

# Sistem Instrumentasi Dan Kontrol Keselamatan Pada Kapal Bertenaga Hidrogen: Tinjauan Literatur Sistematis, Implementasi Global, Peluang Pengembangan Di Indonesia

<sup>1</sup>Rizka Noor Miftakhul Ulum, <sup>2</sup>Irsat Surya Sekti,  
<sup>3</sup>Anang Budhi Nugroho, <sup>4</sup>Rifki Arya Wiguna, <sup>5</sup>M. Edi Pujianto  
<sup>1,2,3,4</sup>Politeknik Maritim Negeri Indonesia, <sup>5</sup>Universitas Muhammadiyah Semarang  
e-mail : <sup>1</sup>rizkanoormu27@polimarin.ac.id, <sup>2</sup>irsat.surya@polimarin.ac.id, <sup>3</sup>anang.budhi1990@polimarin.ac.id,  
<sup>4</sup>rifki.arya@polimarin.ac.id, <sup>5</sup>edipujianto@unimus.ac.id

\*Corresponding author: <sup>1</sup>rizkanoormu27@polimarin.ac.id

## ABSTRAK

Perkembangan teknologi energi bersih mendorong pemanfaatan hidrogen sebagai sumber energi alternatif pada sektor maritim. Kapal bertenaga hidrogen umumnya menggunakan Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) yang mengubah energi kimia hidrogen menjadi energi listrik untuk menyuplai sistem propulsi dan beban kelistrikan kapal. Meskipun memiliki keunggulan berupa emisi yang rendah dan efisiensi yang tinggi, penggunaan hidrogen menghadirkan tantangan keselamatan karena sifatnya yang mudah terbakar dan sulit dideteksi tanpa bantuan sistem elektronik. Oleh karena itu, penerapan Sistem Instrumentasi dan Kontrol Keselamatan (Safety Instrumentation and Control System–SICS) menjadi komponen penting dalam menjamin keamanan operasi kapal bertenaga hidrogen. Penelitian ini menggunakan metode studi literatur dengan menganalisis berbagai jurnal dan publikasi yang berkaitan dengan sensor hidrogen, sistem monitoring, akuisisi data, Internet of Things (IoT), sistem kendali, teknologi fuel cell, serta aspek keselamatan dan regulasi maritim. Implementasi kapal bertenaga hidrogen juga memerlukan perhatian terhadap sistem penyimpanan bahan bakar, ventilasi ruang tertutup, mitigasi risiko kebocoran, serta kepatuhan terhadap standar keselamatan yang ditetapkan oleh International Maritime Organization (IMO). Penerapan sistem instrumentasi yang andal, didukung desain keselamatan yang memadai dan regulasi yang sesuai, dapat meningkatkan keselamatan, keandalan, dan efisiensi operasional kapal bertenaga hidrogen. Pengembangan kapal hidrogen memerlukan pendekatan multidisiplin yang mengintegrasikan aspek teknologi, keselamatan, dan regulasi.

**Kata kunci:** SCADA, ESD, kontrol keselamatan, sel bahan bakar PEMFC, SIL

## ABSTRACT

*he development of clean energy technologies has encouraged the utilization of hydrogen as an alternative energy source in the maritime sector. Hydrogen-powered vessels commonly employ Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) to convert the chemical energy of hydrogen into electrical energy for propulsion systems and onboard electrical loads. Despite their advantages of low emissions and high efficiency, hydrogen applications present significant safety challenges due to the fuel's flammability and the difficulty of detecting leaks without electronic monitoring systems. Therefore, the implementation of a Safety Instrumentation and Control System (SICS) has become an essential component in ensuring the safe operation of hydrogen-powered ships. This study employs a literature review approach by analyzing scientific publications related to hydrogen sensors, monitoring systems, data acquisition, the Internet of Things (IoT), control systems, fuel cell technology, as well as maritime safety and regulatory aspects. The implementation of hydrogen-powered vessels also requires careful consideration of fuel storage systems, enclosed-space ventilation, leak risk mitigation, and compliance with safety standards established by the International Maritime Organization (IMO). The application of reliable instrumentation systems, supported by appropriate safety-oriented designs and regulatory frameworks, can enhance the safety, reliability, and operational efficiency of hydrogen-powered ships. The development of hydrogen-powered vessels therefore requires a multidisciplinary approach that integrates technological, safety, and regulation.*

**Keywords:** SCADA, ESD, safety control, PEMFC fuel cell, SIL

## 1. PENDAHULUAN

Sektor transportasi laut memainkan peran vital dalam perdagangan global, mengangkut lebih dari 80% volume barang-barang yang diperdagangkan secara internasional [1]. Namun, di balik perannya yang krusial, industri pelayaran turut menyumbang sekitar 2,89% dari total emisi gas rumah kaca (GRK) global, setara dengan 1.056 juta ton CO<sub>2</sub> atau 1.076 juta ton CO<sub>2</sub>e pada tahun 2018 [2]. Tekanan regulasi internasional yang semakin ketat mendorong industri ini untuk mencari solusi bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan.

Di antara berbagai kandidat bahan bakar alternatif, hidrogen muncul sebagai pilihan menjanjikan karena nilai kalor per satuan massa (*lower heating value/LHV*) tertinggi di antara semua bahan bakar yakni 120 MJ/kg, hampir tiga kali lipat diesel (42,7 MJ/kg), dan menghasilkan nol emisi karbon di titik penggunaan [3]. Teknologi Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) memiliki potensi sebagai sumber energi listrik yang ramah lingkungan karena mampu mengonversi hidrogen menjadi energi listrik melalui proses elektrokimia. Kinerja sistem PEM Fuel Cell dipengaruhi oleh konsentrasi elektrolit dan arus listrik pada proses produksi hidrogen, yang berpengaruh terhadap daya listrik yang dihasilkan [4].

Hidrogen memiliki potensi besar sebagai sumber energi alternatif untuk mendukung sistem tenaga kapal yang lebih ramah lingkungan. Pemanfaatan Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) memungkinkan konversi energi hidrogen menjadi energi listrik secara efisien dengan emisi yang sangat rendah [5], [6]. Seiring meningkatnya penggunaan teknologi fuel cell, diperlukan sistem instrumentasi, monitoring, dan kendali yang andal untuk memastikan kinerja sistem tetap optimal, aman, dan sesuai dengan kebutuhan operasional kapal modern.

Sistem instrumentasi dan kontrol keselamatan pada kapal hidrogen mencakup beberapa lapisan fungsi yang saling terintegrasi: (1) deteksi dini kebocoran gas hidrogen menggunakan sensor elektrokimia berbasis *solid-state polymer* dengan elemen penginderaan Pt/C dan membran Nafion yang mampu mendeteksi konsentrasi H<sub>2</sub> secara akurat pada suhu ruang; [2] pemantauan parameter kritis seperti tekanan tangki, suhu kriogenik, dan konsentrasi gas secara *real-time* melalui platform digital terintegrasi guna meningkatkan keselamatan fasilitas hidrogen; [3] identifikasi bahaya (*hazard identification*) terhadap bahan bakar berbasis hidrogen di atas kapal yang mencakup evaluasi sifat kimia terkait keselamatan dan cakupan kerangka keselamatan IMO yang berlaku; serta perancangan sistem pemutusan darurat (*Emergency Shutdown System/ESD*) berdasarkan penentuan *Safety Integrity Level (SIL)* sesuai standar IEC 61511, menggunakan metode HAZOP dan *Layer of Protection Analysis (LOPA)* pada sistem propulsi sel bahan bakar maritim [7–9]. Keseluruhan sistem ini merupakan domain inti Teknik Elektro, khususnya pada subdisiplin instrumentasi, sistem kontrol, dan elektronika daya.

Sistem instrumentasi dan kontrol memiliki peran penting dalam menjamin keselamatan operasional kapal bertenaga hidrogen melalui pemantauan parameter kelistrikan, kondisi sistem energi, serta deteksi dini terhadap potensi gangguan yang dapat memengaruhi kinerja sistem propulsi [10]. Perkembangan teknologi sensor, Internet of Things (IoT), dan sistem monitoring real-time memberikan peluang untuk meningkatkan keandalan serta keselamatan kapal bertenaga hidrogen, sekaligus menjadi dasar pengembangan sistem keselamatan maritim berbasis hidrogen di Indonesia [11]. Upaya dekarbonisasi armada kapal feri antarpulau dan kapal logistik menjadi agenda strategis yang membutuhkan penguasaan teknologi sistem keselamatan hidrogen secara komprehensif, termasuk perancangan sistem instrumentasi dan kontrol yang sesuai dengan standar IMO dan lembaga klasifikasi internasional.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Kajian ini menggunakan metode tinjauan literatur sistematis (*Systematic Literature Review/SLR*) dengan mengacu pada pedoman PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Pencarian literatur dilakukan melalui basis data Scopus, Web of Science, ScienceDirect, dan Google Scholar menggunakan kata kunci: "*hydrogen safety maritime*", "*hydrogen leak detection vessel*", "*fuel cell safety instrumentation*", "*Emergency Shutdown System hydrogen ship*", "*PEMFC safety control marine*", dan kombinasinya.

Kriteria inklusi meliputi: (a) artikel diterbitkan antara tahun 2020–2025; (b) berbahasa Inggris atau Indonesia; (c) berfokus pada aspek keselamatan, instrumentasi, dan kontrol sistem hidrogen di sektor maritim; (d) diterbitkan di jurnal terindeks atau prosiding konferensi bereputasi. Beberapa referensi seminal di luar rentang tahun tersebut — khususnya terkait sifat fisik dasar hidrogen, batas mudah terbakar, dan tinjauan teknologi sensor — tetap disertakan sebagai landasan teori yang tidak tergantikan. Dokumen institusional dari UNCTAD, IMO (termasuk Resolusi MEPC.377 dan Fourth IMO GHG Study), dan IRENA turut dijadikan referensi normatif, sementara panduan teknis lembaga klasifikasi internasional (DNV, ABS, Bureau Veritas, Korean Register, dan Lloyd's Register) dirujuk secara tidak langsung melalui literatur tinjauan yang mengompilasi persyaratan tersebut. Secara keseluruhan, sebanyak 46 sumber — terdiri atas 42 artikel jurnal dan prosiding konferensi serta 4 laporan institusional dianalisis dan mencakup empat tema utama: [1] karakteristik keselamatan dan regulasi hidrogen maritim; [2] teknologi sensor dan instrumentasi

deteksi hidrogen; [3] arsitektur sistem kontrol keselamatan meliputi ventilasi otomatis, Emergency Shutdown System (ESD), SCADA, dan *Power Management System* (PMS); serta studi kasus implementasi global pada kapal-kapal bertenaga hidrogen komersial.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemahaman mendalam terhadap sifat fisik dan kimia hidrogen merupakan fondasi utama dalam merancang sistem instrumentasi dan kontrol keselamatan kapal. Hidrogen memiliki sejumlah karakteristik yang secara fundamental berbeda dari bahan bakar konvensional dan membentuk tantangan unik bagi sistem keselamatan maritim. Titik didih hidrogen berada pada  $-252,8^{\circ}\text{C}$  pada tekanan atmosfer, menjadikannya fluida kriogenik yang memerlukan sistem penyimpanan berinsulasi vakum secara khusus [6]. Hidrogen cair ( $\text{LH}_2$ ) memiliki titik didih yang sangat rendah yakni  $-253^{\circ}\text{C}$  dan umumnya disimpan pada tekanan 0,4–1,6 MPa dalam tangki berdinding ganda yang terdiri dari dua lapisan logam yang dipisahkan oleh jaket vakum berisi material insulasi [12]. Kondisi suhu kriogenik yang ekstrem ini menuntut sistem insulasi termal yang andal, sebab estimasi konduktivitas termal efektif material insulasi pada rentang suhu kriogenik hingga 20 K merupakan parameter kritis dalam menentukan kebocoran panas (*heat leak*), mengevaluasi berbagai material insulasi, memperkirakan laju *boil-off*, serta merancang dan menskalakan tangki penyimpanan  $\text{LH}_2$  [13].

Suhu  $\text{LH}_2$  yang sangat rendah dapat menggetaskan berbagai material tangki, berpotensi menyebabkan retakan mendadak pada wadah penyimpanan [12]. Lebih jauh, kegagalan tangki penyimpanan cenderung meningkat menjadi ledakan, berdasarkan analisis terhadap database insiden hidrogen selama lima dekade terakhir (Asante-Okyere et al., 2025). Skenario paling katastrofik adalah *hydrogen boiling liquid expanding vapor explosion* (BLEVE), di mana tangki  $\text{LH}_2$  yang mengalami kegagalan pada suhu di atas titik didihnya pada tekanan atmosfer akan meledak secara katastrofik — dan bergantung pada bagaimana hidrogen bercampur dengan udara, konsekuensinya dapat mencakup bola api (*fireball*), ledakan awan uap (*vapor cloud explosion*), atau *flash fire* apabila terdapat sumber pengapian [12].

Hidrogen memiliki rentang batas mudah terbakar yang sangat lebar, yaitu 4% hingga 75% di udara [6]. Batas mudah terbakar (*flammability limits*) hidrogen jauh lebih bergantung pada kriteria pengujian dibandingkan metana ( $\text{CH}_4$ ) maupun propana ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), yang keduanya memiliki batas bawah mudah terbakar (*Lower Flammable Limit/LFL*) yang terdefinisi dengan baik, masing-masing pada rentang 5%–15% dan 2,1%–9,5% [14]. Rentang yang jauh lebih lebar ini berarti hidrogen berpotensi terbakar pada konsentrasi yang sangat rendah maupun sangat tinggi, sehingga deteksi dini hidrogen dipersyaratkan pada ambang yang sangat rendah, umumnya ditetapkan pada level 10% LFL (setara 0,4 vol%) maupun 25% LFL (setara 1,0 vol%), menjadikan sensor hidrogen yang sensitif dan andal sebagai keharusan mutlak sebelum kondisi eksplosif tercapai [15]

Dalam pengembangan kapal bertenaga hidrogen, sistem instrumentasi dan kontrol keselamatan memegang peranan penting untuk memastikan operasi yang aman, andal, dan efisien. Penelitian mengenai performa hydrogen generator untuk Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) menunjukkan bahwa pengendalian parameter produksi hidrogen sangat berpengaruh terhadap kinerja sistem energi berbasis hidrogen [16]. Selain itu, penerapan sistem pemantauan gas hidrogen berbasis Internet of Things (IoT) memungkinkan deteksi dan pengawasan konsentrasi hidrogen secara real-time sehingga potensi kebocoran dapat diidentifikasi lebih cepat [17]. Teknologi deteksi kebocoran gas yang memanfaatkan sensor dan mikrokontroler juga terbukti mampu meningkatkan tingkat keselamatan melalui pemberian peringatan dini terhadap kondisi berbahaya [18]. Di sisi lain, sistem monitoring dan akuisisi data berbasis IoT pada fuel cell memungkinkan pengawasan parameter operasional secara berkelanjutan, sehingga mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat dalam pengelolaan sistem tenaga kapal [19]. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa integrasi sensor, sistem monitoring, komunikasi data, dan teknologi IoT merupakan elemen penting dalam pengembangan sistem instrumentasi dan kontrol keselamatan pada kapal bertenaga hidrogen, serta memiliki peluang besar untuk diimplementasikan dalam mendukung transformasi maritim berkelanjutan di Indonesia. Lebih jauh, amendemen terhadap MARPOL Annex VI disetujui pada sesi MEPC ke-83 pada April 2025, memperkenalkan standar *Global Fuel Intensity* (GFI) sebagai fondasi hukum bagi implementasi target pengurangan emisi [20].

Pada level teknis, lembaga klasifikasi internasional telah menerbitkan panduan spesifik untuk sistem keselamatan kapal hidrogen. DNV melalui Bagian 6 Bab 2 mengatur instalasi sel bahan bakar dan sistem keselamatan terkait; ABS melalui dokumen *Hydrogen as Marine Fuel*; Bureau Veritas melalui NR 547 tentang sistem sel bahan bakar di kapal; Korean Register melalui panduan sistem sel bahan bakar; serta Lloyd's Register melalui *Appendix LR3* [3]. Seluruh panduan tersebut secara konsisten mensyaratkan sistem deteksi gas, ventilasi paksa, dan pemutusan darurat sebagai komponen keselamatan wajib.

Deteksi kebocoran hidrogen merupakan lini pertahanan pertama sistem keselamatan kapal. Lingkungan maritim menghadirkan tantangan tambahan berupa kelembaban tinggi, getaran mesin, variasi suhu ekstrem, dan potensi paparan air laut yang mempercepat degradasi sensor. Terdapat tiga teknologi utama sensor hidrogen yang relevan untuk aplikasi maritim.

Sensor elektrokimia memungkinkan deteksi hidrogen yang andal melalui interaksi elektrokimia, menjadikannya salah satu teknologi yang paling banyak dikembangkan untuk deteksi kebocoran hidrogen [21]. Berbeda dengan sensor logam oksida (*Metal Oxide/MOX*) yang menunjukkan sensitivitas dan kemudahan fabrikasi namun menghadapi tantangan terkait *cross-sensitivity* dan waktu respons, sensor elektrokimia menawarkan selektivitas yang lebih baik terhadap hidrogen meskipun masing-masing teknologi memiliki keunggulan dan keterbatasannya masing-masing [21].

Sensor katalitik bekerja dengan mengkatalisasi pembakaran hidrogen untuk menghasilkan sinyal deteksi. Sensor jenis ini termasuk dalam kelompok sensor termal alternatif, di mana sensor konduktivitas termal mengukur perbedaan suhu saat terpapar hidrogen sebagai mekanisme deteksi yang berbeda [21]. Sensor serat optik (*fiber optic*) menawarkan pendekatan lain yang memberikan ketahanan terhadap ledakan dan durabilitas yang tinggi melalui perubahan interferensi cahaya, sementara sensor ultrasonik mendeteksi kebocoran melalui analisis gelombang suara yang dihasilkan oleh pelepasan gas bertekanan [21].

Pemilihan teknologi sensor harus mempertimbangkan kondisi operasi secara seksama. Sensor ultrasonik (*UGLD*) terbukti sangat efektif untuk mendeteksi kebocoran dari tangki penyimpanan bertekanan tinggi di area terbuka karena tidak terpengaruh oleh angin, arah kebocoran, atau pengenceran hidrogen — berbeda dengan sensor berbasis konsentrasi yang hanya merespons setelah terbentuknya awan uap yang terdeteksi [22]. Sensor hidrogen harus andal, memiliki waktu respons rendah, dan mampu mendeteksi konsentrasi hidrogen di bawah 0,5% [22].

Penempatan sensor hidrogen harus mempertimbangkan karakteristik dispersi hidrogen secara cermat. Pada ruang tertutup berventilasi mekanis seperti area parkir bawah tanah atau unit produksi dalam ruangan, sensor tidak boleh dipasang di permukaan lantai, karena hidrogen cenderung terakumulasi di dekat langit-langit akibat efek daya apung sehingga konsentrasinya tetap di bawah ambang alarm pada ketinggian lantai [22]. Sebaliknya, pada instalasi di area terbuka seperti stasiun pengisian bahan bakar hidrogen, hidrogen tidak dapat terakumulasi, sehingga penempatan sensor pada bagian atas tangki tidak selalu menjadi pilihan optimal [22]. Integrasi teknologi penginderaan inovatif dengan sistem *shutdown* otomatis dan material yang robust terbukti meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem deteksi kebocoran secara keseluruhan [21].

Sistem penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi ( $\text{CH}_2$ ) merupakan teknologi penyimpanan hidrogen yang paling banyak digunakan secara komersial karena kemurnian hidrogen yang tinggi, pengisian dan pengosongan yang cepat, serta biaya manufaktur yang rendah [23]. Silinder Tipe III dengan liner logam dan lilitan karbon penuh beroperasi pada rentang tekanan kerja 30–70 MPa, sedangkan silinder Tipe IV mampu bekerja di atas 70 MPa [23]. Transduser tekanan yang digunakan dalam sistem tersebut harus dirancang sesuai dengan standar keselamatan fungsional IEC 61508 yang mengklasifikasikan sistem kritis keselamatan ke dalam empat tingkat Safety Integrity Level (SIL), di mana SIL 4 merupakan tingkat paling kritis dan SIL 1 yang paling rendah [24]. Untuk mencegah kegagalan tunggal memicu alarm palsu atau kegagalan tidak terdeteksi, diterapkan skema voting redundan dua-dari-tiga (2oo3) yang dikembangkan sesuai standar IEC 61508 [24]. Pada kapal Three Gorges Hydrogen Boat No. 1 yang menyimpan 240 kg hidrogen gas pada tekanan 35 MPa menggunakan 32 silinder Tipe III, pemantauan tekanan dilakukan secara individual pada setiap silinder melalui indikator tahan ledak (Ex IIC T6) dengan rentang ukur hingga 50 MPa, serta pemantauan jarak jauh (*remote monitoring*) untuk setiap silinder [25].

Untuk sistem penyimpanan hidrogen cair ( $\text{LH}_2$ ), pemantauan suhu pada tangki kriogenik menjadi hal krusial mengingat hidrogen cair disimpan pada titik didih normalnya sekitar 20 K ( $-253^\circ\text{C}$ ) pada tekanan atmosfer. MF Hydra, kapal feri pertama di dunia yang bertenaga  $\text{LH}_2$  dan beroperasi sejak 2023, menggunakan tangki kriogenik bervolume 80 m<sup>3</sup> untuk menyimpan hidrogen cair sebagai bahan bakar sistem fuel cell di atas kapal [26]. Estimasi konduktivitas termal efektif material isolasi secara akurat sangat penting untuk menentukan laju kebocoran panas (*heat leak*) dan laju *boil-off* dari tangki penyimpanan  $\text{LH}_2$ ; sifat termal ini harus dievaluasi pada rentang suhu antara titik didih normal hidrogen cair (20,4 K) hingga suhu kamar (298 K) [13]. Pemantauan gradien suhu secara kontinu pada dinding tangki kriogenik diperlukan untuk mendeteksi degradasi isolasi sedini mungkin sebelum mengakibatkan *boil-off* yang berlebihan, mengingat pilihan material isolasi saja dapat menggeser laju *boil-off* hingga lebih dari 38% [13].

Sistem ventilasi mekanis merupakan komponen aktif terpenting dalam pengendalian akumulasi gas hidrogen. Berdasarkan persyaratan lembaga klasifikasi, laju pertukaran udara minimum yang dipersyaratkan untuk ruang yang mengandung komponen hidrogen adalah 90 kali per jam [27]. Sistem ventilasi harus dirancang dengan prinsip *fail-safe*,

di mana kegagalan sistem kelistrikan mengakibatkan kipas ventilasi beroperasi pada kecepatan penuh, bukan berhenti.

Arsitektur sistem deteksi dan ventilasi pada ruang persiapan bahan bakar (*fuel preparation room/FPR*) kapal hidrogen dirancang berdasarkan penilaian risiko yang mempertimbangkan skenario kebocoran, analisis dispersi, dan efek ventilasi terhadap konsentrasi hidrogen yang terdeteksi [28]. Berdasarkan panduan IGF Code IMO, alarm diaktifkan apabila gas terdeteksi pada konsentrasi 20% dari batas mudah terbakar bawah (LFL) bahan bakar yang bocor [28]. Secara lebih umum, level alarm sensor keamanan hidrogen umumnya ditetapkan di bawah LFL, yaitu pada level rendah sebesar 0,4 vol% H<sub>2</sub> di udara (setara 10% LFL) atau level menengah sebesar 1,0 vol% H<sub>2</sub> di udara (setara 25% LFL), di mana level rendah mengaktifkan alarm audibel dan, jika memungkinkan, meningkatkan ventilasi [29]. Untuk konsentrasi di atas LFL, pengukuran tetap diperlukan terutama apabila konsentrasi terus meningkat atau stagnan pada atau di atas nilai tersebut [29]. Logika pengamanan ini diimplementasikan pada Safety Instrumented System (SIS) yang ditentukan levelnya menggunakan standar IEC 61511 — standar yang ditetapkan sesuai untuk sistem fuel cell maritim karena fuel cell mengonsumsi bahan bakar gas untuk pembangkitan daya, analog dengan sektor proses industri [7]. Penentuan SIL dilakukan melalui studi HAZOP, matriks lapisan perlindungan (*safety layer matrix*), grafik risiko terkalibrasi, dan analisis lapisan perlindungan (LOPA), dengan konsekuensi paling parah berupa kebakaran dan ledakan akibat overflow atau kegagalan kontrol [7].

*Emergency Shutdown System (ESD)* adalah lapisan pertahanan akhir yang menghentikan aliran hidrogen ke seluruh sistem kapal dalam keadaan darurat. Dalam konteks kapal hidrogen otonom, analisis keselamatan mencakup dua aksi kontrol utama, yaitu emergency shutdown dan pengendalian kecepatan, di mana kegagalan aksi kontrol terhadap sistem ESD dapat memberikan dampak merugikan terhadap keselamatan operasional kapal [30]. ESD pada kapal hidrogen terdiri dari rangkaian katup solenoid gagal-tutup (*fail-close solenoid valves*) pada jalur pasokan hidrogen, interlock antarsubsystem, dan panel kontrol ESD dengan tombol darurat manual yang ditempatkan di lokasi mudah dijangkau kru. Pada kapal Three Gorges Hydrogen Boat No. 1, tombol ESD manual ditempatkan di anjungan navigasi, kabinet manajemen sel bahan bakar, kabinet pemantauan keselamatan, dan di pintu keluar ruang sel bahan bakar, sehingga kru dapat mengaktifkan shutdown dari berbagai titik strategis [25]. Selain itu, sistem ESD juga dipasang secara terintegrasi pada sisi darat maupun sisi kapal dalam operasi bunkering hidrogen, guna memastikan penutupan otomatis jalur bunkering pada kondisi darurat [25].

Respons waktu ESD merupakan parameter kritis yang diatur oleh standar keselamatan. Kecepatan penutupan katup isolasi utama menjadi sangat penting mengingat hidrogen dapat menyebar secara signifikan dalam hitungan detik akibat karakteristik difusivitasnya yang tinggi. Dalam penilaian risiko sistem hidrogen bertekanan tinggi, pendekatan Layer of Protection Analysis (LOPA) berdasarkan IEC 61511 digunakan untuk menetapkan tingkat integritas keselamatan (Safety Integrity Level/SIL) yang diperlukan bagi lapisan proteksi otomatis, termasuk sistem ESD, guna memastikan bahwa probabilitas kegagalan pada permintaan (Probability of Failure on Demand) tetap berada dalam batas yang dapat diterima [31]. Arsitektur ESD mengimplementasikan logika Voted System (2oo3 atau 1oo2) untuk menghindari shutdown yang tidak disengaja akibat kegagalan sensor tunggal, sekaligus memastikan shutdown tetap terjadi meski satu dari dua sensor gagal memberikan sinyal. Dalam implementasinya pada kapal hidrogen, sistem deteksi gas yang terintegrasi dengan ESD dirancang untuk memicu alarm pada konsentrasi hidrogen 0,8% dan mengaktifkan penutupan otomatis katup tangki hidrogen serta pasokan gas pada konsentrasi 1,6% [25]. Pada proyek Nautilus, desain sistem keselamatan terperinci juga mengungkap berbagai isu regulasi yang harus diselesaikan, termasuk penentuan zona berbahaya untuk seluruh komponen hidrogen dan perolehan Design Basis Letter dari United States Coast Guard (USCG) sebagai bukti pemenuhan standar keselamatan [32].

Implementasi nyata ESD dapat diamati pada H2 Barge 2 yang beroperasi di Sungai Rhine dengan sistem PEMFC 1,2 MW. Kapal tersebut merupakan kapal kontainer bertenaga hidrogen yang dikonversi dari kapal diesel konvensional, dilengkapi sistem propulsi bebas emisi yang menggabungkan enam modul sel bahan bakar PEMFC, penyimpanan hidrogen, baterai, dan penggerak listrik [3]. Sistem keselamatan yang terintegrasi mencakup deteksi gas, proteksi kebakaran, dan prosedur tanggap darurat yang memenuhi standar operasional lembaga klasifikasi, sebagaimana ditunjukkan oleh sebagian besar kapal hidrogen komersial yang telah memperoleh sertifikat dari lembaga klasifikasi sebagai bukti kepatuhan terhadap standar keselamatan yang berlaku [3]. Pengalaman operasional berbagai kapal hidrogen, termasuk Three Gorges Hydrogen Boat No. 1 dan H2 Barge 2, menunjukkan bahwa integrasi sensor, ESD, dan protokol keselamatan dalam satu platform terpadu merupakan pendekatan yang efektif untuk skala komersial, sejalan dengan temuan analisis STPA yang menekankan bahwa pemantauan dan pemeliharaan ketat terhadap sistem sensor otonom merupakan kunci mitigasi risiko pada kapal bertenaga hidrogen [25,30].

*Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)* pada sistem sel bahan bakar hidrogen berfungsi mengintegrasikan seluruh data sensor, status aktuator, dan parameter operasional ke dalam antarmuka terpadu yang dapat dipantau secara real-time. Sistem SCADA modular untuk sel bahan bakar PEM mencakup sensor tegangan, arus,

tekanan hidrogen, suhu stack, konsentrasi hidrogen, dan konsentrasi oksigen pada masing-masing modul yang dihubungkan ke *Local Control Unit* (LCU) melalui bus komunikasi, kemudian diteruskan ke *Central Control Unit* (CCU) sebagai pengendali utama sebelum data divisualisasikan pada antarmuka SCADA [33]. Arsitektur bertingkat ini, dari sensor lokal, LCU, hingga CCU, menunjukkan pola hierarki kontrol yang lazim diterapkan pada sistem manajemen kapal hidrogen, di mana CCU berperan setara dengan PLC keselamatan yang berkomunikasi dengan *Human-Machine Interface* (HMI) di anjungan kapal.

Sistem SCADA untuk sel bahan bakar PEM juga memiliki kemampuan pemantauan kondisi (*condition monitoring*) secara berkelanjutan dengan membandingkan performa aktual stack terhadap kurva referensi pabrikan. Apabila nilai sensor berada di luar rentang yang diperbolehkan, misalnya suhu stack melebihi 75°C atau tekanan hidrogen turun di bawah 1,07 bar, sistem secara otomatis mengeluarkan peringatan dan memicu prosedur shutdown darurat [33]. Kemampuan deteksi anomali ini merupakan fondasi dari tren terkini yang mengintegrasikan kemampuan *Industrial Internet of Things* (IIoT) pada sistem SCADA kapal hidrogen, memungkinkan pemantauan kondisi secara remote oleh pusat kendali darat. Data operasional dari sensor tekanan, suhu, konsentrasi hidrogen, dan performa sel bahan bakar dapat dikirimkan melalui koneksi internet untuk disupervisi dari mana saja [33], sebuah konsep yang secara langsung paralel dengan implementasi pemantauan terintegrasi pada kapal-kapal bertenaga PEMFC modern seperti MV Sea Change yang beroperasi di San Francisco Bay sejak Juli 2024 dengan sistem powertrain 360 kW [34].

Pada kapal bertenaga hidrogen, *Power Management System* (PMS) harus mengintegrasikan seluruh sumber energi dan beban propulsi dalam satu arsitektur kontrol yang kohesif. Sistem tenaga hibrid yang terdiri dari berbagai jenis sumber energi seperti sel bahan bakar, baterai, dan sumber energi lainnya dapat memastikan pasokan daya yang kontinu dan andal bagi kapal dengan memanfaatkan karakteristik masing-masing sumber energi untuk kondisi operasi yang berbeda [35]. Fluktuasi beban propulsi yang melampaui kemampuan respons sel bahan bakar, khususnya SOFC yang mengalami keterbatasan kapabilitas transien sehingga belum pernah dianggap layak sebagai sumber tenaga utama untuk aplikasi maritim, dapat mengakibatkan gangguan kestabilan sistem yang memicu kondisi tidak aman [36]. Oleh karena itu, PMS harus mengimplementasikan strategi hibridisasi dengan baterai sebagai *Energy Storage System* (ESS) yang mampu meratakan fluktuasi daya beban kapal dan melengkapi respons lambat sel bahan bakar [35]. Strategi manajemen energi berbasis algoritma prediktif dikembangkan untuk memastikan pembagian daya optimal antara sel bahan bakar dan baterai, dengan tujuan meminimalkan konsumsi hidrogen, memperpanjang umur sel bahan bakar, serta mempertahankan *State of Charge* (SOC) baterai pada rentang yang aman selama navigasi [37].

Sistem bus DC pada kapal hidrogen membutuhkan arsitektur proteksi yang andal sebagai bagian dari sistem keselamatan operasional secara menyeluruh. Konversi retrofit dari kapal diesel konvensional ke kapal bertenaga hidrogen, seperti yang diterapkan pada H2 Barge 1 dan H2 Barge 2 yang menggunakan unit penyimpanan hidrogen dan sel bahan bakar berformat kontainer modular, menunjukkan bahwa tantangan utama bukan hanya pada penyimpanan hidrogen, tetapi juga pada rekonfigurasi seluruh sistem kelistrikan termasuk bus distribusi daya [3]. Pada H2 Barge 1, bus DC 750 V menjadi tulang punggung distribusi daya yang menghubungkan tiga unit sel bahan bakar dengan kapasitas masing-masing 300 kW, baterai litium-ion 1.037 kWh, dan motor listrik 800 kW [3]. Proteksi bus DC ini, mencakup deteksi arc fault, isolasi ground fault, dan pemantauan kualitas daya, merupakan fungsi instrumentasi elektrik yang harus berjalan terintegrasi dengan sistem keselamatan hidrogen untuk memastikan keandalan dan keselamatan operasional secara menyeluruh, mengingat kompleksnya lingkungan operasi kapal dengan variasi beban propulsi yang signifikan [35,36].

MF Hydra, kapal feri *Roll-On-Roll-Off Passenger* (Ro-Pax) dua arah berukuran 82,4 m yang dikirimkan pada tahun 2021 dan mulai beroperasi secara komersial pada Maret 2023, merupakan kapal pertama di dunia yang menggunakan teknologi penyimpanan hidrogen cair (LH<sub>2</sub>) untuk propulsi maritim [38]. Sistem daya kapal terdiri dari dua modul sel bahan bakar PEMFC berkapasitas masing-masing 200 kW, sistem baterai, serta dua generator diesel sebagai cadangan, dengan LH<sub>2</sub> disimpan dalam tangki berkapasitas 80 m<sup>3</sup> yang dipasang di dek atas kapal [38]. Tangki kriogenik vakum-insulasi ini beroperasi pada suhu sekitar -253°C, dan salah satu tantangan utama yang dihadapi adalah meminimalkan kehilangan panas (*heat loss*) untuk mengurangi penguapan hidrogen cair (*boil-off gas*/BOG) yang tidak terhindarkan [39].

Dari sisi keselamatan, pengembangan teknologi penyimpanan LH<sub>2</sub> kriogenik pada kapal masih berada pada tahap eksplorasi, dengan tantangan utama berupa pemeliharaan lingkungan suhu ultra-rendah -253°C dan penjaminan efektivitas sistem insulasi [40]. Keberhasilan operasional MF Hydra menjadi platform demonstrasi penting yang mendorong penyempurnaan regulasi keselamatan internasional, termasuk panduan sementara IMO untuk keselamatan kapal bertenaga sel bahan bakar yang diterbitkan sejak tahun 2021, serta kolaborasi DNV bersama 26 perusahaan dan asosiasi internasional dalam proyek MarHySafe untuk membangun basis pengetahuan operasional hidrogen yang

aman di pelayaran [40].

H2 Barge 2 adalah kapal kontainer *inland* 200 TEU hasil konversi (*retrofit*) dari kapal konvensional bernama FPS Waal yang beroperasi di jalur Sungai Rhine, mencatat total daya PEMFC tertinggi di antara 50 kapal bertenaga hidrogen yang terdokumentasi dari tahun 2000 hingga 2024 yakni sebesar 1,2 MW [3]. Sistem propulsi kapal terdiri dari tangki penyimpanan hidrogen terkompresi ( $\text{CH}_2$ ), modul PEMFC, baterai litium, dan motor propulsi listrik, dengan tangki hidrogen dan sistem PEMFC ditempatkan di area kargo dalam dua kontainer 40 kaki yang memungkinkan pengisian ulang melalui penggantian kontainer [3]. Aspek keselamatan yang kritis mencakup risiko kebakaran dan ledakan akibat pelepasan dan dispersi gas hidrogen, mengingat bahaya yang ditimbulkan sangat bergantung pada karakteristik dispersi  $\text{H}_2$  di ruang tertutup seperti kompartemen sel bahan bakar dan area penyimpanan [41].

Integrasi ESD pada sistem propulsi elektrik berbasis sel bahan bakar mensyaratkan penentuan SIL menggunakan metode HAZOP dan *Layer of Protection Analysis* (LOPA) sesuai standar IEC 61511, yang menentukan persyaratan keandalan fungsi keselamatan secara kuantitatif [7]. Dari perspektif kelayakan teknis, studi kapal kontainer *inland* bertenaga PEMFC menunjukkan bahwa sistem hibrida PEMFC-baterai litium merupakan solusi efektif untuk memenuhi kebutuhan daya dan memenuhi regulasi emisi di jalur perairan pedalaman [42]. Three Gorges Hydrogen Boat No. 1, kapal penumpang katamaran berklasifikasi CCS yang terintegrasi dengan stasiun produksi dan bunkering hidrogen berbasis elektrolisis PEM bertenaga hidroelektrik di dermaga khususnya, mengimplementasikan sistem PEMFC berkapasitas 500 kW untuk mencapai nol emisi karbon [25]. Kapal ini menyimpan 240 kg hidrogen gas bertekanan 35 MPa dalam 32 silinder Tipe III yang dihubungkan secara paralel untuk meningkatkan keselamatan termal dan memperpanjang umur layanan, di mana setiap silinder berbahan liner aluminium diperkuat serat karbon [25].

Aspek instrumentasi yang paling signifikan dari proyek ini adalah sistem bunkering *shore-to-ship* yang terkendali secara terpadu. Stasiun bunkering yang terletak di dek terbuka kapal dilengkapi dengan pipa bunkering hidrogen yang memiliki filter, katup satu arah (*check valve*), katup bola manual, katup kendali jarak jauh tahan ledakan (*explosion-proof remote control valve*), katup jarum, serta tampilan tekanan dan suhu lokal maupun jarak jauh [25]. Dua set reseptor dan pipa yang identik dipasang untuk meningkatkan kecepatan bunkering, sementara seluruh kendali bunkering dapat dioperasikan dari ruang kendali penyimpanan hidrogen, dengan sistem ESD yang secara otomatis menutup katup pipa bunkering saat keadaan darurat [25]. Pada uji coba bunkering pertama tanggal 22 November 2023, kapal berhasil diisi 200 kg hidrogen gas dalam waktu 156 menit melalui stasiun bunkering yang terletak 13 meter di atas permukaan air, dengan tekanan dan suhu maksimum masing-masing 35,05 MPa dan 39,04°C [25]. Durasi 156 menit tersebut melebihi ekspektasi akibat dua faktor: empat kali jeda total 55 menit untuk pemeriksaan keselamatan, dan ketidakfamiliaran operator dengan prosedur bunkering; setelah beberapa bulan pengalaman, durasi bunkering berhasil dipersingkat menjadi kurang dari 60 menit [25].

#### 4. KESIMPULAN

Kapal bertenaga hidrogen merupakan salah satu alternatif yang menjanjikan dalam mendukung dekarbonisasi sektor maritim dan pengurangan emisi gas rumah kaca. Pemanfaatan Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) memungkinkan konversi hidrogen menjadi energi listrik dengan efisiensi yang tinggi dan emisi yang sangat rendah selama operasi. Namun, karakteristik hidrogen yang mudah terbakar, memiliki energi penyalaan rendah, serta berpotensi mengalami kebocoran menuntut penerapan sistem keselamatan yang lebih ketat dibandingkan bahan bakar konvensional. Hasil studi literatur menunjukkan bahwa Sistem Instrumentasi dan Kontrol Keselamatan (Safety Instrumentation and Control System–SICS) memiliki peran penting dalam menjamin keselamatan operasional kapal bertenaga hidrogen. Integrasi sensor deteksi kebocoran hidrogen, sistem monitoring, akuisisi data, Internet of Things (IoT), serta sistem kendali otomatis mampu meningkatkan kemampuan deteksi dini, pemantauan kondisi secara real-time, dan respons cepat terhadap kondisi tidak normal. Teknologi elektronika dan sistem kendali tersebut menjadi elemen utama dalam mengurangi risiko kecelakaan akibat kebocoran maupun kegagalan sistem hidrogen di atas kapal. Perkembangan teknologi sensor, sistem monitoring cerdas, dan fuel cell menunjukkan bahwa implementasi kapal bertenaga hidrogen semakin memungkinkan untuk diterapkan di masa depan. Indonesia memiliki peluang besar untuk mengembangkan teknologi ini karena didukung oleh potensi energi terbarukan yang melimpah serta kebutuhan transformasi menuju transportasi laut yang lebih ramah lingkungan. Namun demikian, diperlukan pengembangan regulasi, standar keselamatan, infrastruktur pendukung, serta penelitian lanjutan di bidang elektronika, instrumentasi, dan sistem kontrol agar implementasi kapal bertenaga hidrogen dapat dilakukan secara aman dan andal.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] UNCTAD, *Review of Maritime Transport 2025*. Geneva, Switzerland: United Nations, 2025.
- [2] International Maritime Organization, *Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020*. London, U.K.: IMO, 2020.
- [3] H. Fan, N. Abdussamie, P. S. Chen, A. Harris, E. Maca, and E. Arzaghi, “Two Decades of Hydrogen-Powered Ships: Progress, Challenges and Future Prospects,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 4, pp. 1–28, 2024, doi: 10.3390/jmse12040621.
- [4] Y. D. Herlambang, Kurnianingsih, A. Roihatin, and F. Arifin, “Unjuk kerja Electrolyzer Tipe Dry Cell terhadap Variasi Konsentrasi Elektrolit dan Arus Listrik pada Mesin PEM Fuel Cell Skala Kecil untuk Pembangkit Listrik,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 16, no. 3, pp. 205–214, 2021, doi: 10.32497/jrm.v16i3.3077.
- [5] B. Rudiyanto, I. A. Safitri, A. Nursalim, and B. Hariono, “Uji Kinerja Smart Grid Fuel Cell Tipe Proton Exchange Membrane (PEM) dengan Penambahan Hidrogen,” *Jurnal Ilmiah Inovasi*, vol. 16, no. 1, pp. 1–7, 2016, doi: 10.25047/jii.v16i1.2.
- [6] A. F. Nurul, A. R. Al Tahtawi, dan M. Facta, “Analisis Kinerja Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) sebagai Sumber Energi Listrik Ramah Lingkungan,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 13, no. 2, pp. 95–102, 2021.
- [7] J. Ahn, D. Chang, Y. Noh, T. Joung, Y. Lim, J. Kim, and Y. Seo, “Safety Integrity Level Determination for Maritime Fuel Cell Systems as Electric Propulsion,” *Ocean Engineering*, vol. 187, Art. no. 106173, 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106173.
- [8] A. S. Handayani, D. W. Utomo, and M. Facta, “Rancang Bangun Sistem Monitoring Tegangan, Arus, dan Temperatur pada Proton Exchange Membrane Fuel Cell Berbasis Mikrokontroler,” *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 10, no. 2, pp. 317–324, 2021.
- [9] S. K. Menon, A. Kumar, and S. Mondal, “Advancements in Hydrogen Gas Leakage Detection Sensor Technologies and Safety Measures,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 95, pp. 263–277, 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.10.152.
- [10] S. Prasetyo, A. Nugroho, dan M. N. Hidayat, “Perancangan dan Implementasi Sistem Monitoring Tegangan dan Arus Berbasis Arduino untuk Aplikasi Energi Terbarukan,” *Jurnal ELKOMIKA*, vol. 9, no. 3, pp. 547–558, 2021, doi: 10.26760/elkomika.v9i3.547.
- [11] M. A. Ramadhan, D. Almanda, dan A. F. Al Tahtawi, “Implementasi Sensor dan Sistem Monitoring Berbasis Internet of Things untuk Pengawasan Parameter Kelistrikan,” *RESISTOR (Rekayasa Sistem Komputer)*, vol. 4, no. 2, pp. 101–108, 2021.
- [12] Y. Sun, “Explosions of Hydrogen Storages and Safety Considerations in Hydrogen-Powered Transportation Applications: A Review,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 183, pp. 901–918, 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.01.032
- [13] R. R. Ratnakar, Z. Sun, and V. Balakotaiah, “Effective Thermal Conductivity of Insulation Materials for Cryogenic Liquid Hydrogen Storage Tanks: A Review,” *Energies*, vol. 15, no. 8, Art. no. 2915, 2022, doi: 10.3390/en15082915.
- [14] K. L. Cashdollar, I. A. Zlochower, G. M. Green, and R. A. Thomas, “Flammability of Methane, Propane, and Hydrogen Gases,” vol. 13, 2000.
- [15] J. Bousek, P. Castello, O. Salyk, F. Harskamp, L. Aldea, and F. Tinaut, “Reliability of Commercially Available Hydrogen Sensors for Detection of Hydrogen at Critical Concentrations: Part I—Testing Facility and Methodologies,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, pp. 24–26, 2008.
- [16] M. A. Mustaghfirin, R. A. Heriyansyah, N. Tamimah, E. Novianarenti, A. Sa’diyah, M. Hakam, and M. Santoso, “Pengaruh Penambahan Katalis KOH, NaCl, dan NaOH terhadap Performa Hidrogen Generator untuk Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC),” *Jurnal Teknologi Maritim*, vol. 8, no. 1, pp. 22–29, 2025, doi: 10.35991/jtm.v8i1.49.
- [17] D. A. Prasetya, M. Rivai, and D. Purwanto, “Wireless Hydrogen Gas Monitoring System Based on Internet of Things,” *EMITTER International Journal of Engineering Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 1–13, 2022.
- [18] A. Nugroho, M. Facta, and T. Sukmadi, “Perancangan Sistem Deteksi Kebocoran Gas Berbasis Sensor MQ dan Mikrokontroler,” *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 9, no. 4, pp. 587–594, 2020.
- [19] R. H. Siregar, A. Warsito, and M. Facta, “Sistem Monitoring dan Akuisisi Data Energi Fuel Cell Berbasis Internet of Things,” *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 11, no. 1, pp. 45–52, 2022.
- [20] J. Yao and Z. Hu, “IMO Net-Zero Framework: Pathways to Maritime Decarbonization,” *Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 16, pp. 1171–1190, 2025, doi: 10.4236/jep.2025.1611063.

- [21] S. K. Menon, A. Kumar, and S. Mondal, “Advancements in Hydrogen Gas Leakage Detection Sensor Technologies and Safety Measures,” vol. 9, pp. 263–277, 2025.
- [22] A. Campari, M. Bennici, D. Tzioutzios, and Y. Liu, “Optimization of Leak Detectors’ Positioning in a Hydrogen Refueling Station,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 105, pp. 115–120, 2023, doi: 10.3303/CET23105020.
- [23] J. Li, X. Chai, Y. Gu, P. Zhang, X. Yang, Y. Wen, Z. Xu, and B. Jiang, “Small-Scale High-Pressure Hydrogen Storage Vessels: A Review,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 87, pp. 125–149, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.05.118.
- [24] A. Jääskeläinen, M. Katara, and S. Katz, “Verification of Safety-Critical Systems: A Case Study Report on Using Modern Model Checking Tools,” pp. 44–56.
- [25] W. Guan, L. Chen, Z. Wang, J. Chen, Q. Ye, and H. Fan, “A 500 kW Hydrogen Fuel Cell-Powered Vessel: From Concept to Sailing,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 89, pp. 1466–1481, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.09.418.
- [26] A. Schiaroli et al., “A Comprehensive Review on Liquid Hydrogen Transfer Operations and Safety Considerations for Mobile Applications,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 107, pp. 164–182, 2025.
- [27] W. Guan, J. Chen, L. Chen, J. Cao, and H. Fan, “Safe Design of a Hydrogen-Powered Ship: CFD Simulation on Hydrogen Leakage in the Fuel Cell Room,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 10, Art. no. 1916, 2023, doi: 10.3390/jmse11101916.
- [28] B. R. Ryu, P. A. Duong, J. Kim, S. Choi, J. W. Shin, J. Jung, and H. Kang, “The Effect of Ventilation on the Hazards of Hydrogen Release in Enclosed Areas of Hydrogen-Fueled Ships,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 71, pp. 27510–27525, 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.201
- [29] W. Buttner, R. Burgess, M. Post, and C. Rivkin, “Summary and Findings from the NREL/DOE Hydrogen Sensor Workshop,” 2011.
- [30] M. A. Sumon, H. Kim, S. Na, C. Choung, and E. Kjøsberg, “Systems-Based Safety Analysis for Hydrogen-Driven Autonomous Ships,” 2024.
- [31] M. A. Sumon, H. Kim, S. Na, C. Choung, and E. Kjøsberg, “Systems-Based Safety Analysis for Hydrogen-Driven Autonomous Ships,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 251, Art. no. 110322, 2024, doi: 10.1016/j.res.2024.110322.
- [32] N. Pal et al., “Project Nautilus: Introducing a Hydrogen Fuel Cell System as a Retrofit for a Hybrid Electric Vessel,” vol. 53, pp. 1–5, 2024.
- [33] F. Segura and J. M. Andújar, “Modular PEM Fuel Cell SCADA & Simulator System,” *Resources*, vol. 4, no. 3, pp. 692–712, 2015, doi: 10.3390/resources4030692.
- [34] E. Van Sickle, P. Ralli, J. W. Pratt, and L. E. Klebanoff, “MV Sea Change: The First Commercial 100% Hydrogen Fuel Cell Passenger Ferry in the World,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 105, pp. 1–7, 2025.
- [35] Y. Yuan, J. Wang, X. Yan, B. Shen, and T. Long, “A Review of Multi-Energy Hybrid Power System for Ships,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 132, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2020.110081.
- [36] A. Haseltalab, L. Van Biert, H. Sapra, B. Mestemaker, and R. R. Negenborn, “Component Sizing and Energy Management for SOFC-Based Ship Power Systems,” *Energy Conversion and Management*, vol. 245, Art. no. 114625, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114625.
- [37] L. Zhu, Y. Liu, Y. Zeng, H. Guo, Q. Ma, S. Liu, and Q. Zhang, “Energy Management Strategy for Fuel Cell Hybrid Ships Based on Deep Reinforcement Learning with Multi-Optimization Objectives,” *Energy Conversion and Management*, vol. 315, Art. no. 119990, 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2024.119990
- [38] F. Ustolin and A. Campari, “An Extensive Review of Liquid Hydrogen in Transportation with Focus on the Maritime Sector,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 89, pp. 37824–37849, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.179.
- [39] A. Schiaroli et al., “A Comprehensive Review on Liquid Hydrogen Transfer Operations and Safety Considerations for Mobile Applications,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 107, pp. 164–182, 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.12.266.
- [40] Z. Zhou and J. Tao, “Hydrogen-Powered Vessels in Green Maritime Decarbonization: Policy Drivers, Technological Frontiers and Challenges,” *Frontiers in Marine Science*, 2025, doi: 10.3389/fmars.2025.1601617.
- [41] M. L. Blaylock and L. E. Klebanoff, “Hydrogen Gas Dispersion Studies for Hydrogen Fuel Cell Vessels I: Vent Mast Releases,” vol. 47, 2022.
- [42] Z. Wang, H. Tang, Z. Wu, Y. Ji, and F. Han, “Evaluating Fuel Cell Power Systems for Coastal and Inland Waterway Vessels: Technical and Economic Perspectives,” *Energy Conversion and Management*, vol. 323,

2025, doi: 10.1016/j.enconman.2024.119200.

- [43] S. A. Alavi-Borazjani, S. Adeel, and V. Chkoniya, "Hydrogen as a Sustainable Fuel: Transforming Maritime Logistics," *Maritime Policy & Management*, vol. 52, no. 2, pp. 1–36, 2025, doi: 10.1080/03088839.2025.2415623.
- [44] D. F. Silalahi, A. Blakers, M. Stocks, B. Lu, C. Cheng, and L. Hayes, "Indonesia's Vast Solar Energy Potential," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 148, Art. no. 111361, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111361
- [45] H. E. Hardana, P. Adiwibowo, Y. Sunitiyoso, and T. E. K. Kurniawan, "Financial Viability Analysis for Green Hydrogen Production Opportunity from Hydropower Plant's Excess Power in Indonesia," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 13, no. 5, pp. 846–863, Sep. 2024, doi: 10.61435/ijred.2024.60304.
- [46] E. Manullang and N. Sinaga, "Potential and Challenges of Hydrogen Development as New Renewable Energy in Indonesia," *R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal*, vol. 7, no. 2, pp. 55–63, 2022, doi: 10.21070/r.e.m.v7i2.1647.