



Literature Review Inovasi, Analisis Kinerja dan Prospek Sel Bahan Bakar Untuk Aplikasi Maritim di Indonesia

**Eka Cahya Muliawati¹, Adrian Felix Fauzi Rianto^{2*}, Andhika Darmana Salado³
Danied Rifan Firmansach⁴, Gasta Rahmadhan⁵, Diajeng Pramesti Widodo⁶**

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya,
Surabaya, Indonesia

^{2,3,4,5,6}Program Studi Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya,
Surabaya, Indonesia

Email: ekacahya@itats.ac.id¹, drianfelix010@gmail.com², darmanasalado88@gmail.com³, daniedrifan51@gmail.com⁴,
rahmadhangasta2@gmail.com⁵, diaprimestipiw868@gmail.com⁶

Abstrak

Teknologi dan inovasi sel bahan bakar memiliki peran penting dalam mendukung transisi energi bersih di sektor maritim. Dengan efisiensi tinggi dan emisi rendah, teknologi sel bahan bakar seperti *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) menjadi alternatif potensial pengganti mesin berbahan bakar fosil pada kapal. Kajian ini meninjau perkembangan teknologi PEMFC melalui analisis terhadap lebih dari 19 jurnal ilmiah dari tahun 2019 hingga 2023, mencakup aspek material membran, katalis, serta implementasinya di Indonesia. Meskipun memiliki potensi besar, terdapat beberapa tantangan yang masih perlu diatasi, seperti biaya produksi yang tinggi, degradasi material, dan keterbatasan infrastruktur hidrogen. Dengan adanya kolaborasi lintas sektor, pengembangan material yang lebih ekonomis, serta inovasi dalam sistem hybrid, implementasi sel bahan bakar dapat menjadi solusi yang berkelanjutan bagi sektor maritim di Indonesia dan dunia.

Kata Kunci: Sel Bahan Bakar; Energi Bersih; *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC); Kapal Listrik

ABSTRACT

Fuel cell technology and innovation play a crucial role in supporting the transition to clean energy in the maritime sector. With high efficiency and low emissions, fuel cell technology, such as Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), is a potential alternative to replace fossil fuel-based engines on ships. This study reviews the development of PEMFC technology by analyzing more than 19 scientific journals published between 2019 and 2023, covering membrane materials, catalysts, and their implementation in Indonesia. Despite its great potential, several challenges remain, including high production costs, material degradation, and hydrogen infrastructure limitations. Through cross-sector collaboration, the development of more cost-effective materials, and innovations in hybrid systems, fuel cell implementation can become a sustainable solution for the maritime sector in Indonesia and globally.

Keywords: Fuel Cells; Clean Energy; *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC); Electric Ships; Maritime Decarbonization

1. PENDAHULUAN

Kekhawatiran yang terus meningkat terkait perubahan iklim dan kenaikan rata-rata suhu global telah mendorong organisasi internasional, kelompok negara, dan pemerintah nasional untuk mengadopsi kebijakan guna mengurangi atau membatasi emisi Gas Rumah Kaca (GRK). Di antara

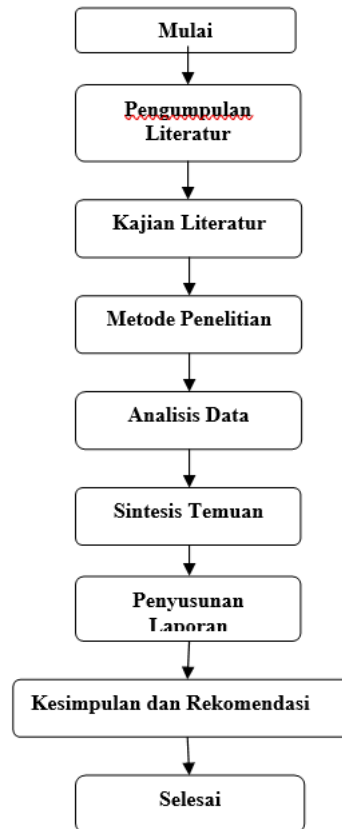
gas-gas tersebut, CO₂ memiliki dampak terbesar, karena dihasilkan dalam banyak aktivitas antropogenik, termasuk pembangkitan energi, transportasi, sektor perumahan, dan industri. Meskipun kebijakan energi telah diterapkan, emisi CO₂ terus meningkat secara dramatis di tingkat global. Sejak tahun 2000, emisi ini meningkat secara terus-menerus dari 23,2 Gt menjadi 33,0 Gt pada tahun 2021, dengan sedikit penurunan hanya pada tahun 2009 (karena krisis ekonomi) dan 2020 (karena pandemi COVID-19). Berdasarkan data IEA, produksi energi merupakan sektor penyumbang utama emisi CO₂ (14,2 Gt), diikuti oleh transportasi (8,2 Gt). Sektor transportasi maritim memiliki dampak yang signifikan, menyumbang 1 Gt/tahun atau 3% dari total emisi (Xing et al., 2021).

Studi ke-4 oleh *International Maritime Organization (IMO)* yang diterbitkan pada tahun 2020 menunjukkan tren peningkatan emisi CO₂ untuk sektor maritim, dari 962 Mt pada tahun 2012 menjadi 1.056 Mt pada tahun 2018, disebabkan oleh penggunaan bahan bakar fosil secara intensif untuk pelayaran internasional (Elkassas et al., 2023). Saat ini, 99% kapal yang beroperasi menggunakan produk bahan bakar berbasis minyak (*Heavy Fuel Oil/HFO* dan *Marine Diesel Oil/MDO*) pada mesin pembakaran internal (*Internal Combustion Engines/ICE*) besar untuk propulsi dan pembangkitan energi di atas kapal. Hal ini menyebabkan dampak besar tidak hanya dalam hal emisi CO₂, tetapi juga polutan lainnya, seperti partikel (*particulate matter*), NO_x, dan SO_x (Elkassas et al., 2023). Oleh karena itu, sejak tahun 2000, berbagai regulasi telah dibuat untuk mengurangi tingkat emisi SO_x dan NO_x yang diizinkan, dengan perhatian khusus pada pelayaran di area kendali emisi (*Emission Control Areas/ECAs*), seperti area pesisir dan pelabuhan (Elkassas et al., 2023).

Salah satu inovasi yang menjanjikan adalah sistem *fuel cell* (sel bahan bakar), yang menawarkan solusi ramah lingkungan dengan efisiensi tinggi dan emisi rendah. *Fuel cell* memiliki potensi untuk menggantikan teknologi konvensional berbasis bahan bakar fosil dalam berbagai aplikasi, termasuk transportasi, pembangkit listrik, dan perangkat elektronik portabel. Berbagai jenis *fuel cell*, seperti *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)*, *Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)*, dan *Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)*, telah dikembangkan dengan fokus pada peningkatan efisiensi, kestabilan operasional, dan pengurangan biaya produksi. Namun, tantangan teknis seperti degradasi material, kebutuhan katalis berbasis logam mulia, dan efisiensi dalam kondisi operasional tertentu masih menjadi hambatan utama. Jurnal-jurnal penelitian tentang sistem *fuel cell* memberikan wawasan mendalam mengenai perkembangan terbaru dalam desain, material, dan optimasi sistem. Oleh karena itu, penting untuk meninjau literatur yang ada untuk memahami sejauh mana teknologi ini berkembang dan bagaimana tantangan-tantangan tersebut diatasi. Melalui tinjauan ini, kita dapat mengevaluasi kontribusi ilmiah dan potensi aplikasi nyata dari penelitian yang telah dilakukan, serta

mengidentifikasi peluang untuk penelitian lebih lanjut dalam mendorong implementasi teknologi *fuel cell* secara luas.

2. METODE



Gambar 1. Alur Penelitian

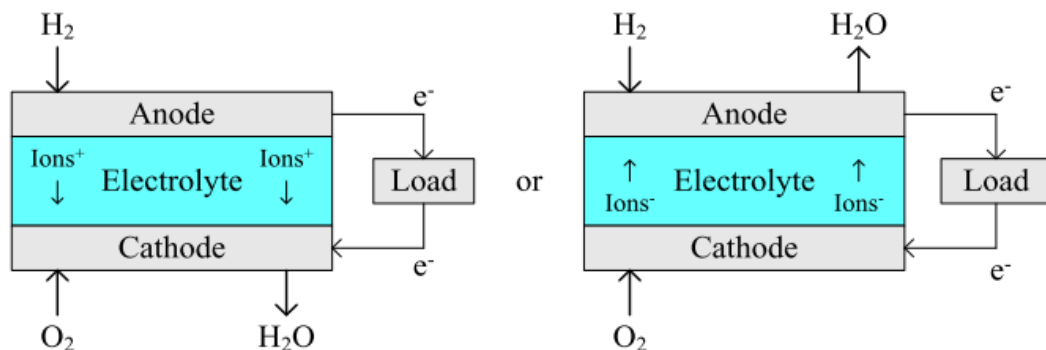
Gambar 1 menampilkan alur penelitian ini. Penulisan ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode tinjauan pustaka yang komprehensif. Langkah-langkah penulisan ini dimulai dengan pengumpulan literatur dari berbagai sumber akademik seperti ScienceDirect, SpringerLink, Scopus, dan Google Scholar, menggunakan kata kunci seperti *Proton Exchange Membrane Fuel Cells* (PEMFC), teknologi sel bahan bakar, efisiensi energi, kebijakan energi Indonesia, dan pengembangan pasar sel bahan bakar di Indonesia. Literatur yang dipilih berfokus pada perkembangan teknologi PEMFC, serta kebijakan pemerintah yang mendukung implementasi sel bahan bakar. Analisis data dilakukan untuk mengidentifikasi tren teknologi, tantangan, serta potensi aplikasi PEMFC di Indonesia. Hasil tinjauan kritis membandingkan aplikasi teknologi ini di berbagai negara untuk menarik kesimpulan yang relevan dengan kondisi Indonesia, dengan fokus pada aspek teknis (seperti efisiensi, daya tahan, dan material), ekonomi (biaya produksi dan distribusi), serta kebijakan yang mendukung

pemanfaatan PEMFC di sektor energi dan transportasi. Kesimpulan dan rekomendasi penelitian ini akan memberikan gambaran tentang strategi yang dapat diadopsi oleh pemerintah dan sektor swasta untuk pengembangan dan pemanfaatan teknologi ini di Indonesia secara optimal.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Tipe Sel Bahan Bakar

Sebuah sel bahan bakar terdiri dari anoda, katoda, dan elektrolit, yang mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi listrik melalui reaksi elektrokimia. Sebuah diagram skematik dasar dari sel bahan bakar hidrogen ditunjukkan dalam Gambar 2, di mana dua ilustrasi menggambarkan karakteristik transfer ion yang berbeda di seluruh elektrolit tergantung pada jenis sel bahan bakar. Hanya potensial listrik yang sangat kecil, sekitar 0,7 volt (V), yang dihasilkan oleh satu sel bahan bakar individu. Oleh karena itu, sel-sel disusun secara seri untuk menciptakan tegangan yang cukup sesuai dengan kebutuhan aplikasi tertentu, yang menghasilkan apa yang disebut sebagai tumpukan sel bahan bakar (*fuel cell stack*).



Gambar 2. Basic Diagram Sel Bahan Bakar (Thangarasu & Oh, 2022)

Fuel cell memiliki beberapa keunggulan utama. Efisiensinya tinggi, berkisar antara 40-60%, lebih baik dibandingkan mesin pembakaran internal. Teknologi ini juga ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca jika menggunakan hidrogen murni. Selain itu, *fuel cell* beroperasi dengan tingkat kebisingan rendah, sehingga cocok untuk aplikasi portabel dan transportasi. Beberapa jenis *fuel cell*, seperti *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC) dan *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC), bahkan dapat menggunakan bahan bakar alternatif seperti gas alam atau metanol, yang memperluas fleksibilitas penggunaannya.

Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC) adalah sel bahan bakar berbasis elektrolit polimer cair yang mengangkut ion hidrogen dengan bantuan air cair di dalam komponennya. Komponen utama PEMFC meliputi *Membrane Electrode Assembly* (MEA) yang terdiri dari *Polymer Electrolyte Membrane* (PEM), lapisan katalis, dan lapisan difusi gas, serta gasket untuk penyegelan dan pelat *bipolar* untuk merakit sel tunggal menjadi tumpukan. *Hidrogen* di sisi anoda dioksidasi menjadi proton dan elektron, dengan proton melewati PEM menuju katoda dan elektron melalui MEA ke katoda. Di katoda, oksigen direduksi, menghasilkan air sebagai produk emisi tunggal. Dengan efisiensi tinggi dan emisi nol, PEMFC menjanjikan untuk dekarbonisasi transportasi, beroperasi pada suhu rendah (60–80 °C) dengan fleksibilitas operasional tinggi (Thangarasu & Oh, 2022).

Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) adalah sel bahan bakar dengan suhu operasi tertinggi, sekitar 500–1000°C, yang mencapai efisiensi 50–60% dalam konversi bahan bakar menjadi energi listrik (Xing et al., 2021). Suhu tinggi ini memungkinkan SOFC mendukung sistem hibrida dengan turbin gas (GT) dan *aplikasi Combined Heat and Power* (CHP), menghasilkan efisiensi tinggi bahkan pada beban parsial dengan emisi rendah. Menggunakan elektrolit keramik padat seperti zirkonium oksida yang distabilkan itrium, SOFC memanfaatkan oksigen.

Tabel 1. Analisis Perbandingan *Fuel Cell* Melalui Visualisasi dan Studi Kasus

Jenis Sel Bahan Bakar	Elektrolit	Suhu Operasi (°C)	Bahan Bakar	Efisiensi (%)	Power Density (W/cm ²)	Referensi
PEMFC	Membran elektrolit polimer	60-100	Hidrogen	Hingga 60	Hingga 4	(Thangarasu & Oh, 2022)
SOFC	Elektrolit keramik	500-1000	Hidrogen, gas alam, biogas	Hingga 60	Hingga 1,5	(Elkafas et al., 2023)
AFC	Elektrolit alkali	70-90	Hidrogen	Hingga 70	Hingga 0,5	(Thangarasu & Oh, 2022)

Berdasarkan Tabel 1, PEMFC (*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*) merupakan pilihan yang sangat cocok untuk aplikasi kapal berdasarkan karakteristik operasionalnya yang unggul dibandingkan jenis sel bahan bakar lainnya. Pertama, suhu operasinya yang relatif rendah (60-100°C) mempermudah manajemen termal dan memungkinkan integrasi sistem

pendingin yang lebih sederhana serta efisien dibandingkan SOFC, yang membutuhkan suhu operasi hingga 1000°C. Sistem dengan suhu rendah ini juga lebih aman untuk digunakan dalam lingkungan kapal yang memerlukan stabilitas operasional tinggi. Kedua, PEMFC memiliki densitas daya yang tinggi, mencapai 4 W/cm², yang memungkinkan desain sistem yang lebih kompak, suatu faktor penting dalam optimalisasi ruang pada kapal modern. Sebagai perbandingan, AFC dan SOFC masing-masing hanya memiliki densitas daya hingga 0,5 W/cm² dan 1,5 W/cm², menjadikan PEMFC sebagai alternatif yang lebih efisien dan fleksibel untuk aplikasi maritim.

Selain itu, PEMFC menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar utama dengan efisiensi hingga 60%, sebanding dengan SOFC dan sedikit lebih rendah dari AFC. Namun, efisiensi ini cukup memadai mengingat keunggulan densitas daya dan operasionalnya. Keuntungan tambahan adalah waktu *start-up* yang cepat dan fleksibilitas operasi, yang merupakan keharusan dalam lingkungan laut yang dinamis. Kekurangan seperti ketergantungan pada hidrogen murni dapat diatasi dengan pengembangan infrastruktur kapal untuk penyimpanan dan distribusi hidrogen yang aman. Berdasarkan data ini, kombinasi keunggulan operasional, efisiensi energi, dan desain yang lebih praktis menjadikan PEMFC pilihan yang lebih masuk akal dibandingkan SOFC dan AFC dalam aplikasi kelautan (Thangarasu & Oh, 2022).

Tabel 2. Jenis PEMFC Berdasarkan PEM nya

Tipe PEMFC	Bahan Dasar Membran	Konduktivitas Proton (S/cm)	Suhu Operasi (°C)	Masa Pakai (Lifetime)	Power Density (W/cm ²)	Referensi
Nafion	Polimer fluorokarbon	0.1-0.2	60-80	> 20,000 jam	0.4-1.0	(Zhou, Y., Wang, X., Zhang, W., & Chen, 2020)
Aquivion	Polimer fluorosulfonat	0.08-0.12	60-90	5,000-10,000 jam	0.5-0.8	(Jung, B., Kim, D., & Lee, 2019)
sPEEK	Sulfonated polyether ketone	0.05-0.1	80-120	2,000-5,000 jam	0.3-0.6	(Kim, S., Lee, H., & Park, 2021)
sPSU	Sulfonated polysulfone	0.02-0.06	120-180	5,000-10,000 jam	0.4-0.7	(Lee, J., Park, D., & Kim, 2020)
PBI-based	Polibenzimidazol (PBI)	0.02-0.06	120-180	5,000-10,000 jam	0.4-0.7	(Peighambardoust, S., Rowshanzamir, S., & Amjadi, 2022)
SiO ₂ -Nafion	Nafion + silica	0.12-0.18	60-90	8,000-15,000 jam	0.5-0.9	(Xu, Y., Liu, X., & Zhang, 2021)

Tipe PEMFC	Bahan Dasar Membran	Konduktivitas Proton (S/cm)	Suhu Operasi (°C)	Masa Pakai (Lifetime)	Power Density (W/cm ²)	Referensi
Composite	Nafion + penguat anorganik	0.08-0.14	80-100	5,000-10,000 jam	0.4-0.8	(Guo, L., Sun, H., & Li, 2020)
PFSA	Perfluorosulfonic acid	0.1-0.2	60-80	> 20,000 jam	0.5-1.0	(Liu, W., Zhao, Y., & Sun, 2020)
sPI	Sulfonated polyimide	0.04-0.08	90-120	2,000-5,000 jam	0.3-0.5	(Kim, Y., Choi, S., & Kang, 2020)
CS-based	Chitosan berbasis polimer	0.02-0.06	50-90	1,000-3,000 jam	0.2-0.4	(Shao, J., Zhang, L., & Yu, n.d.)
Anion Exchange	Polimer berbasis AEM	0.05-0.12	50-80	1,000-5,000 jam	0.3-0.6	(Zhang, H., Wu, Y., & Li, 2022)
Graphene-enhanced	Nafion + graphene	0.15-0.25	70-100	10,000-15,000 jam	0.7-1.2	(Wang, T., Li, X., & Zhou, 2021)
Hybrid	Kombinasi Nafion dan PBI	0.06-0.12	80-160	5,000-10,000 jam	0.4-0.8	(Park, J., Kim, Y., & Choi, 2020)
Bio-based	Polimer alami + sulfonasi	0.02-0.05	40-80	500-2,000 jam	0.1-0.3	(Chen, Z., Wang, Y., & Liu, 2022)
Hydrocarbon-based	Polimer hidrokarbon	0.05-0.1	80-120	5,000-8,000 jam	0.3-0.6	(Huang, Q., Wang, R., & Zhang, 2020)

3.2 Tipe PEMFC yang Berpotensi Untuk Aplikasi Kapal

Tabel 2 memberikan informasi rinci tentang berbagai tipe membran *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC), termasuk konduktivitas proton, suhu operasi, masa pakai, dan densitas daya. Data ini menjadi dasar penting dalam memilih membran yang sesuai untuk aplikasi kapal berdasarkan kebutuhan spesifik seperti efisiensi, durabilitas, dan lingkungan operasi.

Membran berbasis Nafion adalah jenis yang paling umum digunakan dalam industri karena konduktivitas protonnya yang tinggi (0.1–0.2 S/cm) dan stabilitas kimia yang baik. Nafion bekerja optimal pada suhu rendah hingga sedang (60–80°C), membuatnya cocok untuk aplikasi kapal di mana kontrol suhu sistem diperlukan untuk efisiensi operasi. Nafion juga memiliki umur operasional yang panjang (>20,000 jam) dan kemampuan menghasilkan daya tinggi hingga 1.0 W/cm². Keandalan Nafion telah terbukti dalam aplikasi kendaraan listrik dan sistem portabel, menjadikannya solusi yang sangat sesuai untuk kapal dengan

kebutuhan daya besar dan operasional terus-menerus. Tantangannya adalah biaya tinggi, terutama terkait dengan bahan fluoropolimer.

Membran berbasis Polibenzimidazol (PBI) menawarkan keunggulan besar karena dapat beroperasi pada suhu tinggi (120–180°C), yang memungkinkan sistem untuk bekerja tanpa kebutuhan humidifikasi eksternal. Keunggulan ini mengurangi kompleksitas desain sistem, sehingga cocok untuk kapal yang beroperasi di lingkungan yang menuntut. PBI juga mampu bekerja dengan bahan bakar hidrogen yang terkontaminasi karbon monoksida, menjadikannya fleksibel dalam pilihan bahan bakar. Meskipun memiliki masa pakai yang lebih pendek dibandingkan Nafion (5,000–10,000 jam), tipe ini cocok untuk aplikasi kapal jarak menengah atau jangka waktu operasi yang lebih terbatas.

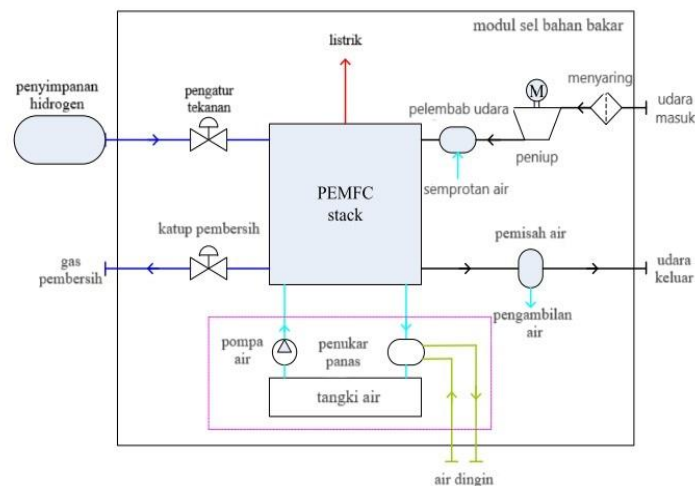
Graphene-enhanced PEMFC mengintegrasikan graphene ke dalam membran Nafion atau membran polimer lainnya, yang meningkatkan konduktivitas proton (hingga 0.25 S/cm) dan daya tahan mekanik. Dengan densitas daya tertinggi hingga 1.2 W/cm², membran ini sangat ideal untuk kapal yang membutuhkan output daya tinggi dalam ruang terbatas. Selain itu, graphene meningkatkan ketahanan terhadap degradasi termal dan kimia, memungkinkan operasi pada suhu sedang (70–100°C) dengan waktu operasional mencapai 15,000 jam. Inovasi ini menjadikannya solusi berpotensi tinggi untuk kapal modern yang membutuhkan efisiensi energi maksimal dengan teknologi terkini.

3.3 Modul PEMFC

Sistem modul *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) terdiri dari stack, unit pengiriman hidrogen, unit pengiriman udara, dan unit pendingin. Sebuah diagram skematik dari modul PEMFC ditunjukkan pada Gambar 3. Hidrogen disimpan dalam tangki penyimpanan dalam keadaan cair kriogenik atau dalam keadaan terkompresi dengan tekanan 350–700 bar. Tekanan hidrogen diatur oleh regulator tekanan. Setelah melewati stack sel bahan bakar, katup pembersihan pada saluran keluar ruang anoda dibuka secara berkala untuk mencegah tegangan sel turun di bawah batas tertentu. Sebuah humidifier (alat pelembab) dan pemisah air dapat dipasang sebelum regulator tekanan dan setelah katup pembersihan untuk melembabkan hidrogen serta menghilangkan air dari gas pembersihan. Selain itu, komponen tambahan antara saluran masuk dan keluar bahan bakar pada stack dapat digunakan untuk sirkulasi ulang hydrogen (Xing et al., 2021).

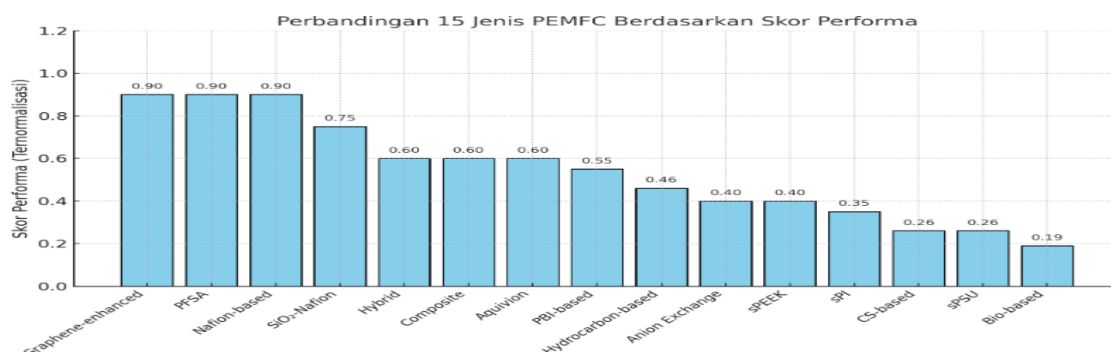
Udara yang disaring diberi tekanan oleh blower udara dan kemudian dilembabkan untuk menjaga kinerja membran polimer di dalam sel bahan bakar. Untuk aplikasi maritim, degradasi membran polimer dapat terjadi akibat katoda yang terpapar kondisi udara laut. Oleh

karena itu, pra-pengolahan udara masuk untuk menghilangkan uap natrium klorida mungkin diperlukan. Blower udara tidak hanya menjaga aliran udara yang cukup ke stack, tetapi juga mengurangi ukuran stack dengan meningkatkan densitas udara masuk dan mempermudah proses pelembapan dengan meningkatkan suhu udara masuk. Air pada udara sisa dipisahkan oleh kondensor sebelum dikeluarkan ke luar modul. Panas yang dihasilkan oleh stack dihilangkan oleh modul pendingin, yang terdiri dari tangki air, pompa air, dan penukar panas. Penukar panas mentransfer panas ke air dingin atau air laut di luar kapal. Suhu air pendingin di saluran masuk stack dikontrol dengan mengatur aliran air dingin, sedangkan suhu di saluran keluar stack diatur dengan mengontrol aliran air pendingin melalui stack (Xing et al., 2021).



Gambar 3. Basic Modul PEMFC(Xing et al., 2021)

3.4 Prospek Masa Depan Untuk Aplikasi Maritim



Gambar 4. Hasil Analisa Tabel 2

Sel bahan bakar menawarkan solusi yang efisien dan ramah lingkungan untuk mengatasi tantangan emisi di sektor maritim. *High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells* (HT-PEMFC) memiliki keunggulan operasional pada suhu tinggi (120–200 °C),

memungkinkan toleransi terhadap karbon monoksida (CO) dan penggunaan bahan bakar seperti metanol atau amonia, yang lebih murah dan mudah diakses. Keunggulan ini sangat relevan untuk kapal yang beroperasi di wilayah dengan keterbatasan pasokan bahan bakar murni. Inovasi material membran, seperti grafena dan poli-benzimidazol (PBI), serta pengembangan katalis berbasis non-logam, menjanjikan peningkatan efisiensi dan penurunan biaya produksi. Dukungan regulasi, integrasi dengan hidrogen hijau, dan penelitian lintas sektor menjadi faktor kunci dalam mendorong adopsi teknologi ini. Dengan prospek kontribusi terhadap dekarbonisasi global, *fuel cell* berpotensi menjadi tulang punggung transisi energi di industri maritim.

Inovasi lebih lanjut dalam integrasi sistem *fuel cell* dengan teknologi *hybrid*, seperti kombinasi dengan turbin gas atau baterai lithium-ion, dapat meningkatkan efisiensi operasional kapal. Sistem hybrid ini memungkinkan optimalisasi penggunaan energi selama pelayaran dan memanfaatkan kelebihan energi untuk aplikasi lain di kapal. Selain itu, pengembangan sistem otomatisasi untuk pemantauan dan manajemen *fuel cell* di kapal dapat meningkatkan efisiensi dan mengurangi kebutuhan pemeliharaan, yang menjadi tantangan utama dalam operasional kapal modern.

3.5 Ekspektasi Untuk Masa Depan Kapal Berbasis Sel Bahan Bakar (FCS)

Masa depan kapal berbasis sel bahan bakar (*Fuel Cell Ships* atau FCS) sangat menjanjikan dengan berbagai keunggulan teknologi seperti efisiensi tinggi, operasi senyap, dan emisi nol jika menggunakan hidrogen murni. Aplikasi HT-PEMFC memungkinkan kapal beroperasi dengan fleksibilitas bahan bakar yang lebih besar, mengurangi ketergantungan pada infrastruktur hidrogen murni. Kapal berbasis *fuel cell* diharapkan menjadi standar baru dalam transportasi laut, terutama untuk memenuhi regulasi dekarbonisasi global. Integrasi teknologi ini dengan energi terbarukan, seperti panel surya dan turbin angin, juga membuka peluang untuk operasi kapal yang sepenuhnya bebas emisi. Namun, keberhasilan ini memerlukan investasi besar dalam penelitian dan pengembangan, dukungan kebijakan pemerintah, serta kemitraan antara industri dan akademisi.

Dengan meningkatnya permintaan akan solusi energi bersih, perusahaan maritim global telah mulai mengadopsi teknologi *fuel cell* pada kapal prototipe. Contohnya adalah kapal Zero Emission Vessel yang berhasil menunjukkan efisiensi operasional tinggi di berbagai kondisi laut. Keberhasilan adopsi ini dapat membuka jalan bagi pengembangan lebih banyak kapal komersial berbasis *fuel cell*. Dalam beberapa dekade mendatang, FCS

diharapkan dapat memainkan peran penting dalam rantai logistik global, menggantikan kapal berbahan bakar fosil secara bertahap (Lyu & Dinavahi, 2023).

3.6 Tantangan dan Hambatan dalam Pengembangan PEMFC Untuk Kapal

Pengembangan PEMFC untuk kapal menghadapi sejumlah tantangan teknis, ekonomi, dan lingkungan. Secara teknis, degradasi material membran seperti Nafion dalam kondisi laut yang korosif menjadi perhatian utama, sementara material alternatif seperti PBI masih memiliki biaya tinggi. Katalis berbasis platinum menghadapi tantangan kelangkaan dan biaya, meskipun penelitian untuk katalis non-logam menjanjikan tetapi belum mencapai efisiensi yang sebanding. Dari sisi ekonomi, biaya produksi dan integrasi sistem *fuel cell* jauh lebih mahal dibandingkan mesin diesel konvensional. Keterbatasan infrastruktur pengisian bahan bakar hidrogen serta standar regulasi global yang belum seragam juga menjadi hambatan signifikan. Selain itu, kondisi lingkungan laut yang dinamis menuntut inovasi material untuk memastikan daya tahan dan kinerja jangka panjang. Untuk mengatasi tantangan ini, dibutuhkan kolaborasi lintas sektor, pengembangan kebijakan yang mendukung, dan investasi dalam teknologi yang lebih hemat biaya dan berkelanjutan.

Di sisi teknis, desain penyimpanan hidrogen yang aman dan efisien menjadi tantangan utama, terutama untuk kapal jarak jauh yang membutuhkan kapasitas energi besar. Penelitian tentang penyimpanan berbasis material, seperti hidrid logam atau karbon aktif, perlu didorong untuk menciptakan sistem yang lebih ringan dan hemat ruang. Selain itu, implementasi *fuel cell* di sektor maritim juga memerlukan pelatihan teknis khusus bagi operator dan teknisi kapal untuk memastikan pengoperasian yang aman dan efisien di lapangan.

4. PENUTUP

Simpulan dan Saran

Teknologi sel bahan bakar (*fuel cell*) menawarkan peluang besar untuk mendukung transisi energi bersih di sektor maritim. Dengan efisiensi tinggi, emisi rendah, dan fleksibilitas bahan bakar, khususnya pada *High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells* (HT-PEMFC), teknologi ini memiliki potensi untuk menggantikan mesin berbahan bakar fosil secara bertahap. Integrasi dengan energi terbarukan dan dukungan kebijakan dekarbonisasi global semakin memperkuat relevansi *fuel cell* sebagai solusi energi yang berkelanjutan. Namun, berbagai tantangan, seperti biaya tinggi, degradasi material membran, keterbatasan infrastruktur, dan kebutuhan pengembangan katalis non-logam, masih

harus diatasi untuk memungkinkan adopsi yang lebih luas. Melalui kolaborasi lintas sektor, inovasi material yang lebih terjangkau, dan pengembangan teknologi hybrid, kapal berbasis sel bahan bakar dapat menjadi tulang punggung transportasi laut di masa depan. Dengan strategi yang tepat, implementasi teknologi ini tidak hanya membantu mencapai target pengurangan emisi karbon, tetapi juga mendorong keberlanjutan sektor maritim di Indonesia dan dunia. Untuk mendukung penerapan teknologi *fuel cell* di sektor maritim, diperlukan pengembangan infrastruktur hidrogen yang mencakup produksi, penyimpanan, dan distribusi di pelabuhan utama agar teknologi ini dapat diadopsi secara luas. Selain itu, penelitian lebih lanjut tentang material membran yang lebih tahan terhadap lingkungan laut yang korosif dan katalis berbasis non-logam perlu dilakukan guna mengurangi biaya produksi dan meningkatkan efisiensi sistem. Integrasi *fuel cell* dengan sumber energi terbarukan, seperti tenaga surya dan angin, juga dapat menjadi solusi untuk meningkatkan efisiensi operasional kapal dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar hidrogen murni. Optimasi sistem, termasuk peningkatan manajemen termal dan strategi distribusi daya, sangat penting untuk meningkatkan performa serta masa pakai *fuel cell* dalam aplikasi maritim. Selain aspek teknis, dukungan regulasi dan kebijakan pemerintah yang memberikan insentif bagi perusahaan maritim yang mengadopsi teknologi ini akan mempercepat implementasinya dalam skala yang lebih luas. Terakhir, pelatihan dan sertifikasi bagi teknisi dan operator kapal diperlukan untuk memastikan pengoperasian dan pemeliharaan sistem *fuel cell* yang aman dan efisien, sehingga memungkinkan teknologi ini menjadi solusi utama dalam mendukung dekarbonisasi sektor maritim di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, Z., Wang, Y., & Liu, F. (2022). Bio-based membranes for sustainable fuel cell technologies. *Journal of Power Sources*, 501, 229832. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.229832>
- Elkasfas, A. G., Rivarolo, M., Gadducci, E., Magistri, L., & Massardo, A. (2023). Fuel Cell Systems for Maritime: A Review of Research and Perspectives. *Processes*, 11(97).
- Guo, L., Sun, H., & Li, X. (2020). The role of inorganic reinforcements in composite PEMFC membranes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 15896–15908. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.032>
- Huang, Q., Wang, R., & Zhang, Y. (2020). Hydrocarbon-based membranes for high-efficiency PEMFCs. *Energy*, 211, 118246.
- Jung, B., Kim, D., & Lee, J. (2019). Aquivion membranes and their performance in fuel cells.

- Journal of Membrane Science*, 585, 1170. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117056>
- Kim, S., Lee, H., & Park, J. (2021). Development of sPEEK membranes for high-temperature fuel cells. *Energy*, 220, 117127.
- Kim, Y., Choi, S., & Kang, J. (2020). Sulfonated polyimide membranes for PEMFC applications. *Journal of Membrane Science*, 599, 118418. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118418>
- Lee, J., Park, D., & Kim, Y. (2020). Performance of sulfonated polysulfone membranes under high-temperature conditions. *Journal of Power Sources*, 476, 229315. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229315>
- Liu, W., Zhao, Y., & Sun, J. (2020). Perfluorosulfonic acid membranes for fuel cell applications. *Journal of Power Sources*, 470, 229167.
- Lyu, C., & Dinavahi, V. (2023). Zero-Emission Marine Vessels: Multidomain Modeling and Real-Time Hardware-in-the-Loop Emulation on Adaptive Compute Acceleration Platform: Zero-emission marine vessels: modeling and real-time emulation. *IEEE Electrification Magazine*, 11(4), 54–63. <https://doi.org/10.1109/MELE.2023.3320509>
- Park, J., Kim, Y., & Choi, D. (2020). Hybrid membranes combining Nafion and PBI for PEMFC applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 18675–18688. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.032>
- Peighambaroust, S., Rowshanzamir, S., & Amjadi, M. (2022). Recent advances in PBI-based membranes for PEMFCs. *International Journal of Hydrogen Energy*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 34567–34582. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.125>
- Shao, J., Zhang, L., & Yu, F. (n.d.). Development of chitosan-based membranes for low-cost PEMFCs. *Journal of Power Sources*, 491, 229822.
- Thangarasu, S., & Oh, T. H. (2022). Recent Developments on Bioinspired Cellulose Containing Polymer Nanocomposite Cation and Anion Exchange Membranes for Fuel Cells (PEMFC and AFC). *Polymers*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/polym14235248>
- Wang, T., Li, X., & Zhou, Y. (2021). Graphene-enhanced Nafion membranes for high-performance PEMFCs. *Carbon*, 177, 556–569.
- Xing, H., Stuart, C., Spence, S., & Chen, H. (2021). Fuel cell power systems for maritime applications: Progress and perspectives. *Sustainability (Switzerland)*, 13(3), 1–34. <https://doi.org/10.3390/su13031213>
- Xu, Y., Liu, X., & Zhang, Z. (2021). SiO₂-Nafion composites for enhanced fuel cell performance. *Applied Energy*, 295, 116456.
- Zhang, H., Wu, Y., & Li, J. (2022). Advances in anion exchange membranes for fuel cell. *Journal of Membrane Science*, 641, 118856.

Zhou, Y., Wang, X., Zhang, W., & Chen, G. (2020). Advances in Nafion-based membranes for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Source*, 471, 229267. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229267>