedangkan pada variasi biaya keempat bahan bakar HSFO dengan Scrubber pada Gambar 8, menunjukkan bahwa biaya termahal jatuh kepada HSFO dengan Scrubber, karena harga Scrubber memiliki harga yang mahal.

Biaya Tanpa Scrubber (Rp) Vs Putaran (rpm)



Gambar 8. Variasi bahan bakar (HSFO tanpa scrubber) pada berbagai putaran (rpm).

KESIMPULAN

Dari segi performa mesin dengan menggunakan metode perbandingan, didapatkan bahwa bahan bakar Biosolar B30 menghasilkan total nilai rata-rata daya, torsi, dan efisiensi mekanis tertinggi dibandingkan dengan katalog dan tiga jenis bahan bakar lainnya. Sedangkan pada performa mesin berupa spesifik fuel consumption atau SFC pada katalog, keempat bahan bakar yang diteliti memiliki nilai rata-rata terendah pada bahan bakar Biosolar B30. Dapat disimpulkan bahwa bahan bakar Biosolar B30 merupakan bahan bakar yang membuat performa lebih efisien.

Dari hasil analisis dari segi emisi pada keempat bahan bakar dengan metode perbandingan. Diketahui bahwa pada emisi NO_x , eksperimen dan hasil simulasi bahan bakar B30 lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar fosil/diesel atau ketiga bahan bakar lainnya. Lalu, pada emisi CO_2 , hasil eksperimen dan hasil simulasi menunjukkan bahwa emisi CO_2 yang dihasilkan oleh bahan bakar B30 lebih rendah

dibandingkan dengan hasil eksperimen pada bahan bakar fosil/Diesel atau ketiga bahan bakar lainnya. Emisi yang didapatkan selanjutnya adalah emisi SO_2 . Dari hasil analisis dari segi biaya pada keempat bahan bakar dengan metode perbandingan, didapatkan bahwa harga bahan bakar HSFO lebih murah dibandingkan dengan harga LSFO, ULSFO, dan Biosolar B30. Namun, apabila HSFO menggunakan scrubber, biaya operasional termurah ada pada bahan bakar LSFO.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia atas dukungan penuh atas penelitian dan biaya konferensi.

DANA PENELITIAN

Penelitian ini telah mendapatkan dukungan pendanaan konferensi nasional dari Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abed, K. A., Gad, M. S., El Morsi, A. K., Sayed, M. M., & Elyazeed, S. A. (2019). Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Egyptian Journal of Petroleum*, 28(2), 183–188. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2019.03.001>
- [2] Chu Van, T., Ramirez, J., Rainey, T., Ristovski, Z., & Brown, R. J. (2019). Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 70, 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.04.001>
- [3] Kass, M., Kaul, B., Armstrong, B., Szybist, J., & Lobodin, V. (2022). Stability, rheological, and combustion properties of biodiesel blends with a very-low sulfur fuel oil (VLSFO). *Fuel*, 316.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123365>

- [4] Livaniou, S., Chatzistelios, G., Lyridis, D. V., & Bellos, E. (2022). LNG vs. MDO in Marine Fuel Emissions Tracking. *Sustainability (Switzerland)*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/su14073860>
- [5] Ni, P., Wang, X., & Li, H. (2020). A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions for marine diesel engines. In *Fuel* (Vol. 279). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118477>
- [6] Suherian, A., Lia Zariatina, D., & Chandra, I. (2018). ANALISIS DAN PENGUJIAN PERFORMA PENGGUNAAN SUPERCHARGER PADA ENGINE 1300 CC OHV. 7.
- [7] <https://teknobiz.univpancasila.ac.id/index.php/12345/article/view/167>
- [8] Sutrisno, J., Dharma, S., S Silitonga, A., Halim Shamsuddin, A., H Sebayang, A., Milano, J., Rahmawaty, & Supriyanto. (2020). Experimental Assessment of The Performance and Exhaust Emissions Characteristic of a Diesel with Jatropa Curcas-Ceiba Pentandra Mixture Biodiesel/Bioethanol Blends. <https://www.researchgate.net/publication/343218512>
- [9] Yuvenda, D., Sudarmanta, B., Wahjudi, A., & Hirowati, R. A. (2022). Effect of Adding Combustion Air on Emission in a Diesel Dual-Fuel Engine with Crude Palm Oil Biodiesel Compressed Natural Gas Fuels. *International Journal of Renewable Energy Development*, 11(3), 871–877. <https://doi.org/10.14710/ijred.2022.41275>