

Studi Pemanfaatan Teknologi *Hydrogen Fuel Cells* (HFCs) pada Kapal Peti Kemas

Muhammad Dihan Ramadhan Pradana¹, Setyo Nugroho^{1*}, Eka Wahyu Ardhi¹

¹Departemen Teknik Transportasi Laut Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Gedung SEA Kampus ITS Sukolilo Kota Surabaya 60111 Jawa Timur

*snugroho@seatrans.its.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v16i1.16269>

Abstrak

International Maritime Organization (IMO) telah mengeluarkan strategi ambisius untuk menurunkan emisi GRK (*greenhouse gas*) global sebanyak 50% pada 2050 dan emisi karbon sebanyak 70% pada 2050. Terdapat beberapa alternatif dalam menurunkan emisi karbon, dimana salah satunya merupakan *hydrogen fuel cells* (HFCs). Teknologi HFCs diperkirakan dapat mengurangi emisi karbon hingga 80% dan memiliki efisiensi luaran 10% hingga 20% lebih besar daripada mesin diesel. Dalam penelitian ini, analisis kelayakan HFCs dilakukan melalui metode *life-cycle analysis* dan *simple additive weighting* dengan mempertimbangkan 3 jenis fuel cells (PEMFC, MCFC, SOFC) dan 4 jenis bahan bakar (Hidrogen hijau, hidrogen biru, hidrogen abu-abu, LNG). Analisis kelayakan menunjukkan bahwa kombinasi antara SOFC dengan hidrogen hijau menjadi opsi terbaik dalam pengurangan emisi karbon mulai dari 78,28% hingga 82,31% untuk kapal *hybrid*. Namun demikian, dikaji dari aspek finansial, opsi kapal *hybrid* dapat memberikan konsekuensi pengurangan pendapatan hingga 27% sebagai akibat dari pelebaran ruang mesin. Teknologi HFCs juga memberikan perusahaan nilai *net present value* yang lebih rendah dibandingkan menggunakan opsi kapal diesel.

Kata Kunci : Analisis *Cost-Benefit* , dekarbonisasi, Indeks *Energy Efficiency Design*, *Green Shipping*, Sel bahan bakar Hidrogen

Abstract

International Maritime Organization has previously issued an ambitious strategy to decrease maritime carbon emission by 70% in 2050. There are lots of alternatives in reducing carbon emission, with hydrogen fuel cells being one considered. Hydrogen fuel cells (HFCs) is projected to decrease maritime carbon emission up to 80% and has larger engine efficiency, roughly 10-20% higher than of diesel engine. In this research, feasibility analysis of HFCs was conducted through life cycle analysis and simple additive weighting by considering 4 types of fuel (green/blue/gray hydrogen and LNG) and 3 types of HFCs (PEMFC, MCFC and SOFC). Life cycle analysis showed that combination of Solid Oxide Fuel Cells and blue hydrogen came out as the best solution to reduce carbon emission up to 82% for hybrid-powered vessels. From financial perspective however, hybrid-engine option may reduce overall gross income by 27% since it requires higher engine space. Furthermore, utilization of fuel cell resulted in a lower net present value as a result of higher investment cost compared to diesel-powered vessels.

Keywords : *Cost-Benefit Analysis*, *Decarbonization*, *Energy Efficiency Design Index*, *Green Shipping*, *Hydrogen Fuel Cells*

PENDAHULUAN

Pada tahun 2018, IMO telah mengeluarkan resolusi mengenai strategi awal pengurangan emisi GRK dari sektor pelayaran. Resolusi ini kemudian ditindaklanjuti pada Mei 2019 dengan melibatkan negara anggota IMO dalam proses ratifikasi regulasi EEDI untuk beberapa tipe kapal niaga, serta mengajak industri pelayaran dan operator pelabuhan di seluruh dunia untuk menyusun program kerjasama pembiayaan (*trust*

fund) dalam rangka menciptakan alternatif/teknologi bahan bakar ramah lingkungan (IMO, 2020). Target jangka panjang dari strategi ini adalah pengurangan emisi karbon sebesar 75% (50% dari emisi GRK global) pada 2050. Sedangkan target jangka pendek dari inisiatif ini adalah pengurangan emisi karbon sebesar 40% pada tahun 2030 (IMO, 2019).

Menurut Hu (2019), terdapat beberapa alternatif dalam rangka mengurangi emisi karbon pada sektor pelayaran. Alternatif ini meliputi adanya inisiatif penggantian bahan bakar fosil menjadi bahan bakar ramah lingkungan, manajemen armada, peningkatan efisiensi sistem penggerak, serta *speed and voyage optimization*

Article History:

Received: August, 9th, 2022; **Accepted:** Jan 21st, 2023

Cite this as:

Pradana, M.D.R, Nugroho, S & Ardhi, E.W. (2023). *Studi pemanfaatan teknologi Hydrogen Fuel Cells (HFCs) pada kapal peti kemas*. *Rekayasa*. Vol 16(3) 17-26.

(IMO, 2019). Namun demikian, dari semua alternatif yang ditawarkan, opsi penggantian bahan bakar fosil menjadi bahan bakar hydrogen memiliki persentase pengurangan emisi karbon paling besar, yaitu hingga 100% atau tidak mengeluarkan emisi karbon sama sekali (Hyde & Ellis, 2019). Sedangkan opsi bahan bakar Bio-LPG/LNG dan biofuel dapat mengurangi emisi karbon berturut-turut sebesar 35% dan 90%. Penggantian bahan bakar fosil ke hydrogen juga didukung dengan adanya tren peningkatan volume permintaan hydrogen yang diproyeksikan berada di angka 87,2 juta MT di tahun 2030 dan 287 juta MT di tahun 2050 (Nnabuife et al., 2022). Berdasarkan penelitian sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa penggantian jenis bahan bakar pada segala moda transportasi memberikan RFR atau tarif angkut yang lebih mahal, walaupun dengan persentase kenaikan yang berbeda-beda (Luo et al., 2020).

Berdasarkan cara (reaksi) pembuatannya, hydrogen diklasifikasikan menjadi 3 yaitu: hydrogen biru, hydrogen hijau, dan hydrogen abu-abu. Hydrogen hijau merupakan tipe hydrogen yang paling efisien (dalam skala bisnis kecil), karena pada proses pembuatannya hanya menggunakan reaksi elektrolisis, yaitu reaksi pemecahan molekul air menjadi molekul oksigen (O_2) dan hydrogen (H_2) (Park et al., 2022). Sedangkan hydrogen biru dibuat menggunakan skema *carbon capturing* (Kothari et al., 2004), dimana proses ini membutuhkan biaya yang sedikit lebih mahal. Hydrogen biru dihasilkan dari proses reaksi pemecahan molekul hydrogen (H_2) dari molekul hidrokarbon yang terdapat pada gas alam. Proses *carbon capturing* perlu dilakukan mengingat pada molekul hidrokarbon terdapat unsur C (karbon) yang apabila tidak melalui proses *capturing*, akan menghasilkan hydrogen dengan kadar emisi berlebih (Hasan, 2007).

Selanjutnya, hydrogen abu-abu dihasilkan dari proses reaksi pemecahan molekul hydrogen dari gas alam dan/atau batu bara. Hydrogen abu-abu merupakan hydrogen yang paling banyak diproduksi saat ini mengingat ketersediaan batu bara dan gas alam yang sangat melimpah (Voldsund et al., 2016). Di satu sisi, proses produksi hydrogen abu-abu tidak membutuhkan biaya sebanyak hydrogen biru dan hydrogen hijau (Hermesmann & Müller, 2022). Namun demikian, hydrogen yang dihasilkan dari proses ini mengandung senyawa karbon sehingga berpotensi menghasilkan emisi apabila digunakan

sebagai bahan bakar. Data yang diperoleh dari website S&P Market Intelligence menunjukkan bahwa harga pasar hydrogen hijau saat ini memiliki rentang antara USD 3 – USD 6,55/kg (DiChristopher, 2021). Sedangkan harga pasar hydrogen biru (gas alam) berada di angka USD 2,40/kg dan hydrogen abu-abu memiliki harga pasar di angka USD 1,80/kg (Slater, 2021).

Sel bahan bakar hydrogen merupakan generator elektrokimia yang mengubah hydrogen menjadi tenaga listrik secara umum. Teknologi sel bahan bakar hydrogen memiliki 3 komponen yaitu: anoda, katoda, dan membran (selaput) elektrolit (Se, 2011). Hydrogen sebagai reaktan dari HFCs, dialirkan melalui anoda bersamaan dengan gas oksigen yang dialirkan melalui katoda. Di sisi anoda, molekul hydrogen (H_2) terurai menjadi elektron dan proton. Proton selanjutnya akan melewati membran elektrolit, sedangkan elektron melewati rangkaian dan menghasilkan arus listrik. Dalam penelitian ini, jenis HFCs diklasifikasikan menjadi 3 yaitu, PEMFC, MCFC dan SOFC (Fernández-Ríos et al., 2022).

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan mengambil sampel 2 (dua) kapal pembanding dan pertama-tama dilakukan dengan merancang desain konseptual ruang mesin dengan asumsi apabila kapal menggunakan mesin diesel dan *fuel cells*. Berdasarkan desain yang telah dibuat, selanjutnya dilakukan analisis biaya manfaat dengan mengambil 12 varian data (3 jenis *fuel cells* dan 4 jenis bahan bakar) dengan mempertimbangkan indikator *net present value* (NPV), *benefit-cost ratio* (BCR), *payback period* (PP) terhadap masing-masing kapal menggunakan formulasi berikut.

$$NPV = \sum_{i=1}^{24} \frac{C_i}{(1-R)^i} - C_0 \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

NPV = Net Present Value (Rp)

C_t = Arus kas per tahun pada periode t (Rp)

t = durasi/umur ekonomis proyek (tahun)

C_0 = Nilai investasi awal pada tahun ke 0 (Rp)

R = Suku bunga atau *discount rate* (dalam %)

Sedangkan perhitungan BCR dapat dilakukan melalui persamaan **Error! Reference source not found.** di bawah

$$PVB = \sum_{i=1}^j \frac{(\Delta CT_i + \Delta FC_i + \Delta R_i)}{(1+d)^i} + (\Delta CT_0 + \Delta FC_0 + \Delta R_0) \dots (2)$$

$$PVC = \sum_{i=1}^j \frac{CC_i + CO_i}{(1+d)^i} + (CC_0 + CO_0) \dots \dots \dots (3)$$

$$BCR = \frac{PVB}{PVC} \dots \dots \dots (4)$$

Keterangan:

- ΔCT_i = selisih pajak karbon pada tahun ke-i (Rp)
- ΔCT_0 = selisih pajak karbon pada tahun ke-0 (Rp)
- ΔFC_i = selisih biaya bahan bakar pada tahun ke-i (Rp)
- ΔFC_0 = selisih biaya bahan bakar pada tahun ke-0 (Rp)
- ΔR_i = selisih pendapatan tahun ke-i (Rp)
- ΔR_0 = selisih pendapatan tahun ke-0 (Rp)
- CC_i = depresiasi pada tahun ke-i (Rp)
- CC_0 = depresiasi pada tahun ke-0 (Rp)
- CO_i = biaya operasional pada tahun ke-i (Rp)
- CO_0 = biaya operasional pada tahun ke-0 (Rp)
- d = discounted value (%)
- j = usia ekonomis kapal (tahun)
- PVB = Nilai sekarang dari total pendapatan yang dihasilkan
- PVC = Nilai sekarang dari total biaya yang dibutuhkan (Rp)
- t = periode investasi (tahun)
- r = Suku bunga atau discount rate (dalam %)
- BCR = Nilai rasio manfaat dan biaya

Perhitungan periode pengembalian investasi dapat dilakukan melalui persamaan berikut:

$$PP = \frac{P_0}{C} * 1 \text{ tahun} \dots \dots \dots (5)$$

Keterangan:

- PP = *payback period*
- P_0 = nilai investasi awal (Rp)
- C = arus kas selama periode tertentu (Rp)

Setelah mengetahui besaran nilai NPV, BCR, dan PP maka selanjutnya dilakukan perhitungan nilai emisi menggunakan persamaan matematis *Energy Efficiency Design Index (EEDI)*.

$$EEDI = \frac{P * SFOC * E_f}{V_s * DWT} \dots \dots \dots (6)$$

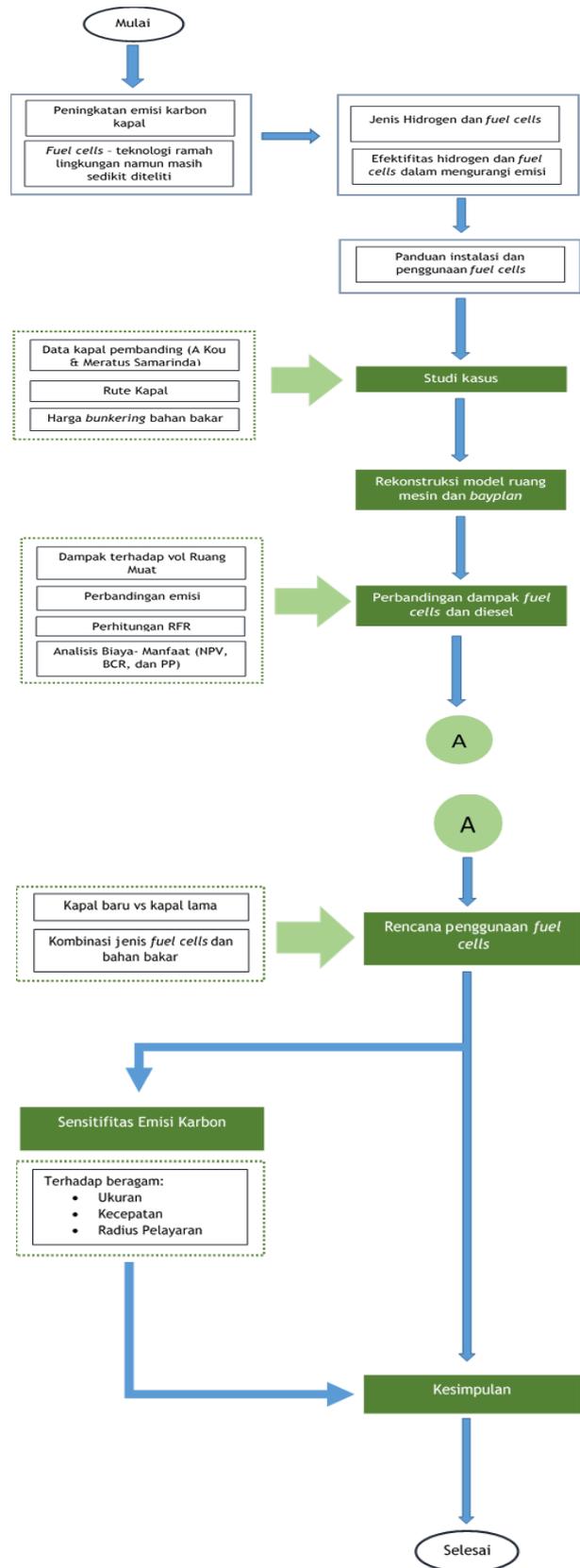
Keterangan:

- P = daya mesin (kW)
- $SFOC$ = konsumsi bahan bakar mesin (gr/kWh)
- E_f = faktor emisi bahan bakar (kg CO₂/ kg fuel)
- V_s = kecepatan dinas kapal (knot)
- DWT = deadweight kapal (ton)

Setelah melakukan analisis kelayakan investasi dan perhitungan emisi, selanjutnya dilakukan strategi pengambilan keputusan terhadap 12 varian data menggunakan metode *simple additive weighting*. Tujuan dari pengambilan keputusan ini adalah untuk mengetahui jenis *fuel cells* dan bahan bakar terbaik, ditinjau dari sisi emisi dan finansial.

Terakhir, varian terpilih selanjutnya akan melalui analisis sensitifitas untuk menghasilkan rekomendasi teknis bagi pemilik kapal. Rekomendasi ini dilakukan melalui uji sensitifitas variabel DWT, kecepatan dinas, dan jarak tempuh terhadap nilai EEDI. Ketiga variabel ini diharapkan menjadi gambaran bagi penelitian selanjutnya untuk dapat menentukan strategi terbaik bagi penggunaan *fuel cells* agar efektif menurunkan

emisi karbon. Secara umum, alur penelitian dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

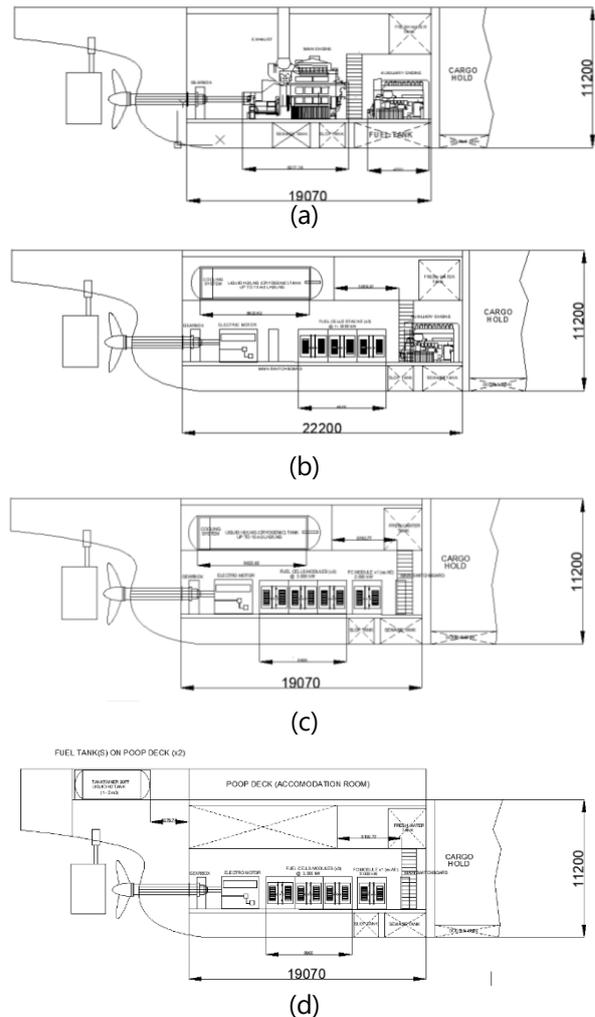
Pertimbangan dalam mengambil sampel kapal pembanding adalah kesesuaian antara kapal dengan daerah pelayaran (rute) yang ditentukan oleh pemilik kapal. Dalam hal ini, Kapal 2 merupakan kapal milik salah satu perusahaan pelayaran asal Indonesia yang saat ini ditugaskan pada rute Indonesia-Singapura, sehingga diambil menjadi percontohan dalam penelitian ini. Walaupun begitu, karena mayoritas kapal-kapal Indonesia yang ditugaskan di rute tersebut memiliki DWT yang relatif kecil (< 10.000), maka diambil 1 kapal pembanding lagi yang selanjutnya disebut "Kapal 1". Hal ini dilakukan karena Kapal 1 memiliki perbandingan daya (ME), kecepatan dinas, dan DWT yang relatif lebih besar daripada Kapal 2. Dalam merancang desain konseptual dan analisis biaya-manfaat, digunakan 2 (dua) kapal pembanding dengan spesifikasi sesuai Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Kapal Pembanding

Data Studi Kasus	Keterangan		Satuan
	Kapal 1	Kapal 2	
Tahun pembuatan	2007	2017	
Payload	1.149	526	TEUs
Kecepatan dinas (isi)	12,16	11,20	knot
Loa	142,7	123,0	M
Lpp	133,5	118,6	M
B	22,6	24,0	M
T	8,0	7,8	M
H	11,2	11,45	M
DWT	12.773	8.139	Ton
GT	9.610	7.542	
Daya ME	7.860	3.436	kW
Daya AE	1.946	1.207	kW
Klasifikasi	Class NK	BKI	
IMO No.	9343699	980841	

Desain Konseptual

Menurut *Guidelines for the Use of Fuel Cell Systems on Board of Ships and Boats* yang diterbitkan oleh DNV-GL (2003), *fuel cells* dapat diletakkan di ruang mesin dengan syarat bahwa modular *fuel cells* harus memiliki sistem pengontrol suhu dan tekanan serta sistem *fuel cells* harus memiliki wadah khusus dan tidak bisa diletakkan secara terbuka. Sedangkan tangki bahan bakar harus diletakkan terpisah dari sistem *fuel cells* mengingat hidrogen cair memiliki resiko ledakan yang cukup tinggi (Mao et al., 2021). Berdasarkan regulasi tersebut, dapat dirumuskan 4 (empat) model desain yang dijelaskan melalui Gambar 2.



Gambar 2. Model Rekonstruksi Ruang Mesin

Keterangan:

- Kapal berbahan bakar diesel,
- Kapal *dual engine*, dengan *fuel cells* sebagai mesin utama dan diesel sebagai mesin bantu,
- Kapal bertenaga *fuel cells*,
- Kapal bertenaga *fuel cells* dengan peletakan tangki BB di atas *upper deck*

Setiap model memiliki konsekuensi yang berbeda, dimana model (b) memiliki konsekuensi berupa pengurangan kapasitas sebesar 70 TEUs sebagai akibat dari melebarnya ruang mesin. Sedangkan model (d) memiliki konsekuensi pengurangan sebesar 30 TEUs mengingat tangki hydrogen tidak boleh ditumpuk dengan muatan/peti kemas lain. Dalam rangka mengetahui model manakah yang terbaik dan terburuk, digunakan konversi dari pengurangan kapasitas menjadi pendapatan sehingga diperoleh perbandingan sebagaimana dijelaskan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Biaya Investasi dan Pendapatan pada Keempat Model Rekonstruksi

Jenis Model	Pendapatan (Rp/tahun)	Biaya Investasi (Rp)
Model I	241.134.299.546	339.492.389.319
Model II	228.752.294.608	841.741.304.137
Model III	241.134.299.546	1.099.034.192.437
Model IV	234.838.364.832	841.741.304.137

Berdasarkan tabel tersebut, dapat diketahui bahwa model II merupakan model terburuk karena memiliki pendapatan yang paling kecil dibanding model lainnya. Selain itu, model II juga merupakan model kapal hybrid (mesin ganda) dimana emisi karbon yang dihasilkan dari reaksi pembakaran pada model II lebih besar dibandingkan model III dan IV yang merupakan kapal *fuel cells*. Dengan mempertimbangkan pendapatan dan manfaat yang diberikan, Penulis memutuskan menggunakan model II dalam analisis biaya-manfaat untuk mengetahui seberapa besar manfaat teknis dan finansial yang dapat diperoleh perusahaan dalam skenario terburuk.

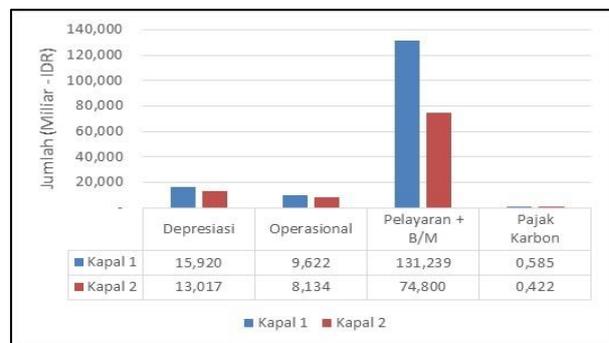
Analisis Biaya-Manfaat

Perhitungan analisis biaya-manfaat dilakukan melalui 3 skenario, yaitu:

- Kapal bertenaga diesel (kapal lama)
Merupakan skenario kapal pada umumnya, dalam artian kapal peti kemas tidak mengalami proses modifikasi apapun sehingga masih tetap menggunakan mesin diesel dengan bahan bakar fosil (MFO).
- Kapal bertenaga *fuel cells* (kapal baru)
Merupakan modifikasi dari skenario (i) dimana kapal peti kemas tidak lagi menggunakan bahan bakar fosil dan mesin diesel, namun kapal tersebut akan menggunakan salah satu jenis hydrogen/LNG dan salah satu jenis *fuel cells*. Pada skenario ini, diasumsikan kapal peti kemas adalah kapal baru dengan usia ekonomis 24 tahun.
- Kapal bertenaga *fuel cells* (kapal lama)
Skenario ini secara teknis mirip seperti skenario ke ii, hanya saja kapal peti kemas dalam skenario ini merupakan kapal lama, dalam artian kapal yang sebelumnya menggunakan diesel akan melalui proses modifikasi (penggantian diesel ke *fuel cells*). Perhitungan usia ekonomis pada skenario ini mengikuti

tahun 2022 dikurangi tahun aktual pembuatan kapal. Skenario ini dibuat dengan tujuan untuk mengetahui apakah kapal lama dengan usia ekonomis <24 atau 25 tahun tetap layak menggunakan *fuel cells* ditinjau dari aspek finansial.

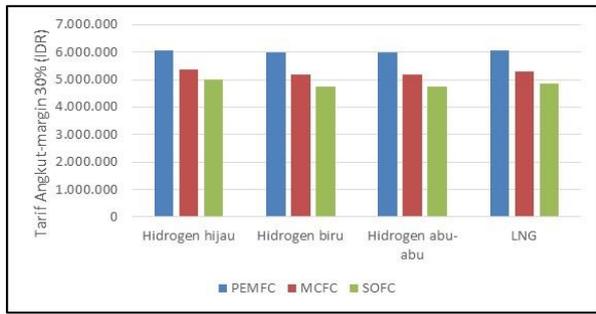
Analisis biaya dilakukan dengan merumuskan segala biaya yang muncul dalam pengoperasian kapal (Liu *et al.*, 2020). Biaya-biaya yang muncul merupakan biaya tetap (depresiasi dan biaya operasional) serta biaya variabel yang terdiri atas biaya bahan bakar, *port dues*, dan biaya bongkar-muat. Setelah mengetahui biaya total pengoperasian kapal/tahun, maka biaya satuan (*unit cost*) dapat diketahui dengan membagi biaya total dengan produktifitas angkut selama 1 tahun. Dengan menambahkan persentase laba kotor (GPM), maka dapat diketahui besaran tarif angkut/TEU dari masing-masing kapal.



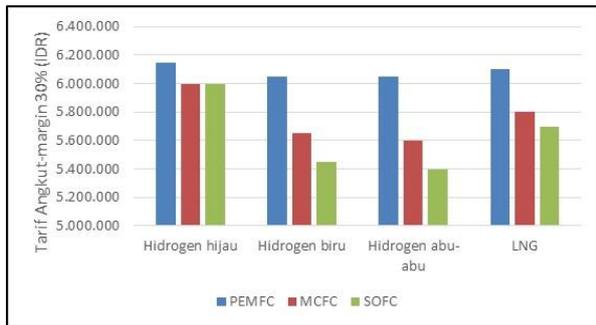
Gambar 3. Perbandingan Komponen Biaya pada Kapal 1 dan Kapal 2 dalam Skenario I

Untuk skenario II dan III, Penulis menggunakan 4 jenis bahan bakar (hidrogen hijau, hidrogen biru, hidrogen abu-abu, dan LNG) serta 3 jenis *fuel cells* yaitu PEMFC, MCFC, dan SOFC yang telah dibahas pada sub-bab sebelumnya. Pada prinsipnya, perhitungan analisis biaya pada skenario II dan III menggunakan formulasi yang sama dengan skenario I, yaitu dengan mengidentifikasi biaya-biaya yang muncul dalam pengoperasian kapal

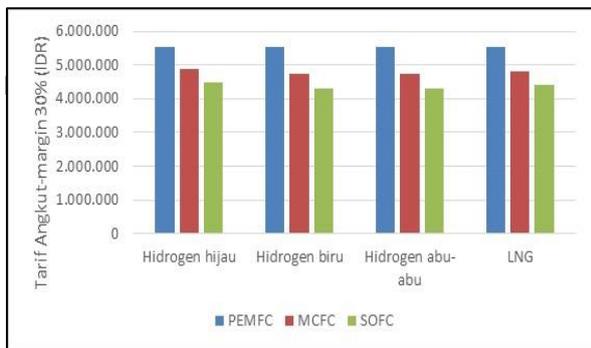
dan *fuel cells*. Hasil analisis pada skenario II dan III ditunjukkan melalui grafik berikut ini.



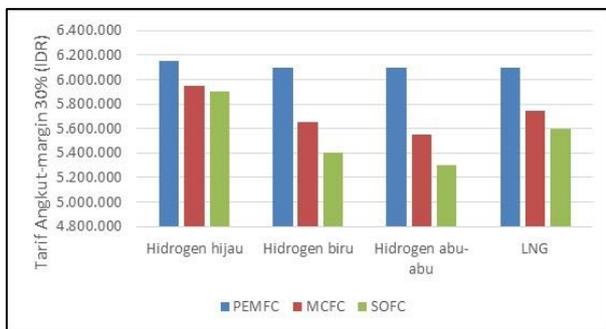
Gambar 4. Perbandingan Tarif Angkut (Rp/TEU) pada Kapal 1 – Skenario II



Gambar 5. Perbandingan Tarif Angkut (Rp/TEU) pada Kapal 2 – Skenario II



Gambar 6. Perbandingan Tarif Angkut (Rp/TEU) pada Kapal 1 – Skenario III



Gambar 7. Perbandingan Tarif Angkut (Rp/TEU) pada Kapal 2 – Skenario III

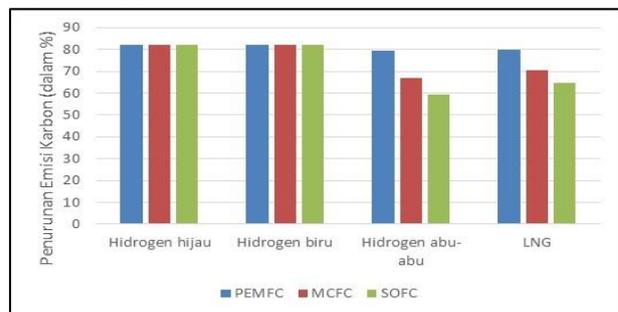
Berdasarkan keempat gambar tersebut, diketahui bahwa pada skenario II, jumlah kombinasi tarif angkut yang lebih murah daripada tarif angkut awal (diesel) adalah sebanyak 4 varian (Kapal 1) dan 12 varian (Kapal 2). Sedangkan pada skenario III, jumlah kombinasi yang memiliki besaran tarif angkut lebih murah adalah sebanyak 8 varian (Kapal 1) dan 12 varian (Kapal 2). Hal ini menunjukkan bahwa investasi *fuel cells* pada kapal masih berpotensi memberikan tarif angkut yang lebih kompetitif dibanding menggunakan bahan bakar minyak, dimana tarif yang kompetitif dapat membantu perusahaan pelayaran dalam melakukan penetrasi pasar.

Indikator Investasi

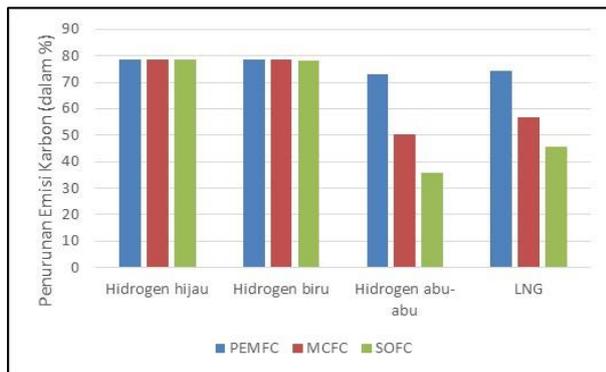
Setelah sebelumnya diketahui besaran tarif angkut, selanjutnya dilakukan pengembangan model perhitungan sehingga didapatkan nilai arus kas pada usia ekonomis kapal pada masing-masing skenario sehingga dapat menghasilkan nilai NPV (rate 10%), BCR, dan PP. Nilai ketiga indikator investasi pada skenario II dan III akan diperbandingkan untuk mengetahui skenario manakah yang lebih layak digunakan dalam rangka penggantian mesin kapal menjadi *fuel cells*. Investasi *fuel cells* pada kapal lama (Skenario III) memberikan pengembalian investasi yang lebih cepat dengan imbal balik yang lebih besar. Hal ini disebabkan karena umur ekonomis *fuel cells module* hanya singkat, yaitu 5 tahun. Sehingga semakin pendek usia ekonomis kapal, maka semakin tinggi imbal balik investasi yang diterima perusahaan.

Perbandingan Emisi

Menggunakan formulasi EEDI, dapat diketahui bahwa masing-masing varian memiliki efektifitas yang berbeda terhadap penurunan emisi karbon dibanding dengan kapal yang menggunakan mesin diesel.



Gambar 8. Penurunan Emisi Karbon (%) pada Kapal 1 Terhadap Emisi Karbon pada Mesin Diesel



Gambar 9. Penurunan Emisi Karbon (%) pada Kapal 2 Terhadap Emisi Karbon pada Mesin Diesel

Skenario Pengambilan Keputusan

Pengambilan keputusan perlu dilakukan mengingat terdapat 12 varian yang memiliki efektifitas penurunan emisi indikator investasi yang beragam pada masing-masing skenario. Tahap pengambilan keputusan dilakukan melalui 2 tahap, yaitu tahap penentuan skenario dan tahap penentuan varian. Tahap penentuan skenario dilakukan untuk mengetahui skenario terbaik bagi Kapal 1 dan Kapal 2, baik itu skenario kapal baru (II) maupun kapal lama (III). Variabel yang akan diuji pada Tahap I adalah 3 indikator investasi yang telah diketahui sebelumnya.

Mekanisme pengambilan keputusan dilakukan menggunakan metode *simple additive weighting* dengan menggunakan *pairwise comparison* yang melalui uji konsistensi. Apabila nilai C_i/RI hasil normalisasi matriks pada Tahap 1 dan Tahap II lebih kecil dari 0,01, maka pembobotan dinyatakan konsisten/layak (Vafaei *et al.*, 2021). Luaran dari skenario pengambilan keputusan adalah berupa skor (nilai) akhir dari masing-masing varian. Varian yang memiliki skor paling besar adalah yang terpilih.

Tabel 3. Nilai Akhir Pengambilan Keputusan

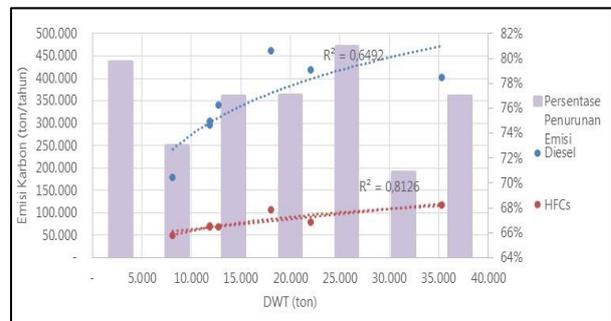
Jenis BB/fuel cells	Kapal 1			Kapal 2		
	PEM FC	MC FC	SOF C	PEM FC	MC FC	SOFC
Hidrogen hijau	0,86	0,93	0,92	0,91	0,92	0,97
Hidrogen biru	0,92	0,96	0,98	0,86	0,94	0,99
Hidrogen abu-abu	0,89	0,81	0,76	0,83	0,76	0,73
LNG	0,89	0,83	0,76	0,83	0,80	0,78

Melalui Tabel 3, dapat diketahui bahwa varian dengan skor tertinggi adalah kombinasi antara hidrogen biru dengan SOFC. Hasil ini berlaku

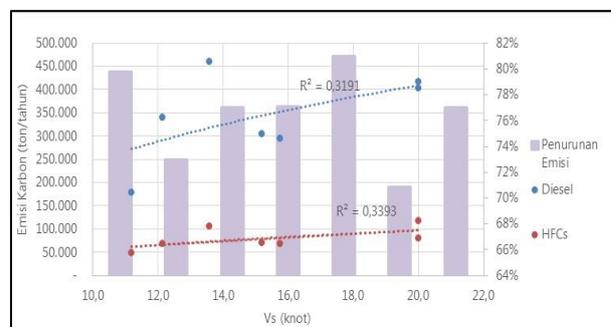
untuk Kapal 1 dan Kapal 2, sehingga dengan demikian jenis *fuel cells* dan bahan bakar yang dinilai optimum untuk digunakan sebagai mesin dan bahan bakar kapal adalah *Solid Oxide Fuel Cells* dengan hidrogen biru, karena disamping lebih efektif mengurangi emisi karbon, investasi *SOFC* juga dinilai lebih menguntungkan karena memberikan *return* yang lebih cepat dan lebih banyak bagi perusahaan.

Karakteristik Emisi Karbon

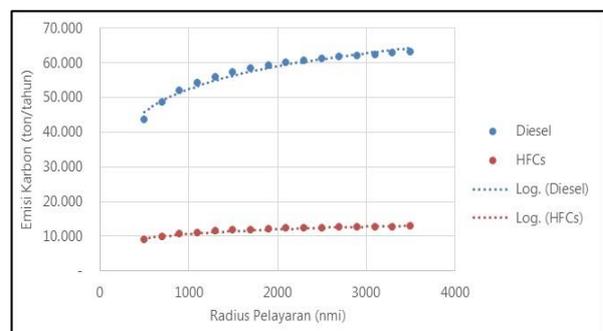
Dalam rangka memberikan gambaran terkait operasional kapal peti kemas yang menggunakan *fuel cells*, Penulis melakukan sensitifitas pada persamaan matematis EEDI guna mendapatkan pengaruh DWT (*dead weight tonnage*), kecepatan dinas (*Vs*), dan jarak tempuh kapal terhadap penurunan emisi karbon.



Gambar 10. Pengaruh DWT terhadap Emisi Karbon



Gambar 11. Pengaruh Kecepatan Terhadap Emisi



Gambar 12. Pengaruh Jarak Tempuh Terhadap Emisi Karbon

Variabel DWT dan kecepatan dinas menurut Gambar dan Gambar berbanding lurus dengan peningkatan emisi karbon. Walaupun begitu, selisih atau *gap* antara emisi karbon ketika menggunakan kapal diesel dan *fuel cells* (SOFC) cenderung meningkat berdasarkan grafik persentase pengurangan emisi (*bar chart* warna ungu). Hal yang sama juga terjadi pada variabel jarak tempuh dimana semakin tinggi jarak tempuh maka semakin besar emisi karbon yang dihasilkan. Walaupun demikian, dapat dipetakan bahwa dari sejumlah DWT dan kecepatan dinas, maka kapal peti kemas yang dinilai dapat mengurangi emisi karbon lebih dari 75% adalah kapal peti kemas dengan ukuran DWT antara 15.000 – 25.000 yang beroperasi dengan kecepatan dinas antara 14 – 18 knot.

Teknologi *hydrogen fuel cells* memang memberikan konsekuensi berupa biaya investasi yang lebih mahal daripada teknologi bahan bakar rendah emisi lainnya (Ahluwalia et al., 2022). Namun demikian, berdasarkan hasil analisis khususnya pada bagian persentase pengurangan emisi karbon, teknologi *fuel cells* (terlepas dari jenis dan bahan bakarnya) mampu memberikan dampak terhadap lingkungan yang lebih signifikan, yaitu penurunan emisi karbon sebesar 70 – 81% jika menggunakan skenario kapal hybrid (dengan asumsi bahwa mesin utama akan dimodifikasi menjadi *fuel cells* namun mesin bantu/generator tetap menggunakan mesin diesel). Apabila kedua mesin dimodifikasi menjadi *fuel cells*, terdapat kemungkinan bahwa emisi karbon akan berkurang hingga 98%.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis dari segi finansial, maka selayaknya investasi *fuel cells* dilakukan pada kapal peti kemas lama, dengan sisa usia ekonomis minimal 5 tahun (untuk kapal dengan DWT > 10.000) dan 9 tahun (untuk kapal dengan DWT < 10.000). Selanjutnya ditinjau dari segi emisi, maka jenis *Solid Oxide Fuel Cells* dengan bahan bakar hidrogen biru merupakan opsi terbaik dengan efektifitas penurunan emisi berkisar antara 78,28% - 82,31%. Dalam rangka mencapai target penurunan emisi yang ditentukan oleh IMO pada 2050 sebesar 75%, maka direkomendasikan kapal peti kemas dengan DWT 15.000 - 25.000 dengan kecepatan dinas 14 - 18 knots.

Penelitian ini masih berfokus dalam konteks penggunaan teknologi *fuel cells* pada jenis kapal

tertentu, sehingga dalam rangka merealisasikan penggunaan *fuel cells* di Indonesia, diperlukan penelitian yang berfokus ke area lain sebagai berikut:

1. Hilirisasi material pembuatan *hydrogen fuel cells*.
2. Model regulasi berbasis pajak karbon dalam rangka transisi menuju energi bersih untuk kapal niaga berbahan bakar hidrogen di Indonesia.
3. Korelasi antara variabel konsumsi bahan bakar - kecepatan dinas dengan variabel penurunan emisi - kecepatan dinas, dimana secara teori grafik yang dihasilkan dari kedua persamaan tersebut akan berbeda, sehingga perlu dilakukan analisis lebih lanjut untuk mengetahui kecepatan dinas kapal yang ideal.
4. Potensi penurunan emisi karbon pada penggunaan *fuel cells* untuk kapal non-peti kemas.
5. Optimalisasi nilai EEDI pada kapal peti kemas, maupun kapal tipe lainnya dengan melakukan eksperimen terkait *specific fuel consumption* pada sel bahan bakar hidrogen.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahluwalia, R. K., Wang, X., Star, A. G., & Papadias, D. D. (2022). Performance and cost of fuel cells for off-road heavy-duty vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(20), 10990–11006. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.144>
- Ahmed, S., Papadias, D., Ahluwalia, R., Hua, T., Roh, H.-S. (2015). Performance and Cost Analysis for a 300 kW Tri-Generation Molten Carbonate Fuel Cell System. *U.S. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program and Vehicle Technologies Office Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting*, 29–33.
- Fernández-Ríos, A., Santos, G., Pinedo, J., Santos, E., Ruiz-Salmón, I., Laso, J., Lyne, A., Ortiz, A., Ortiz, I., Irabien, Á., Aldaco, R., & Margallo, M. (2022). Environmental sustainability of alternative marine propulsion technologies powered by hydrogen - a life cycle assessment approach. *Science of the Total Environment*, 820. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.153189>

- Han, M., & Zhang, Y. (2017). Ceramic Materials for Solid Oxide Fuel Cell. *Kuei Suan Jen Hsueh Pao/Journal of the Chinese Ceramic Society*, 45(11), 1548–1554. <https://doi.org/10.14062/j.issn.0454-5648.2017.11.02>
- Hasan, A. (2007). Aplikasi Sistem Fuel Cell Sebagai Energi Ramah Lingkungan di Sektor Transportasi dan Pembangkit. *Teknik Lingkungan*, 8(3), 277–286.
- Hermesmann, M., & Müller, T. E. (2022). Green, Turquoise, Blue, or Grey? Environmentally friendly Hydrogen Production in Transforming Energy Systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 90(February), 100996. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.100996>
- Hu, Q., Zhou, W., & Diao, F. (2019). Interpretation of Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. *Ship Building of China*, 60(1), 195–201.
- Hyde, K., & Ellis, A. (2019). *Feasibility of Hydrogen Bunkering*. <https://northsearegion.eu/media/9385/feasibility-of-hydrogen-bunkering-final-080419.pdf>
- IMO. (2020). Fourth IMO GHG Study 2020 Full Report. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.
- Inal, O. B., & Deniz, C. (2020). Assessment of fuel cell types for ships: Based on multi-criteria decision analysis. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121734. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121734>
- International Maritime Organization (IMO). (2019). *IMO Action To Reduce GHG Emissions From International Shipping*. 44(0).
- Kothari, R., Buddhi, D., & Sawhney, R. L. (2004). Sources and technology for hydrogen production: A review. *International Journal of Global Energy Issues*, 21(1–2), 154–178. <https://doi.org/10.1504/ijgei.2004.004707>
- Larriba, T., Garde, R., & Santarelli, M. (2013). Fuel cell early markets: Techno-economic feasibility study of PEMFC-based drivetrains in materials handling vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(5), 2009–2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.11.048>
- Liu, L., Yang, D. Y., & Frangopol, D. M. (2020). Probabilistic cost-benefit analysis for service life extension of ships. *Ocean Engineering*, 201(January), 107094. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107094>
- Luo, Z., Hu, Y., Xu, H., Gao, D., & Li, W. (2020). Cost-economic analysis of hydrogen for China's fuel cell transportation field. *Energies*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/en13246522>
- Mao, X., Ying, R., Yuan, Y., Li, F., & Shen, B. (2021). Simulation and analysis of hydrogen leakage and explosion behaviors in various compartments on a hydrogen fuel cell ship. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(9), 6857–6872. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.158>
- Markowski, J., & Pielecha, I. (2019). The potential of fuel cells as a drive source of maritime transport. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 214(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012019>
- Minnehan, J. J., & Pratt, J. W. (2017). Practical Application Limits of Fuel Cells and Batteries for Zero Emission Vessels. *Sandia Unlimited Release, SAND2017-1*, 1–71. <https://classic.ntis.gov/help/order-methods/>
- Nnabuife, S. G., Ugbeh-Johnson, J., Okeke, N. E., & Ogbonnaya, C. (2022). Present and Projected Developments in Hydrogen Production: A Technological Review*. *Carbon Capture Science & Technology*, 3(March), 100042. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100042>
- Park, C., Koo, M., Woo, J. R., Hong, B. Il, & Shin, J. (2022). Economic valuation of green hydrogen charging compared to gray hydrogen charging: The case of South Korea. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(32), 14393–14403. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.214>
- Saito, N. (2018). *The Maritime Commons: Digital Repository of the World Maritime The economic analysis of commercial ships with hydrogen fuel cell through case studies The Economic Analysis of Commercial Ships with Hydrogen Fuel Cell through Case Studies*.
- Se, G. L. (2011). Fuel Cells in Maritime Applications Challenges , Chances and Experiences. *4th International Conference on Hydrogen Safety*,

- 1–13.
- Slater, N. J. (2021). Rising To The Challenge: The world is heading for hydrogen. *Dnv*, 21.
- Vafaei, N., Ribeiro, R. A., & Camarinha-Matos, L. M. (2021). Assessing Normalization Techniques for Simple Additive Weighting Method. *Procedia Computer Science*, 199, 1229–1236. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.156>
- Voldsund, M., Jordal, K., & Anantharaman, R. (2016). Hydrogen production with CO₂ capture. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(9), 4969–4992. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.01.009>
- Yang, B., Guo, Z., Wang, J., Wang, J., Zhu, T., Shu, H., Qiu, G., Chen, J., & Zhang, J. (2021). Solid oxide fuel cell systems fault diagnosis: Critical summarization, classification, and perspectives. *Journal of Energy Storage*, 34(November 2020), 102153. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102153>