

Penilaian Siklus Hidup *Hydrogen Plant* di PLTGU Gresik

Ahmad Al Jailani¹, Maria Anityasari²

^{1,2}Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl Raya ITS, Keputih, Kecamatan Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60111
Email: ahmadaljailani13@gmail.com, maria@ie.its.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menilai siklus hidup hydrogen plant dan mengevaluasi implementasi penggunaan PLTS untuk menekan global warming di PLN Nusantara Power UP Gresik. Di PLTGU Gresik hydrogen digunakan sebagai pendingin generator. Produksi hydrogen di PLTGU Gresik menggunakan teknologi elektrolisis alkali. Kajian dampak lingkungan yang dipaparkan dalam artikel ini disusun dengan metode LCA berdasarkan standart ISO 14040 dengan unit fungsional 1 kg H₂ dan ruang lingkup cradle to gate meliputi proses desalinasi, demineralisasi, *gas Generating system*, dan *hydrogen purification system*. Data inventori meliputi seluruh konsumsi listrik, bahan kimia, air proses dan emisi yang dibuang ke lingkungan. Penilaian dampak dilakukan dengan metode ReCipe 2016 Midpoint dengan SimaPro pada skenario produksi hydrogen dengan energi listrik PLN (baseline), dan energi *hybrid* PLN-PLTS berkapasitas 50,6 KWp. Kebutuhan listrik *hydrogen plant* tipe ini mencapai 48,80 kWh/kg H₂ dengan GGS adalah proses yang konsumsi listrik yang tertinggi yaitu 45,77 kWh per kg H₂ atau 93,8 persen dari total keseluruhan sistem. Integrasi PLTS 50,6 kWp dapat menurunkan dampak global warming sebesar 14,04%. Namun, terdapat peningkatan dampak *ionizing radiation*, *terrestrial ecotoxicity*, dan *mineral resource scarcity* yang menunjukkan *burden shifting* dari rantai pasok material PLTS. Secara keseluruhan integrasi PLTS efektif menurunkan 83,3% kategori dampak lingkungan pada proses produksi hydrogen di PLTGU Gresik.

Kata kunci: *Life cycle assessment, hydrogen plant, PLTS, global warming potential, emisi, listrik.*

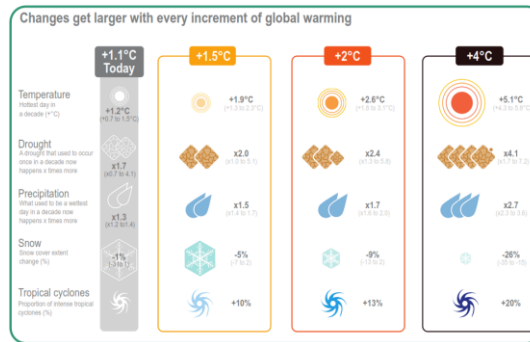
ABSTRACT

This study aims to assess the life cycle of a hydrogen plant and evaluate the implementation of solar power plants to mitigate global warming at PLN Nusantara Power UP Gresik. At the Gresik Combined Cycle Power Plant, hydrogen is used as a generator coolant. Hydrogen production at the Gresik CCGP utilizes alkaline electrolysis technology. The environmental impact assessment presented in this paper was conducted using the LCA method based on ISO 14040 standards. The functional unit used was 1 kg of H₂, and the cradle-to-gate scope included the desalination process, demineralization, gas generation system, and hydrogen purification system. Inventory data includes total electricity consumption, chemicals, process water, and emissions released into the environment. Impact assessment was conducted using the ReCipe 2016 Midpoint method with SimaPro for two scenarios: hydrogen production using PLN electricity and a hybrid PLN-solar power system with a capacity of 50,6kWp. The electricity requirement for this type of hydrogen plant reaches 48.80 kWh/kg H₂, with the GGS being the process with the highest electricity consumption at 44.77 kWh/kg H₂, or 93,8 percent of the total system. Integrating a 50,6kWp PV system can reduce the global warming impact by 14.04%. However, there is an increase in the impacts of ionizing radiation, terrestrial ecotoxicity, and mineral resource scarcity, indicating a burden shift. Overall, the integration of solar power plants effectively reduces 83.3% of the environmental impact in the hydrogen production process at the Gresik CCGT power plant.

Keywords: *Life cycle assessment, hydrogen plant, photovoltaic, global warming potential, emission, electricity..*

Pendahuluan

Salah satu tantangan yang paling serius yang dihadapi pada abad ke 21 ini adalah perubahan iklim[1], [2]. Sejak era pra industri, suhu global mengalami peningkatan sebesar 1,1 ° C[1]. Saat suhu global naik 1,1 ° C maka akan mengakibatkan kekeringan dan hujan yang meningkat frekuensinya[3]. Jika dulu kekeringan terjadi satu kali dalam sepuluh tahun maka kini lebih sering terjadi dan curah hujan akan lebih sering terjadi dalam sepuluh tahun berikutnya, sebab kenaikan suhu meningkat lebih lanjut maka dampaknya pada cuaca akan lebih ekstrim terjadi seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1 [4]. Hal ini disebabkan oleh banyaknya aktivitas manusia yang menghasilkan emisi gas rumah kaca terutama dari aktivitas yang memanfaatkan bahan bakar fosil [2].



Gambar 1. Perubahan iklim akibat kenaikan temperatur global[4]

Untuk menghindari ancaman yang lebih serius kedepannya, negara-negara di seluruh dunia bersepakat dalam *Paris Agreement* untuk membatasi pemanasan global di bawah 1,5° C dan konsekuensinya adalah negara-negara di seluruh dunia harus menurunkan emisi bersih hingga nol agar dapat mengurangi dampak buruk dari penggunaan bahan bakar fosil terhadap perubahan iklim [5]. Untuk mencapai tujuan tersebut, negara-negara di berbagai negara melakukan berbagai usaha untuk melakukan transformasi energi menjadi sistem yang lebih rendah karbon, peningkatan efisiensi dan melakukan dekarbonisasi pada lini industri[6]. Di berbagai bidang industri, pengembangan *green hydrogen* merupakan salah satu pilar utama dalam program dekarbonisasi global untuk mengembangkan energi yang bersih dan lebih dari 99% industri yang memproduksi hidrogen sangat bergantung pada penggunaan bahan bakar fosil [7], [8]. Pada proses produksi hidrogen pada banyak industri umumnya menggunakan bahan bakar fosil untuk produksi 94 juta ton hidrogen sehingga menghasilkan lebih dari 900 juta ton CO₂ pada tahun 2021[7].

Dalam perjalanannya, pengembangan program *hydrogen plant* menuju *green hydrogen* pada skala industri menemukan banyak kendala, antara lain yaitu investasi awal yang cukup mahal, efisiensi konversi energi yang relatif rendah, dan suplai energi listrik baru terbarukan yang masih terbatas [9]. Pemerintah Indonesia secara tegas menetapkan target *Net Zero Emission* 2060 melalui roadmap transisi energi sektor ketenagalistrikan pada Peraturan menteri ESDM nomor 10 tahun 2025 pasal 2f, di mana *green hydrogen* menjadi salah satu program transisi energi untuk menurunkan emisi gas rumah kaca[10]. Selain itu pada Rencana Umum Energi Nasional dan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik tahun 2025 hingga 2034, Pemerintah Indonesia berusaha mendorong langkah-langkah strategis diversifikasi bauran energi dengan menargetkan penggunaan energi baru terbarukan (EBT) sebesar 34,3% pada tahun 2034[11]. Dalam perencanaan transisi energi, *green hydrogen* menjadi salah satu perhatian khusus untuk membentuk energi bersih di masa depan. Sebagai perusahaan yang menguasai bisnis kelistrikan Indonesia, PT PLN (Persero) memiliki peran yang sangat penting untuk mewujudkan rencana dekarbonisasi khususnya di sistem kelistrikan nasional. Pada tahun 2023, PT PLN (Persero) melaksanakan program *green hydrogen* dengan melakukan inovasi dekarbonisasi dengan memanfaatkan energi baru terbarukan untuk sistem *hydrogen plant* yang digunakan untuk menghasilkan hidrogen pendingin generator pada steam turbin[12].

Hidrogen dipilih sebagai pendingin generator karena memiliki karakteristik konduktivitas termal yang baik dan viskositas yang baik[13]. Sifat termofisiknya efektif dan unggul memungkinkan hidrogen digunakan pada generator yang memiliki desain 20-30% lebih kecil dibandingkan pendingin udara pada rating yang sama[14]. Hidrogen adalah salah satu unsur kimia yang cukup ringan karena memiliki massa jenis sebesar 0,089 kg/m³ pada 0 °C dan tekanan 1 atm. Selain massa jenisnya yang ringan hidrogen bersifat tidak berwarna, tidak berbau, sangat mudah terbakar dengan flammable range 4 hingga 75% di udara [15]. Sifatnya yang mudah terbakar memerlukan pengendalian risiko pada tahap produksi, penyimpanan maupun pada tahap pemanfaatannya [16] Selain dari risiko keselamatan proses produksi hidrogen juga berisiko terhadap lingkungan. Pada umumnya di Indonesia produksi hidrogen melalui elektrolisis air dengan memanfaatkan sumber energi listrik dari jaringan PLN yang mayoritas menggunakan bahan bakar fosil. Sektor ketenagalistrikan saat ini berkontribusi menyumbang sekitar 40% emisi gas CO₂ dari total emisi yang dihasilkan di sektor energi di Indonesia [17], dimana setiap 1 kWh listrik yang dihasilkan menghasilkan dampak lingkungan *global warming potential* sebesar 1,06 kg CO₂ eq khususnya pada jaringan Jawa Madura Bali grid yang menyumbang 72% energi listrik dari total keseluruhan energi listrik di seluruh Indonesia [17]. PT PLN (persero) tetap berupaya menekan tingginya angka dampak global warming. Salah satu target yang ingin dicapai PT PLN (Persero) dalam rangka dekarbonisasi adalah dengan menambah kapasitas *Variable Renewable Energy* (VRE) sebesar 28 GW pada tahun 2040. Tentunya dengan melakukan implementasi bertahap pada proyek dekarbonisasi di unit-unit existing[12].

Pada tahun 2023 PT PLN Nusantara power (PLN NP) sebagai perusahaan sub holding dari PT PLN (Persero) secara resmi meluncurkan program *green hydrogen* di PLTGU Muara Karang sebagai proyek percontohan nasional [18]. Program tersebut, menghasilkan *green hydrogen* yang semula di produksi dengan

elektrolisis air yang memanfaatkan energi listrik dari PLTS yang berkapasitas 150 kWp. *Green hydrogen* dari proses elektrolisis air yang berbasis energi baru terbarukan secara teoritis dapat mengurangi emisi gas rumah kaca, namun di sisi lain terdapat dampak pada lingkungan seperti penggunaan sumber air, penggunaan lahan, penurunan sumber daya dan toksisitas [19], [20], [21]. Dengan memanfaatkan PLTS program tersebut menjadi pionir dan sejarah bagi PLN Nusantara Power sebagai perusahaan yang pertama di Indonesia yang memanfaatkan energi baru terbarukan untuk memproduksi hidrogen yang akan digunakan pada pendingin generator dan ini berpotensi dapat diaplikasikan pada industri lainnya [18]. Program ini, menjadi semangat baru bagi PLN NP untuk memperluas aplikasi teknologi *green hydrogen* di seluruh unit pembangkit listrik yang dikelolanya. Salah satunya PLN NP UP Gresik yang berinisiatif mengadopsi teknologi serupa dengan menggunakan PLTS berkapasitas 50,6 kWp yang digunakan untuk menyuplai energi listrik ke sistem produksi hidrogen seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Green hydrogen di PLTU Gresik

Hidrogen yang diproduksi akan digunakan sebagai pendingin generator pada unit PLTU 1-2, PLTU 3-4 dan steam turbin PLTU Gresik seperti pada Gambar 3. Pada kondisi existing, *hydrogen plant* yang dimiliki PLTU Gresik menggunakan sumber energi listrik dari jaringan PLN yang mayoritas masih menggunakan energi berbahan bakar fosil sebagai sumber energinya. Persentase bauran energi di Indonesia yang mendominasi pada tahun 2024 adalah energi berbahan bakar batubara. Buku statistik ketenagalistrikan mencatat bauran energi primer masih didominasi oleh pembangkit batubara, bahan bakar minyak dan gas, sementara itu porsi EBT yang baru diimplementasikan baru mencapai 13% [22]. Hal ini menunjukkan bahwa diperlukan strategi dalam mengurangi dampak iklim akibat tingginya bauran energi fosil salah satunya dengan memulai program *green hydrogen*.



Gambar 3. Pembangkit di Unit Pembangkit Gresik [23]

Dengan semangat dekarbonisasi untuk penurunan dampak lingkungan, penggunaan PLTS berkapasitas 50,6 kWp di desain sebagai langkah awal bagi PLTU Gresik untuk mengurangi emisi karbon. Walaupun kapasitas yang masih terbatas langkah ini menjadi penting untuk menguji sejauh mana PLTS ini dapat berkontribusi dalam mengurangi dampak lingkungan khususnya pada emisi karbon dalam proses produksi hidrogen. Masih terdapat celah penelitian yang dapat diisi pada kajian ilmiah dengan pendekatan *Life cycle assessment* yang menilai dampak lingkungan secara kuantitatif dari sistem produksi hidrogen untuk pendingin generator di Indonesia, terkhusus pada *hydrogen plant* Unit Pembangkitan Gresik.

Pada penelitian ini dilakukan kajian dengan pendekatan *life cycle assessment* sesuai standar ISO 14040 dengan membandingkan dua skenario. Skenario pertama yaitu dengan basis energi listrik dari PLN (baseline), skenario kedua yaitu dengan menggunakan sistem *hybrid* energi PLN-PLTS yang berkapasitas 50,6 kWp. Fokus penilaian dampak dilakukan pada setiap kilogram hidrogen yang dihasilkan, serta identifikasi *hotspot* utama yang menimbulkan dampak lingkungan terbesar dari proses produksi hidrogen. Penilaian jejak karbon menjadi relevan karena Indonesia telah memberlakukan undang-undang nomor 7 tahun 2021 mengenai pajak karbon di

untuk setiap pribadi atau badan yang melakukan aktivitas yang menghasilkan karbon dengan tarif minimal Rp 30,00 per kg CO₂ eq [24].

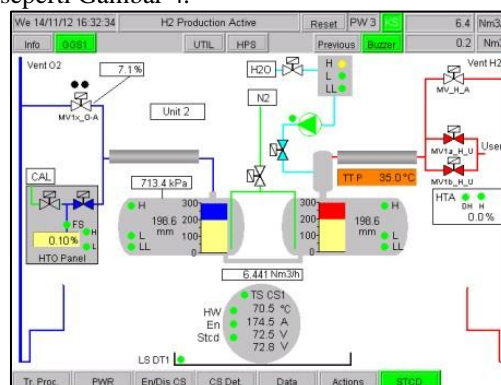
Implementasi *green hydrogen* di PLTGU Gresik telah dilakukan pada tahun 2024. Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan data inventori aktual *hydrogen plant*, evaluasi penggunaan PLTS rooftop serta perbandingan dampak lingkungan skenario baseline dan skenario hybrid. Hasil penelitian diharapkan memberi gambaran profil lingkungan, potensi penurunan dampak serta menjadi dasar perbaikan bagi PLN Nusantara Power dalam pengembangan program hidrogen yang inovatif dan berkelanjutan.

Kajian *life cycle assessment* pada proses produksi hidrogen telah banyak dilakukan namun sebagian besar masih berfokus pada perbandingan teknologi produksi hidrogen seperti steam methane reforming, elektrolisis dengan energi grid dan energi terbarukan. Studi-studi tersebut pada umumnya menggunakan data sekunder sehingga belum sepenuhnya mencerminkan kondisi aktual dilapangan pada fasilitas industri listrik khususnya. Di Indonesia, kajian LCA pada proses hidrogen yang digunakan pada industri pembangkitan listrik masih sangat terbatas, khususnya pada evaluasi *hydrogen plant* secara aktual yang digunakan untuk pendingin generator dengan integrasi PLTS secara parsial. Penelitian ini mengisi celah dengan menilai dampak lingkungan pada *hydrogen plant* di PLTGU Gresik dengan menggunakan data inventori aktual dan membandingkan antara skenario sumber listrik grid PLN dan skenario hybrid PLT-PLTS. Kebaruan pada penelitian ini terletak pada penggunaan data aktual proses produksi hidrogen di lingkungan PLTGU Gresik, evaluasi lingkungan terhadap integrasi PLTS secara parsial pada sumber listrik *hydrogen plant*, serta analisis *burden shifting* pada kategori dampak yang muncul. Dengan demikian penelitian ini memberikan gambaran yang komprehensif mengenai konsekuensi lingkungan dari implementasi PLTS parsial pada *hydrogen plant* di lingkungan pembangkit listrik di Indonesia.

Keterbatasan penelitian pada penelitian ini adalah kapasitas PLTS yang dianalisis pada penelitian ini terbatas pada kapasitas eksisting sebesar 50,6 kWp. Yang kedua data inventori diukur berdasarkan data logbook operasional yang sangat dipengaruhi kondisi operasi, periode pengamatan, dan kualitas pencatatan data. Ketiga keterbatasan terhadap proses hulu, maka yang digunakan dalam analisis ini berbasis pada software SimaPro versi 9.0 dan data ecoinvent sehingga terdapat ketidakpastian akibat perbedaan kondisi teknologi dan geografis. Keterbatasan yang keempat adalah analisis berfokus pada aspek lingkungan, perlu penelitian lanjutan untuk dapat diintegrasikan dengan analisis LCA dengan analisis ekonomi dan ketidakpastian agar penilaian lebih komprehensif.

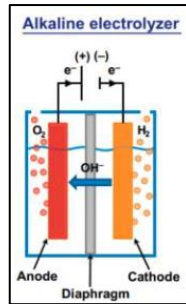
Metode Penelitian

Untuk menganalisis pada aspek lingkungan digunakan pendekatan *life cycle assessment* dengan batasan sistem *cradle to gate* pada proses produksi hidrogen di PLTGU Gresik. Teknologi yang digunakan untuk memproduksi hidrogen adalah teknologi elektrolisis air atau *Alkaline Electrolizer (AEL)* buatan *Hydrogenics* dengan tipe HySTAT A1000-S15-10 yang berkapasitas 15 Nm³/h atau 1,4 kg H₂ per jam pada kondisi normal operasi dengan tampilan proses seperti Gambar 4.



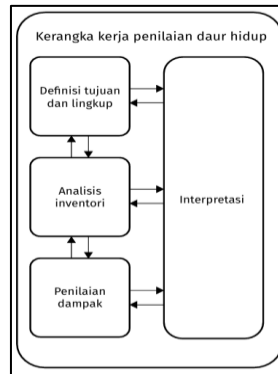
Gambar 4. Proses Produksi hidrogen dengan teknologi AEL di PLTGU Gresik[25]

Tipe HySTAT A1000-S15-10 ini memiliki 90 cell stack yang beroperasi dengan tegangan 152 VDC dan arus sebesar 403 A. *Specific consumption* untuk memproduksi hidrogennya sebesar 4,115 kWh/Nm³. Sistem ini membutuhkan daya listrik sekitar 120 kVA, 50 Hz dengan kendali *Power System Controller*[25]. Teknologi ini cukup klasik, proses produksi hidrogen ini menggunakan katalis elektrolit basa seperti KOH dengan konsentrasi 20-30% untuk memproduksi hidrogen. Pada teknologi ini proses produksi listrik dilakukan pada temperatur 60-80 °C. Seperti pada Gambar 5, sistem ini menggunakan air demineral sebagai bahan baku dan dimasukkan pada cell.



Gambar 5. Proses Produksi hidrogen Alkaline Electrolyzer[26]

Pada cell terdapat eletroda yang diinjeksi dengan energi listrik bertegangan sedang akan terendam dalam cairan katalis yang dipisahkan oleh diafragma. Diafragma ini berfungsi untuk memisahkan gas hidrogen dan oksigen yang dihasilkan. Sederhananya, pada kutub katoda molekul air H₂O akan tereduksi menerima elektron dan menghasilkan gas hidrogen dan ion hidroksida (OH⁻). Ion hidroksida tersebut akan mengalir ke sisi anoda melalui elektrolit dan diafragma. Pada sisi anoda ion tersebut akan teroksidasi menghasilkan gas oksigen dan melepas elektron. Teknologi AEL ini sangat mengandalkan katalis eletrolit dan material elektrodanya. Sehingga biaya investasi pada teknologi ini cenderung relatif murah [26], [27]. *Life cycle assessment* dilakukan sesuai standar ISO 14040 seperti kerangka pada Gambar 6 berikut:



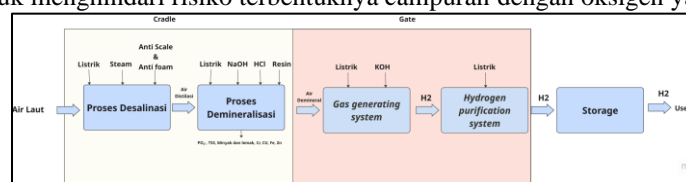
Gambar 6. Framework life cycle assessment[28]

Metode *life cycle assessment* dilakukan dengan mengukur dampak lingkungan yang ditimbulkan dari proses produksi gas hidrogen dengan dua skenario sebagai upaya menurunkan dampak lingkungan di PLTGU Gresik yaitu:

1. Skenario 1 (baseline): Proses produksi hidrogen dengan menggunakan 100% listrik PLN grid.
2. Skenario 2: Proses produksi hidrogen dengan menggunakan *hybrid* PLN-PLTS kapasitas 50,6 KWp.

Goal and scope adalah mengevaluasi dampak lingkungan dari proses produksi hidrogen yang dihasilkan dari sistem *green hydrogen* PLTGU Gresik. Unit fungsional yang digunakan adalah 1kg hidrogen yang diproduksi oleh *hydrogen plant*. Dengan *system boundary* mencakup *cradle to gate* seperti yang terlihat pada Gambar 7 meliputi:

- a. Desalinasi yaitu proses produksi air tawar yang diekstrak dari air laut melalui evaporator di *desalination plant* untuk memisahkan kandungan garam dan mineral yang terlarut dalam air dengan proses penguapan air laut dan dikondensasikan menjadi air distilasi [29].
- b. Demineralisasi adalah proses pemurnian air distilasi dari kandungan mineral dan ion yang terlarut dalamnya menggunakan metode *ion exchange* dengan media resin anion dan resin kation [30].
- c. *Gas Generating system* (GGS) yaitu proses pemisahan hidrogen dan oksigen dengan cara elektrolis air [26].
- d. *Hydrogen purification system* (HPS) merupakan proses pemurnian gas hidrogen dari kandungan oksigen dan uap air yang terbawa. Pada proses ini memastikan kemurnian berada pada level yang tinggi untuk menghindari risiko terbentuknya campuran dengan oksigen yang mudah terbakar[31].



Gambar 7. System Boundary proses produksi hidrogen PLTGU Gresik

Pada tahap kedua *life cycle inventory* yaitu tahap pengumpulan data berupa data input dan output pada setiap tahapan proses produksi hidrogen. Data inventori tersebut terdiri aliran input dan output pada setiap tahapan proses produksi hidrogen termasuk konsumsi listrik, bahan material dan emisi yang dihasilkan. Data inventori dikumpulkan dari logbook operasional, pemakaian bahan kimia, dan laporan kualitas limbah yang dikelola di PLN Nusantara Power UP Gresik[32]. Data inventori dimasukkan ke dalam model proses produksi hidrogen pada software SimaPro versi 9.0

Pada tahap ketiga dilakukan *life cycle impact assessment* yaitu pengelompokan dan penilaian dampak lingkungan dengan menggunakan software SimaPro dan metode ReCiPe 2016 Mindpoint(H). Pada setiap kategori dampak akan dilakukan perhitungan nilai karakteristik dampak sesuai dengan data inventori yang diinput ke model LCA yang dibuat. Untuk interpretasi hasil dilakukan dengan mengidentifikasi proses apa yang dampak lingkungannya paling tinggi (*hotspot*) untuk dilakukan evaluasi dan dianalisis antara skenario penggunaan energi listrik dari PLN dan skenario penggunaan *hybrid*.

Hasil Dan Pembahasan

Analisis Inventori dan komposisi penggunaan listrik

Data inventori pada penelitian ini diperoleh dari kombinasi data primer dan data sekunder. Data primer yaitu logbook operasional *hidrogen plant*, penggunaan listrik, penggunaan bahan kimia, kebutuhan air, data kualitas limbah, serta data produksi PLTS yang dikelola di PLTGU Gresik. Sedangkan data sekunder yaitu data proses hulu yang tidak diukur langsung dilokasi seperti proses produksi bahan kimia, produksi listrik grid PLN dan rantai pasok material PLTS dengan basis database SimaPro. Tabel 1 menunjukkan data inventori untuk memproduksi 1 kg H₂ di PLTGU Gresik. Secara umum, data inventori tersebut sangat dipengaruhi oleh penggunaan energi listrik serta kebutuhan air demineral sebagai bahan bahu utama dalam produksi hidrogen. Data inventori ini digunakan sebagai input output pada setiap tahapan dan akan menentukan kontribusi setiap tahapannya terhadap dampak lingkungan yang ditimbulkan.

Tabel 1. Data Inventori hydrogen plant PLTGU Gresik

Proses Desalinasi	
Input per kg H ₂	Output per kg H ₂
- Air Laut: 0,097459906 ton - Steam: 3,357143753 MJ - Listrik: 0,048475365 KWh - Anti foam: 0,000055450 kg - Anti Scale: 0,000197071kg	- Distilate water: 0,010238212 ton
Proses Demineralisasi	
Input per kg H ₂	Output per kg H ₂
- Air Distilasi: 0,010238212 ton - Listrik: 0,014750237 KWh - Makeup Resin: 0,000139354kg - NaOH: 0,000877217 kg - HCl: 0,000853991 kg	- Air Demineral: 0.01 ton - Limbah Cair: 0.00028212 ton - PO ₄ -: 0,00000014849 kg - TSS: 0,00000309676 kg - Minyak & Lemak: 0,00000119106 kg - Cr: 0,00000001167 kg - Cu: 0,00000003573 kg - Fe: 0,00000004526 kg - Zn: 0,00000003732 kg
Generating Gas System (GGS)	
Input per kg H ₂	Output per kg H ₂
- Air Demineral: 0.01 ton - Listrik: 45.77 KWh - KOH: 0,0000197 kg	- Hidrogen: 1 kg
Hydrogen Purification System (HPS)	
Input per kg H ₂	Output per kg H ₂
- Hidrogen: 1 kg - Listrik: 2,9732427 KWh	- Hidrogen: 1 kg
PLTS	
Listrik yang dihasilkan: 7,49 kWh per kg H₂	

Dari komposisi inventori diatas menjelaskan bahwa total kebutuhan listrik dari seluruh proses produksi hidrogen mencapai 48,8 kWh per kg H₂. Proses elektrolisis air pada alat *Gas Generating System* (GGS) menggunakan 93,8 % dari total *hydrogen plant*, proses *Hydrogen Purification System* (HPS) sebesar 6,1%

sedangkan proses desalinasi air dan demineralisasi air masing-masing hanya sebesar 0,1% dan 0,03% seperti yang terlihat pada Tabel 2. Dominasi penggunaan listrik di GGS menegaskan bahwa proses ini titik kritis utama dalam perbaikan kinerja lingkungan proses produksi hidrogen. Pada program dekarbonisasi perlu dievaluasi pada sisi optimasi efisiensi *electrolizer*, pengendalian kondisi operasi yang optimal, pemeliharaan cell stack, evaluasi specific energi consumption aktual. Selain itu, alternatif teknis lain yang dapat dipertimbangkan adalah menambah kapasitas penggunaan sumber eneri dari *renewable energy* khususnya penambahan PLTS. Dengan fokus perbaikan konsumsi listrik di GGS dapat menurunkan emisi dan dampak lingkungan yang muncul. Pada skenario *hybrid* data inventori PLTS pada Tabel 1 menerangkan bahwa pada PLTS akan mensubstitusi energi listrik sebesar 7,49 kWh per kg H₂ pada proses produksi hidrogen atau setara 15,35% dari total kebutuhan listrik di seluruh proses produksi hidrogen yang digunakan. Secara keseluruhan terlihat bahwa intensitas pemakaian listrik merupakan hotspot pada seluruh proses produksi H₂ dibandingkan dengan utilitas air.

Tabel 2. Kontribusi tahap proses produksi terhadap pemakaian listrik total

Tahapan Proses	Listrik (kWh/kg H ₂)	Share Listrik (%)
GGS	45,773	93,8%
HPS	2,973	6,1%
Desalinasi	0,0484	0,1%
Demineralisasi	0,0147	0,03%
Total	48,8095	100%

Analisis dampak lingkungan hydrogen plant

Penilaian dilakukan dengan mengkonversi data inventori *hydrogen plant* di PLTGU Gresik menjadi indikator dampak pada proses tahapan kerakterisasi dan normalisasi. Karakterisasi dilakukan pada masing-masing input dan output dari proses produksi. Kontribusi dampak pada setiap proses diukur dan dibandingkan hasilnya. Penilaian karekterisasi yang didapat dari proses produksi hidrogen di PLTGU Gresik dengan software SimaPro dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Kontribusi karakterisasi skenario sumber energi baseline

Impact category	Unit	Proses Desalinasi	Proses Demineralisasi	Gas Generating System	Hydrogen Purification System
<i>Global warming</i>	kg CO ₂ eq	0,49362894	0,020308266	54,183334	3,5182175
<i>Stratospheric ozone depletion</i>	kg CFC11 eq	6,0793E-08	6,04048E-09	1,20408E-05	7,81733E-07
<i>Ionizing radiation</i>	kBq Co-60 eq	0,003067194	0,000240414	0,085189149	0,005517738
<i>Ozone formation, Human health</i>	kg NO _x eq	0,00076692	5,31014E-05	0,14357675	0,009322733
<i>Fine particulate matter formation</i>	kg PM _{2.5} eq	0,001687483	0,000400089	1,2241301	0,079488771
<i>Ozone formation, Terrestrial ecosystems</i>	kg NO _x eq	0,000810609	5,38066E-05	0,1452832	0,009433531
<i>Terrestrial acidification</i>	kg SO ₂ eq	0,001216557	6,70924E-05	0,17664911	0,011470073
<i>Freshwater eutrophication</i>	kg P eq	0,000152646	3,22323E-05	0,096310666	0,006253874
<i>Marine eutrophication</i>	kg N eq	1,18415E-05	1,99715E-06	0,005894656	0,000382764
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	kg 1,4-DCB	1,5002834	0,022895792	33,330429	2,1635108
<i>Freshwater ecotoxicity</i>	kg 1,4-DCB	0,005191004	0,000985935	2,5855202	0,16788117
<i>Marine ecotoxicity</i>	kg 1,4-DCB	0,007780071	0,001394813	3,5316488	0,22931142
<i>Human carcinogenic toxicity</i>	kg 1,4-DCB	0,012877714	0,001759503	4,9167572	0,31925904
<i>Human non-carcinogenic toxicity</i>	kg 1,4-DCB	0,20145231	0,034635603	97,312111	6,3187653
<i>Land use</i>	m ² a crop eq	0,002900851	0,00010215	0,13482391	0,008750898
<i>Mineral resource scarcity</i>	kg Cu eq	0,000214104	1,63456E-05	0,019420448	0,001260401
<i>Fossil resource scarcity</i>	kg oil eq	0,13506509	0,005033478	13,300393	0,86361435
<i>Water consumption</i>	m ³	0,000603658	0,000133958	0,17917397	0,011629718

Secara total, hasil karakterisasi menunjukkan bahwa keseluruhan proses menghasilkan *global warming potential* sebesar 58,21 kg CO₂ eq/kg H₂, *fossil resource scarcity* sebesar 14,3 kg oil eq dan *fine particulate matter formation* sebesar 1,305 kg PM_{2.5} eq. Selain itu dampak yang cukup menonjol pada hasil karakterisasi terdapat kategori *human non-carcinogenic toxicity*, *terrestrial acidification*, *freshwater eutrophication*, dan kelompok kategori toksisitas. Dari pola yang ada menunjukkan profil lingkungan dari proses produksi hidrogen di PLTGU Gresik sangat dipengaruhi oleh pemakaian listrik pada proses elektrolisis di tahap GGS. Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan listrik merupakan faktor penggerak yang utama dari variasi hasil *life cycle assessment* dengan tipe *hydrogen plant Alkaline Electrolizer*. Skenario produksi H₂ berbasis grid PLN menghasilkan dampak iklim yang tinggi dengan kebutuhan listrik *hydrogen plant* PLTGU Gresik yang mencapai 48,80 kWh/kg H₂. Studi Maniscalco et al., (2024) menunjukkan bahwa hidrogen yang menggunakan sumber energi terbarukan memiliki dampak potensi global warming sekitar 2 kg CO₂ eq/kg H₂ dibandingkan dengan dengan *hydrogen plant* yang menggunakan energi grid energi fosil hingga 40 CO₂ eq/kg H₂. Perbedaan

yang signifikan terjadi pada hasil dampak lingkungan *hydrogen plant* PLTGU Gresik yang menunjukkan bahwa isu yang penting pada proses ini intensitas karbon yang dihasilkan sebagai sumber utama proses produksi hidrogen termasuk penggunaan bahan bakar fosil yang masih berkontribusi besar dalam produksi listrik di Indonesia khususnya di Jamali grid [17].

Hasil normalisasi kategori dampak lingkungan pada skenario baseline menunjukkan bahwa kategori yang perlu diperhatikan bukan hanya *global warming* tetapi juga dampak *human Carcinogenic toxicity, fresh water eutrophication, freshwater ecotoxicity, mariner ecotoxicity, dan fine particulate matter formation* karena kategori dampak tersebut berkontribusi signifikan pada profil produksi hidrogen di PLTGU Gresik seperti pada Tabel 4. Dari hasil normalisasi tersebut menunjukkan bahwa beban lingkungan yang dari proses *hydrogen plant* di PLTGU Gresik tidak hanya ditentukan oleh konsumsi energi tetapi juga berpotensi terhadap penurunan kualitas lingkungan pada kategori non iklim yang ditimbulkan dari penggunaan bahan kimia yaitu kelompok dampak toksisitas, penggunaan sumber daya dan dampak berbasis material. Pola ini sejalan dengan studi terbaru yang menunjukkan transisi hidrogen rendah karbon tetap perlu dievaluasi secara menyeluruh pada berbagai dampak lingkungan yang ditimbulkan [19], [34]

Tabel 4. Nilai skor normalisasi dampak lingkungan hydrogen plant PLTGU Gresik skenario baseline

Impact category	Proses Desalinasi	Proses Demineralisasi	GGG	HPS	Total
Human carcinogenic toxicity	0,001250426	0,000170848	0,47741712	0,031000053	0,509838447
Freshwater eutrophication	0,000235075	4,96377E-05	0,14831843	0,009630966	0,158234109
Freshwater ecotoxicity	0,000206083	3,91416E-05	0,10264515	0,006664883	0,109555257
Marine ecotoxicity	0,000178942	3,20807E-05	0,081227923	0,005274163	0,086713108
Fine particulate matter formation	6,59806E-05	1,56435E-05	0,047863487	0,003108011	0,051053122
Fossil resource scarcity	0,000137766	5,13415E-06	0,013566401	0,000880887	0,014590188
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	4,56373E-05	3,02931E-06	0,008179444	0,000531108	0,008759218
Ozone formation, Human health	3,72723E-05	2,58073E-06	0,00697783	0,000453085	0,007470768
Global warming	6,17036E-05	2,53853E-06	0,006772917	0,000439777	0,007276936
Terrestrial acidification	2,9684E-05	1,63706E-06	0,004310238	0,00027987	0,004621429
Human non-carcinogenic toxicity	6,44647E-06	1,10834E-06	0,003113988	0,0002022	0,003323743
Terrestrial ecotoxicity	9,87186E-05	1,50654E-06	0,002193142	0,000142359	0,002435726
Marine eutrophication	2,5696E-06	4,33381E-07	0,00127914	8,30599E-05	0,001365203
Water consumption	2,26372E-06	5,02344E-07	0,000671902	4,36114E-05	0,00071828
Stratospheric ozone depletion	1,01525E-06	1,00876E-07	0,000201082	1,30549E-05	0,000215253
Ionizing radiation	6,37976E-06	5,00061E-07	0,000177193	1,14769E-05	0,00019555
Land use	4,69938E-07	1,6548E-08	2,18415E-05	1,41765E-06	2,37456E-05
Mineral resource scarcity	1,78349E-09	1,36159E-10	1,61772E-07	1,0499E-08	1,74191E-07
Total Skor Normalisasi keseluruhan dampak skenario baseline					0,966390258

Dari Gambar 8. mengindikasikan pada *hotspot* terjadi pada proses *Gas Generating system* pada hampir dari semua kategori dampak. Kontribusi unit proses GGS berkisar antara 90% hingga 93.75% terhadap masing-masing kategori dampak pada setiap kategori dampak seperti yang terlihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Kontribusi tahapan proses terhadap setiap kategori dampak skenario baseline

Impact category	Proses Desalinasi	Proses Demineralisasi	GGG	HPS
Human carcinogenic toxicity	0,25%	0,03%	93,64%	6,08%
Freshwater eutrophication	0,15%	0,03%	93,73%	6,09%
Freshwater ecotoxicity	0,19%	0,04%	93,69%	6,08%
Marine ecotoxicity	0,21%	0,04%	93,67%	6,08%
Fine particulate matter formation	0,13%	0,03%	93,75%	6,09%
Fossil resource scarcity	0,94%	0,04%	92,98%	6,04%
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	0,52%	0,03%	93,38%	6,06%
Ozone formation, Human health	0,50%	0,03%	93,40%	6,06%
Global warming	0,85%	0,03%	93,07%	6,04%
Terrestrial acidification	0,64%	0,04%	93,27%	6,06%
Human non-carcinogenic toxicity	0,19%	0,03%	93,69%	6,08%
Terrestrial ecotoxicity	4,05%	0,06%	90,04%	5,84%
Marine eutrophication	0,19%	0,03%	93,70%	6,08%
Water consumption	0,32%	0,07%	93,54%	6,07%
Stratospheric ozone depletion	0,47%	0,05%	93,42%	6,06%
Ionizing radiation	3,26%	0,26%	90,61%	5,87%
Land use	1,98%	0,07%	91,98%	5,97%
Mineral resource scarcity	1,02%	0,08%	92,87%	6,03%

Kontribusi terbesar kedua adalah pada proses HPS yang menyumbang 5,84% hingga 9,09% pada sebagian besar kategori. Dominasi dari kedua proses ini konsisten dengan hasil inventori yang menunjukkan bahwa GGS merupakan unit dengan konsumsi listrik tertinggi. Sebaliknya proses desalinasi dan demineralisasi relatif kecil dampaknya terhadap total keseluruhan sistem. Berdasarkan keterkaitan antara inventori dan kontribusi proses maka prioritas perbaikan dapat dilakukan pada penggunaan listrik terutama pada proses elektrolisis (GGS).

Pengaruh integrasi PLTS, hotspot, dan implikasi operasional

Implementasi PLTS pada proses produksi hidrogen PLN Nusantara Power UP Gresik dilakukan dengan tujuan untuk menurunkan dampak *global warming potential* dan mendukung upaya dalam dekarbonisasi *hydrogen plant*. Dari perhitungan karakterisasi menggunakan SimaPro versi 9.0 maka dihasilkan nilai dampak dari skenario *hybrid* seperti pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil perhitungan karakterisasi dampak pada skenario hybrid PLN-PLTS 50 kWp

Impact category	Unit	Proses Desalinasi	Proses Demineralisasi	GGS	HPS
<i>Global warming</i>	kg CO2 eq	0,49362894	0,020308266	54,183334	3,5182175
<i>Stratospheric ozone depletion</i>	kg CFC11 eq	6,0793E-08	6,04048E-09	1,20408E-05	7,81733E-07
<i>Ionizing radiation</i>	kBq Co-60 eq	0,003067194	0,000240414	0,085189149	0,005517738
<i>Ozone formation, Human health</i>	kg NOx eq	0,00076692	5,31014E-05	0,14357675	0,009322733
<i>Fine particulate matter formation</i>	kg PM2.5 eq	0,001687483	0,000400089	1,2241301	0,079488771
<i>Ozone formation, Terrestrial ecosystems</i>	kg NOx eq	0,000810609	5,38066E-05	0,1452832	0,009433531
<i>Terrestrial acidification</i>	kg SO2 eq	0,001216557	6,70924E-05	0,17664911	0,011470073
<i>Freshwater eutrophication</i>	kg P eq	0,000152646	3,22323E-05	0,096310666	0,006253874
<i>Marine eutrophication</i>	kg N eq	1,18415E-05	1,99715E-06	0,005894656	0,000382764
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	kg 1,4-DCB	1,5002834	0,022895792	33,330429	2,1635108
<i>Freshwater ecotoxicity</i>	kg 1,4-DCB	0,005191004	0,000985935	2,5855202	0,16788117
<i>Marine ecotoxicity</i>	kg 1,4-DCB	0,007780071	0,001394813	3,5316488	0,22931142
<i>Human carcinogenic toxicity</i>	kg 1,4-DCB	0,012877714	0,001759503	4,9167572	0,31925904
<i>Human non-carcinogenic toxicity</i>	kg 1,4-DCB	0,20145231	0,034635603	97,312111	6,3187653
<i>Land use</i>	m2a crop eq	0,002900851	0,00010215	0,13482391	0,008750898
<i>Mineral resource scarcity</i>	kg Cu eq	0,000214104	1,63456E-05	0,019420448	0,001260401
<i>Fossil resource scarcity</i>	kg oil eq	0,13506509	0,005033478	13,300393	0,86361435
<i>Water consumption</i>	m3	0,000603658	0,000133958	0,17917397	0,011629718

Dari implementasi PLTS berkapasitas 50,6 kW di PLTGU Gresik menggantikan 15.39% dari seluruh penggunaan listrik pada proses produksi hidrogen yang selama ini menggunakan sumber listrik grid PLN. Integrasi ini dimaksudkan sebagai langkah awal dalam menurunkan dampak potensi *global warming* dari *hydrogen plant* melalui substitusi parsial pada penggunaan listrik pada tahap GGS. Hasil perhitungan karakterisasi menggunakan software SimaPro versi 9.0 menunjukkan beberapa dampak yang berkaitan dengan konsumsi listrik grid seperti *Global warming* turun sebesar 14,04% dari 58,21 menjadi 50,04 kg CO₂ eq. Selain menurunkan potersi *global warming* skenarion ini juga mempengaruhi kategori dampak yang lain seperti kategori *Fossil resource scarcity* turun sebesar 14% dari 14,30 menjadi 12,30 kg oil eq, *fine particulate matter formation*, turun sebesar 15,21%, *ozone formation, heman health* turun sekitar 14,06%, *freshwater eutrophication* turun 14,90% dan penurunan pada beberapa kategori dampak lainnya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 7. Perbandingan hasil karakterisasi antara skenario 1 (baseline) dan skenario 2

Impact category	Satuan	Tanpa PLTS	Dengan PLTS	Perubahan (%)
<i>Global warming</i>	kg CO2 eq	58,21548871	50,040176	14,04%
<i>Stratospheric ozone depletion</i>	kg CFC11 eq	1,28894E-05	1,11941E-05	13,15%
<i>Ionizing radiation</i>	kBq Co-60 eq	0,094014495	0,13280737	-41,26%
<i>Ozone formation, Human health</i>	kg NOx eq	0,153719504	0,132108	14,06%
<i>Fine particulate matter formation</i>	kg PM2.5 eq	1,305706442	1,1070474	15,21%
<i>Ozone formation, Terrestrial ecosystems</i>	kg NOx eq	0,155581147	0,13378312	14,01%
<i>Terrestrial acidification</i>	kg SO2 eq	0,189402833	0,16398164	13,42%
<i>Freshwater eutrophication</i>	kg P eq	0,102749419	0,087441133	14,90%
<i>Marine eutrophication</i>	kg N eq	0,006291259	0,005359531	14,81%
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	kg 1,4-DCB	37,01711899	52,0591	-40,64%
<i>Freshwater ecotoxicity</i>	kg 1,4-DCB	2,759578308	2,6166889	5,18%
<i>Marine ecotoxicity</i>	kg 1,4-DCB	3,770135104	3,5478415	5,90%
<i>Human carcinogenic toxicity</i>	kg 1,4-DCB	5,250653457	4,5329745	13,67%
<i>Human non-carcinogenic toxicity</i>	kg 1,4-DCB	103,8669642	90,489439	12,88%

<i>Land use</i>	m2a crop eq	0,146577809	0,14349458	2,10%
<i>Mineral resource scarcity</i>	kg Cu eq	0,020911298	0,027544619	-31,72%
<i>Fossil resource scarcity</i>	kg oil eq	14,30410592	12,30147	14,00%
<i>Water consumption</i>	m3	0,191541305	0,18030557	5,87%

Dari Tabel 7 menunjukkan dengan substitusi listrik dari PLTS secara parsial dapat menurunkan nilai kategori dampak dari proses produksi hidrogen plant di PLTGU Gresik. Sebagian besar kategori sensitif terhadap konsumsi listrik dari seluruh proses produksi hidrogen. Pola menunjukkan bahwa *green hydrogen* yang menggunakan sumber energi PLTS mampu menurunkan dampak lingkungan khususnya dampak potensi global warming yang ditimbulkan karena penggunaan listrik berbasis energi fosil, namun terdapat beberapa dampak yang mengalami kenaikan. Energi terbarukan adalah faktor kunci untuk menurunkan emisi gas rumah kaca pada siklus hidup proses produksi hidrogen melalui metode elektrolisis air. Dengan demikian, skenario yang dilakukan PLN Nusantara Power memperlihatkan bahwa substitusi parsial listrik PLN Grid dengan PLTS mampu menghasilkan perbaikan dampak lingkungan yang terukur, meskipun tidak memperbaiki secara keseluruhan. Terdapat 3 kategori dampak mengalami kenaikan nilai dampak seperti *ionizing radiation*, *terrestrial ecotoxicity* dan *mineral resource scarcity*. Dari hasil tersebut mengindikasikan *burden shifting*, yaitu terjadi perpindahan beban lingkungan pada suatu produk saat melakukan upaya dalam mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh produk tersebut. Hasil penilaian normalisasi pada skenario *hybrid* PLN-PLTS dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Nilai skor normalisasi skenario hybrid PLN-PLTS

Impact category	Proses Desalinasi	Proses Demineralisasi	GGS	HPS	Total
Human carcinogenic toxicity	0,001250426	0,000170848	0,4077305	0,031000053	0,440152
Freshwater eutrophication	0,000235075	4,96377E-05	0,12474367	0,009630966	0,134659
Freshwater ecotoxicity	0,000206083	3,91416E-05	0,096972443	0,006664883	0,103883
Marine ecotoxicity	0,000178942	3,20807E-05	0,07611517	0,005274163	0,0816
Fine particulate matter formation	6,59806E-05	1,56435E-05	0,04009592	0,003108011	0,043286
Fossil resource scarcity	0,000137766	5,13415E-06	0,011523712	0,000880887	0,012547
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	4,56373E-05	3,02931E-06	0,006952215	0,000531108	0,007532
Ozone formation, Human health	3,72723E-05	2,58073E-06	0,005927511	0,000453085	0,00642
Global warming	6,17036E-05	2,53853E-06	0,005751003	0,000439777	0,006255
Terrestrial acidification	2,9684E-05	1,63706E-06	0,003689961	0,00027987	0,004001
Human non-carcinogenic toxicity	6,44647E-06	1,10834E-06	0,002685907	0,0002022	0,002896
Terrestrial ecotoxicity	9,87186E-05	1,50654E-06	0,003182905	0,000142359	0,003425
Marine eutrophication	2,5696E-06	4,33381E-07	0,001076955	8,30599E-05	0,001163
Water consumption	2,26372E-06	5,02344E-07	0,000629768	4,36114E-05	0,000676
Stratospheric ozone depletion	1,01525E-06	1,00876E-07	0,00017277	1,30549E-05	0,000187
Ionizing radiation	6,37976E-06	5,00061E-07	0,000257883	1,14769E-05	0,000276
Land use	4,69938E-07	1,6548E-08	2,1342E-05	1,41765E-06	2,32E-05
Mineral resource scarcity	1,78349E-09	1,36159E-10	2,17028E-07	1,0499E-08	2,29E-07
Total Skor Normalisasi keseluruhan dampak					0,848983

Kategori *Ionizing radiation* dipengaruhi oleh tahap pemrosesan material aluminium pada saat proses produksi panel surya, sedangkan kategori dampak *Terrestrial ecotoxicity*, *Mineral resource scarcity* berkaitan dengan proses metallising dan penggunaan bahan mineral dalam proses pembuatan panel PLTS [20]. Ketiga kategori tersebut meningkat setelah integrasi PLTS. Modul PLTS yang digunakan di *hydrogen plant* PLTGU Gresik berbasis *monocrystalliner silicon* [35]. Sehingga dampak berasal dari produksi *silicon wafer*, *aluminium frame*, *copper*, *silver paste*, *solar glass material backsheet* serta energi yang digunakan selama proses manufaktur modul PV[36]. Peningkatan *mineral resource scarcity* berkaitan dengan kebutuhan material logam dan mineral pada sistem PLTS terutama pada silikon, aluminium, dan tembaga [36]. Peningkatan *terrestrial ecotoxicity* meningkat akibat dari proses ekstraksi mineral, *metallization*, pemurnian logam dan penggunaan material dan bahan kimia untuk mendukung produksi modul PV, Dalam ReCiPe 2016 kategori ini muncul dari emisi kimia pada rantai pasok material, bukan hanya dari proses produksi listriknya [37]. Sementara itu pada kategori *ionizing radiation* merepresentasikan kontribusi hulu dari *electricity mix* dan proses energi yang digunakan dalam proses manufaktur material yang diperhitungkan dalam LCA[37]. Meskipun PLTS mampu menekan *global warming potential*, namun tetap membawa konsekuensi lingkungan yang berbasis material dan rantai pasok dari panel surya yang digunakan.

Jika dibandingkan skor hasil normalisasi antara kedua skenario maka skor normalisasi pada *hydrogen plant* menurun dari skenario baseline sebesar 0,96 menjadi 0,84 pada skenario *hybrid* PLN-PLTS. Dengan demikian, integrasi PLN-PLTS pada sistem suplai energi listrik proses produksi hidrogen menurun sebesar 0,117point atau sekitar 12,15%. Hal ini menunjukkan skenario *hybrid* PLN-PLTS memberikan manfaat lingkungan dominan dibandingkan kondisi baseline. Dari jumlah kategori yang timbul, sebanyak 15 kategori dari total 18 kategori

dampak mengalami penurunan atau sekitar 83,3% dan 3 dari 18 kategori mengalami kenaikan atau sekitar 16,67% dari total keseluruhan kategori dampak. Secara keseluruhan hasil penilaian lingkungan skenario *hybrid* PLN-PLTS menunjukkan manfaat lingkungan yang lebih baik dibandingkan skenario baseline untuk tujuan penurunan emisi karbon sesuai dengan tujuan dekarbonisasi oleh PLN Nusantara Power. Dengan demikian langkah implementasi PLTS 50,6 kWp merupakan salah satu langkah awal yang tepat dan efektif untuk mendukung pengembangan program *green hydrogen*. Selain itu perlu dilakukan evaluasi terhadap efisiensi, perawatan elektroliser, dan pertimbangan penggunaan energi selain PLTS yang dapat meminimalkan *burden shifting* pada skenario penggunaan energi listrik.

Simpulan

Hasil data inventori dan penilaian daur hidup karakter dampak lingkungan *hydrogen plant* di PLTGU Gresik sangat intensif terhadap penggunaan listrik sekitar 48,80 kWh per kg H₂. Dari keseluruhan proses, tahapan *Gas Generating System* (GGS) mendominasi dalam konsumsi daya listrik dengan porsi sebesar 93,8% dari total kebutuhan listrik dalam produksi hidrogen. Dari hasil perhitungan menggunakan SimaPro versi 9.0 tahapan GGS adalah tahap yang konsisten menjadi *hotspot* utama pada hampir seluruh kategori dampak yang ditimbulkan.

Pada kondisi skenario baseline, dampak lingkungan yang ditimbulkan tidak hanya ditimbulkan dari kategori perubahan iklim tetapi juga berdampak pada kategori lainnya seperti toksisitas, partikulat, dan eutrofikasi. Hasil perhitungan normalisasi menjelaskan bahwa kategori yang tertinggi terdapat pada *human carcinogenic toxicity, freshwater eutrophication, freshwater ecotoxicity, marine ecotoxicity, dan fine particulate matter formation*. Temuan ini menunjukkan dampak yang ditimbulkan dari *hydrogen plant* dengan skenario tanpa PLTS perlu mempertimbangkan untuk mengevaluasi dampak selain dari *global warming potential* karena dampak yang lainnya juga muncul secara signifikan.

Upaya integrasi PLTS sebagai pengganti sumber daya listrik pada proses produksi hidrogen plant terbukti secara efektif dapat menurunkan dampak *global warming potential* sesuai dengan tujuan awal program ini dijalankan di PLTGU Gresik. Hasil dari kajian nilai kategori dampak *global warming* dapat ditekan sebesar 13,67% dengan substitusi daya listrik PLN ke PLTS sebesar 7,491 kWh per kg H₂ atau sekitar 15,35%. Walaupun hasil menunjukkan PLTS dapat menurunkan dampak iklim yang cukup signifikan. Namun tidak selalu diikuti penurunan pada kategori lainnya. Terjadi *burden shifting* sehingga dampak berpindah ke kategori seperti *ionizing radiation, terrestrial ecotoxicity, dan mineral resource scarcity*. Hal ini mengindikasikan adanya yang ditimbulkan akibat dari proses produksi panel surya. Skor hasil normalisasi antara skenario baseline sebesar 0,96 turun menjadi 0,84 pada skenario *hybrid* PLN-PLTS. Dengan demikian, integrasi PLN-PLTS dapat menurunkan sebesar 0,117point atau sekitar 12,15% dari keseluruhan kategori dampak. Hal ini menunjukkan skenario *hybrid* PLN-PLTS memberikan manfaat lingkungan dominan dibandingkan kondisi baseline.

Dari jumlah kategori yang timbul, sebanyak 15 kategori dari total 18 kategori dampak mengalami penurunan atau sekitar 83,3% dan 3 dari 18 kategori mengalami kenaikan atau sekitar 16,67% dari total keseluruhan kategori dampak. Secara keseluruhan hasil penilaian lingkungan skenario *hybrid* PLN-PLTS menunjukkan manfaat lingkungan yang lebih baik dibandingkan skenario baseline untuk tujuan penurunan emisi karbon sesuai dengan tujuan dekarbonisasi oleh PLN Nusantara Power. Dengan demikian langkah implementasi PLTS 50,6 kWp merupakan langkah awal yang tepat dan efektif untuk mendukung pengembangan program *green hydrogen*. Namun untuk kedepannya perlu mempertimbangkan kategori yang terdampak agar strategi dekarbonisasi bukan hanya mampu menurunkan emisi karbon namun juga dapat meminimalkan perpindahan beban lingkungan pada kategori yang lainnya.

Daftar Pustaka

- [1] N. P. Gillett *et al.*, "Constraining human contributions to observed warming since the pre-industrial period," *Nat. Clim. Chang.*, vol. 11, no. 3, pp. 207–212, Mar. 2021, doi: 10.1038/s41558-020-00965-9.
- [2] P. Friedlingstein *et al.*, "Global Carbon Budget 2024," *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 17, no. 3, pp. 965–1039, Mar. 2025, doi: 10.5194/essd-17-965-2025.
- [3] E. M. Fischer and R. Knutti, "Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes," *Nat. Clim. Chang.*, vol. 5, no. 6, pp. 560–564, Jun. 2015, doi: 10.1038/nclimate2617.
- [4] S. Connor *et al.*, "Climate Change 2021 : Summary For All," Intergovernmental Panel On Climate Change, 2022. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGI_SummaryForAll.pdf?ref=refind

- [5] C. F. Schlessner *et al.*, “Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal,” Aug. 25, 2016, *Nature Publishing Group*. doi: 10.1038/nclimate3096.
- [6] H. Susiati *et al.*, “Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir di Indonesia (Upaya Berkelanjutan Menuju Net Zero Emission),” 2023, *Zenodo*. doi: 10.5281/ZENODO.7905583.
- [7] IEA, “Global Hydrogen Review 2022,” Paris, 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>
- [8] G. Squadrito, G. Maggio, and A. Nicita, “The green hydrogen revolution,” *Renew. Energy*, vol. 216, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.119041.
- [9] A. Odenweller and F. Ueckerdt, “The green hydrogen ambition and implementation gap,” *Nat. Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 110–123, 2025, doi: 10.1038/s41560-024-01684-7.
- [10] K. ESDM, *Peraturan Menteri ESDM RI Nomor 10 Tahun 2025 Peta Jalan (Roadmap) Transisi Energi Sektor Ketenagalistrikan*. 2025. [Online]. Available: <https://jdih.esdm.go.id/dokumen/download?id=2025pmesdm10.pdf>
- [11] Menteri ESDM, “Pengesahan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT PLN Persero Tahun 2025 sampai dengan 2034,” 2025.
- [12] PLN, “PLN’s ESG Performance Report 2024 - Sustainability Related Financial Disclosure,” Jakarta, 2025.
- [13] A. Dwiyanto, M. Muflihun, M. A. Alfaturisya, and A. Suryana, “Evaluation of Impurities in Hydrogen Cooling System and Their Influence on Power Generation Efficiency at Pelabuhan Ratu Power Plant,” in *Proceedings of the International Conference on Consumer Technology and Engineering Innovation (ICONTENTION 2023)*, vol. 233, U. S. Saputri and M. A. S. Yudono, Eds., Dordrecht: Atlantis Press International BV, 2024, pp. 52–57. doi: 10.2991/978-94-6463-406-8_11.
- [14] W. Tong, “Numerical Analysis of Flow Field in Generator End-Winding Region,” *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2008, no. 1, p. 692748, 2008, doi: 10.1155/2008/692748.
- [15] M. Carcassi, “Deflagrations of H₂/air and CH₄/air lean mixtures in a vented multi-compartment environment,” *Energy*, vol. 30, no. 8, pp. 1439–1451, 2005, doi: 10.1016/j.energy.2004.02.012.
- [16] L. Kumar and A. K. Sleiti, “A comprehensive review of hydrogen safety through a metadata analysis framework,” May 01, 2025, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2025.115509.
- [17] R. Nugroho, J. Hanafi, K. Shobatake, Y. Y. Chun, K. Tahara, and W. W. Purwanto, “Life cycle inventories and life cycle assessment for an electricity grid network: case study of the Jamali grid, Indonesia,” *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 27, no. 8, pp. 1081–1091, Aug. 2022, doi: 10.1007/s11367-022-02082-5.
- [18] PT PLN (persero), “Operasikan Green Hydrogen Plant Pertama di Indonesia, Begini Inovasi yang Dilakukan PLN,” 2023. [Online]. Available: <https://web.pln.co.id/media/siaran-pers/2023/10/operasikan-green-hydrogen-plant-pertama-di-indonesia-begini-inovasi-yang-dilakukan-pln>
- [19] W. Ajeeb, R. Costa Neto, and P. Baptista, “Life cycle assessment of green hydrogen production through electrolysis: A literature review,” Sep. 01, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.seta.2024.103923.
- [20] V. Prasad and F. Khalid, “Solar to sustainability (S2S): a comparative life cycle assessment of hydrogen production with a focus on a photoelectrochemical anion exchange membrane reactor,” *RSC Sustainability*, vol. 3, no. 10, pp. 4651–4666, 2025, doi: 10.1039/D5SU00330J.
- [21] O. Kanz, K. Bittkau, K. Ding, U. Rau, and A. Reinders, “Review and Harmonization of the Life-Cycle Global Warming Impact of PV-Powered Hydrogen Production by Electrolysis,” *Frontiers in Electronics*, vol. 2, Sep. 2021, doi: 10.3389/felec.2021.711103.
- [22] Sansuadi and N. Mazidah, *Buku Statistik Ketenagalistrikan 2024 Edisi No.38*. Jakarta: Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, 2025. [Online]. Available: https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/91fa8-buku-statistik-ketenagalistrikan-2024.pdf
- [23] PLN NP UP Gresik, “Profil Perusahaan PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Gresik,” Gresik, 2025.
- [24] Pemerintah Republik Indonesia, “Undang-undang Republik Indonesia No. 7 Tahun 2021 Tentang Harmonisasi Peraturan Perpajakan.” Accessed: Apr. 28, 2026. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/185162/uu-no-7-tahun-2021>
- [25] Hydrogenics, *HySTAT Manual type HySTAT-15/10*. Belgium: Hydrogenics Europe N, 2011.
- [26] C. Coutanceau, S. Baranton, and T. Audichon, “Hydrogen Production From Water Electrolysis,” in *Hydrogen Electrochemical Production*, Elsevier, 2018, pp. 17–62. doi: 10.1016/B978-0-12-811250-2.00003-0.
- [27] S. Krishnan *et al.*, “Present and future cost of alkaline and PEM electrolyser stacks,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 83, pp. 32313–32330, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.031.
- [28] J. Hanafi, J. hermana, K. Siregar, E. Chairani, and M. Mufti Aziz, *Pedoman Penyusunan Laporan Penilaian Daur Hidup (LCA)*. Direktorat Jenderal Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan

- Lingkungan, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI, 2021. [Online]. Available: https://proper.menlhk.go.id/propercms/uploads/magazine/docs/buku/magazinePedoman_Penyusunan_Laporan_Penilaian_Daur_Hidup_2021.pdf
- [29] R. R. Chandwankar and J. Nowak, "Thermal Processes for Seawater Desalination: Multi-effect Distillation, Thermal Vapor Compression, Mechanical Vapor Compression, and Multistage Flash," in *Handbook of Water and Used Water Purification*, J. Lahnsteiner, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2024, pp. 465–502. doi: 10.1007/978-3-319-78000-9_116.
- [30] I. Gunawan, "Analisa Kegagalan Proses Regenerasi Water Treatment Plant # 2 PLTGU UP Gresik Dengan Metode FMEA DAN FTA (Studi Kasus di PT PJB UP. GRESIK)," Universitas Muhammadiyah Gresik, Gresik, 2017.
- [31] T. Kim, Y. Song, J. Kang, S. K. Kim, and S. Kim, "A review of recent advances in hydrogen purification for selective removal of oxygen: Deoxo catalysts and reactor systems," Jul. 12, 2022, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.05.221.
- [32] PLN Nusantara Power UP Gresik, "Laporan Operasional harian PLTGU Gresik 2026 [Dokumen Internal tidak dipublikasikan]," Gresik, 2026.
- [33] M. P. Maniscalco, S. Longo, M. Cellura, G. Micciché, and M. Ferraro, "Critical Review of Life Cycle Assessment of Hydrogen Production Pathways," *Environments*, vol. 11, no. 6, p. 108, 2024, doi: 10.3390/environments11060108.
- [34] J. Wilkinson, T. Mays, and M. McManus, "Review and meta-analysis of recent life cycle assessments of hydrogen production," Jun. 01, 2023, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.cesys.2023.100116.
- [35] Trina Solar, "Mono Multi Solutions 0~+5W Comprehensive Products and System Certificates," Gresik, 2020. [Online]. Available: www.trinasolar.com
- [36] Rolf Frischknecht, Philippe Stolz, Luana Krebs, and Mariska de Wild-Scholten, *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems*. IEA-PVPS, 2020. doi: 10.13140/RG.2.2.17977.19041.
- [37] M. A. J. Huijbregts *et al.*, "ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 2, pp. 138–147, 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1246-y.