



## Kelebihan dan Kekurangan Teknologi Hidrogen sebagai Energi Terbarukan yang Ramah Lingkungan

Bagustianto Adipati<sup>1\*</sup>, M. Fikri Adrian<sup>2</sup>, Adnan Kurniawan<sup>3</sup>, Rahmat Riski<sup>4</sup>, Tri Prasetia Utama<sup>5</sup>

<sup>1-5</sup> Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan, Indonesia  
email: [adipatibagustianto97@gmail.com](mailto:adipatibagustianto97@gmail.com)<sup>1</sup>

### Article Info :

Received:  
26-02-2026  
Revised:  
21-03-2026  
Accepted:  
11-04-2026

### Abstract

*The global energy transition necessitates the development of sustainable and low-emission energy systems, positioning hydrogen as a strategic energy carrier with significant potential. This study aims to critically evaluate the advantages and limitations of hydrogen technology as an environmentally friendly renewable energy source through a systematic qualitative synthesis approach. The findings indicate that hydrogen offers key advantages, including high energy density by mass, operational zero-emission characteristics, and flexibility in production from diverse renewable sources. However, these strengths are constrained by systemic challenges such as low energy conversion efficiency, complex and costly infrastructure for storage and distribution, and environmental impacts that depend heavily on production pathways. Lifecycle-based analysis reveals that hydrogen's sustainability is conditional upon the use of renewable energy inputs. Furthermore, policy frameworks, green financing mechanisms, and technological innovations in materials and catalysis are essential to enhance feasibility and scalability. The study concludes that hydrogen should be positioned as a complementary component within integrated energy systems, requiring multidimensional evaluation to support effective and evidence-based energy transition strategies.*

**Keywords:** Hydrogen, Renewable Energy, Energy Efficiency, Decarbonization, Energy Systems.

### Abstrak

Transisi energi global menuntut pengembangan sistem energi yang berkelanjutan dan rendah emisi, sehingga menempatkan hidrogen sebagai pembawa energi strategis dengan potensi yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi secara kritis kelebihan dan keterbatasan teknologi hidrogen sebagai sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan melalui pendekatan sintesis kualitatif sistematis. Temuan menunjukkan bahwa hidrogen menawarkan keunggulan utama, termasuk kepadatan energi yang tinggi berdasarkan massa, karakteristik operasional tanpa emisi, dan fleksibilitas dalam produksi dari berbagai sumber terbarukan. Namun, kekuatan ini dibatasi oleh tantangan sistemik seperti efisiensi konversi energi yang rendah, infrastruktur penyimpanan dan distribusi yang kompleks dan mahal, serta dampak lingkungan yang sangat bergantung pada jalur produksi. Analisis berbasis siklus hidup mengungkapkan bahwa keberlanjutan hidrogen bergantung pada penggunaan masukan energi terbarukan. Selain itu, kerangka kebijakan, mekanisme pembiayaan hijau, dan inovasi teknologi dalam bahan dan katalisis sangat penting untuk meningkatkan kelayakan dan skalabilitas. Studi ini menyimpulkan bahwa hidrogen harus diposisikan sebagai komponen pelengkap dalam sistem energi terintegrasi, yang memerlukan evaluasi multidimensi untuk mendukung strategi transisi energi yang efektif dan berbasis bukti.

**Kata Kunci:** Hidrogen, Energi Terbarukan, Efisiensi Energi, Dekarbonisasi, Sistem Energi.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## PENDAHULUAN

Krisis energi global kontemporer ditandai oleh eskalasi permintaan energi yang beriringan dengan tekanan dekarbonisasi lintas sektor, sehingga mendorong akselerasi inovasi pada teknologi energi bersih yang mampu mengintegrasikan aspek keberlanjutan lingkungan, efisiensi sistem, dan keamanan pasokan dalam satu kerangka transisi energi yang koheren; dalam lanskap ini, hidrogen muncul sebagai kandidat strategis karena sifatnya sebagai *energy carrier* yang fleksibel dan berpotensi rendah emisi ketika diproduksi melalui sumber terbarukan, sejalan dengan agenda transformasi menuju ekonomi hijau yang semakin diprioritaskan dalam kebijakan energi global (Dewi, 2023; Mahendra et al., 2024). Dinamika tersebut diperkuat oleh inisiatif nasional seperti peta jalan hidrogen yang menegaskan peran hidrogen dalam bauran energi masa depan serta integrasinya dalam sistem industri

dan transportasi rendah karbon, yang secara simultan merefleksikan pergeseran paradigma dari ketergantungan pada energi fosil menuju sistem energi berbasis inovasi teknologi berkelanjutan (Energy & Riset, 2023; Heriyanto et al., 2025).

Literatur terdahulu menunjukkan konsensus parsial bahwa teknologi hidrogen memiliki keunggulan struktural dalam hal kepadatan energi tinggi dan emisi operasional yang minimal, khususnya ketika digunakan dalam sistem *fuel cell* yang hanya menghasilkan air sebagai produk samping, sehingga menempatkannya sebagai solusi potensial untuk sektor dengan kebutuhan energi intensif (Dewi, 2023; Mahendra et al., 2024). Namun, sintesis kritis atas temuan empiris mengindikasikan bahwa keunggulan tersebut sangat bergantung pada metode produksi, di mana hidrogen yang dihasilkan melalui proses elektrokimia berbasis energi terbarukan menunjukkan performa lingkungan yang jauh lebih unggul dibandingkan metode berbasis bahan bakar fosil, yang masih menyisakan jejak karbon signifikan (Komaril & Sudarman, 2022; Rumahorbo & Nursadi, 2023). Penelitian dalam bidang material dan katalisis juga memperlihatkan bahwa efisiensi produksi hidrogen sangat dipengaruhi oleh inovasi katalis, seperti penggunaan ZnO, WO<sub>3</sub>, dan *metal-organic frameworks*, yang mampu meningkatkan reaktivitas namun masih menghadapi kendala stabilitas dan biaya (Dinanti et al., 2025).

Meskipun demikian, literatur yang ada memperlihatkan fragmentasi konseptual dan inkonsistensi empiris, terutama dalam mengintegrasikan dimensi teknis, ekonomi, dan lingkungan secara simultan dalam evaluasi teknologi hidrogen, sehingga menghasilkan kesimpulan yang parsial dan kontekstual; sebagian studi menekankan keunggulan lingkungan tanpa mempertimbangkan biaya siklus hidup, sementara studi lain menyoroti kendala ekonomi tanpa mengelaborasi potensi inovasi teknologi jangka panjang (Mahendra et al., 2024; Nugraha & Sopandi, 2022). Keterbatasan lain muncul pada kurangnya pendekatan komparatif yang sistematis antara hidrogen dan teknologi energi alternatif seperti baterai, sehingga ruang analisis terkait trade-off efisiensi, penyimpanan, dan dampak lingkungan belum tergarap secara komprehensif (Rumahorbo & Nursadi, 2023). Celah ini menunjukkan bahwa diskursus ilmiah masih terfragmentasi dan belum mampu menghasilkan kerangka evaluasi yang holistik terhadap posisi hidrogen dalam sistem energi masa depan.

Ketidakterpaduan tersebut memperkuat urgensi ilmiah untuk mengembangkan analisis yang tidak hanya deskriptif tetapi juga evaluatif terhadap kelebihan dan kekurangan teknologi hidrogen dalam perspektif sistemik, mengingat implikasi praktisnya sangat signifikan terhadap perumusan kebijakan energi, investasi infrastruktur, serta arah inovasi teknologi di tingkat global maupun nasional (Energy & Riset, 2023; Heriyanto et al., 2025). Tanpa pemahaman yang komprehensif, terdapat risiko misalokasi sumber daya dalam pengembangan teknologi energi, yang pada akhirnya dapat menghambat pencapaian target dekarbonisasi dan keberlanjutan lingkungan yang telah ditetapkan dalam berbagai agenda internasional (Dewi, 2023; Mahendra et al., 2024).

Dalam konteks tersebut, penelitian ini memposisikan diri sebagai upaya konseptual kritis yang mengintegrasikan berbagai dimensi analisis meliputi efisiensi energi, sistem penyimpanan, fleksibilitas penggunaan, dan dampak lingkungan untuk mengevaluasi secara komprehensif teknologi hidrogen sebagai energi terbarukan, sekaligus membandingkannya dengan teknologi baterai sebagai representasi alternatif dominan dalam sistem energi modern (Komaril & Sudarman, 2022; Dinanti et al., 2025). Pendekatan ini diharapkan mampu menjembatani kesenjangan antara analisis teknis dan kebijakan dengan menghadirkan sintesis yang lebih utuh terhadap posisi strategis hidrogen dalam lanskap inovasi energi (Nugraha & Sopandi, 2022; Rumahorbo & Nursadi, 2023).

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara mendalam kelebihan dan kekurangan teknologi hidrogen sebagai energi terbarukan yang ramah lingkungan melalui pendekatan analisis literatur yang sistematis dan komparatif, serta memberikan kontribusi teoretis dalam pengembangan kerangka evaluasi multidimensional terhadap teknologi energi dan kontribusi metodologis melalui integrasi analisis konseptual dengan pendekatan komparatif lintas teknologi guna memperkuat basis pengambilan keputusan dalam pengembangan sistem energi berkelanjutan.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dikonstruksikan sebagai studi non-empiris berbasis pendekatan kualitatif konseptual dengan mengembangkan kerangka analitis multidimensional yang mengintegrasikan perspektif teknologi, lingkungan, dan sistem energi dalam mengevaluasi kelebihan serta kekurangan teknologi hidrogen sebagai energi terbarukan. Model konseptual yang digunakan tidak sekadar bersifat

deskriptif, melainkan dirancang sebagai kerangka sintesis yang menghubungkan karakteristik intrinsik hidrogen (kepadatan energi, sifat kimia, dan fleksibilitas sebagai *energy carrier*) dengan variabel sistemik seperti efisiensi produksi, kompleksitas infrastruktur, dan implikasi lingkungan sepanjang siklus hidup teknologi. Kerangka ini diperkuat dengan integrasi perspektif kebijakan melalui rujukan strategis terhadap roadmap pengembangan hidrogen nasional yang menekankan keterkaitan antara inovasi teknologi dan arah transisi energi makro (Energy & Riset, 2023), serta dimensi teknis-infrastruktur yang menyoroti dinamika penyimpanan, distribusi, dan kesiapan sistem pendukung dalam ekosistem hidrogen (Rosyid & Oktaufik, 2009). Pendekatan ini menghasilkan konstruksi teoretis yang bersifat holistik dan memungkinkan analisis tidak hanya pada tingkat komponen teknologi, tetapi juga pada tingkat sistem energi secara keseluruhan.

Prosedur analitis dilakukan melalui teknik *systematic qualitative synthesis* yang mengombinasikan *thematic analysis*, *comparative evaluation*, dan *conceptual mapping* terhadap literatur ilmiah terindeks, laporan kebijakan, serta dokumen teknis yang relevan, sehingga menghasilkan integrasi argumen yang koheren dan berbasis bukti. Tahapan analisis dimulai dari proses seleksi literatur menggunakan kriteria inklusi berbasis relevansi tematik dan kredibilitas sumber, dilanjutkan dengan proses pengodean konseptual untuk mengidentifikasi pola keunggulan dan keterbatasan teknologi hidrogen, serta diakhiri dengan sintesis komparatif terhadap teknologi alternatif seperti baterai dalam dimensi efisiensi energi, penyimpanan, dan dampak lingkungan. Ketahanan metodologis dijaga melalui triangulasi sumber dan pendekatan analisis lintas perspektif yang meminimalkan bias interpretatif, sementara keunikan metodologi terletak pada integrasi simultan antara analisis teknis, ekologis, dan kebijakan dalam satu kerangka evaluasi yang jarang dilakukan secara komprehensif dalam studi sejenis, sehingga menghasilkan kontribusi analitis yang lebih mendalam dan berorientasi pada pengambilan keputusan strategis dalam pengembangan energi berkelanjutan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik Teknologi Hidrogen dalam Kerangka Energi Berkelanjutan

Analisis konseptual menunjukkan bahwa hidrogen memiliki posisi unik sebagai *energy carrier* yang mampu menghubungkan berbagai sumber energi primer dengan sistem konsumsi akhir secara fleksibel. Karakteristik ini tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga sistemik karena memungkinkan integrasi lintas sektor energi dalam satu ekosistem terkoordinasi. Dalam kerangka transisi energi, peran ini memperkuat argumentasi bahwa hidrogen bukan sekadar sumber energi alternatif, melainkan komponen strategis dalam arsitektur energi masa depan (Alnavis et al., 2024). Perspektif ini selaras dengan pendekatan multidimensional yang digunakan dalam penelitian non-empiris berbasis sintesis literatur.

Dari sisi sifat fisik dan kimia, hidrogen memiliki kepadatan energi spesifik yang tinggi yang memberikan keunggulan signifikan dalam aplikasi berbasis massa. Namun, kepadatan energi volumetriknya rendah sehingga menimbulkan konsekuensi teknis pada aspek penyimpanan dan distribusi. Analisis literatur menunjukkan bahwa dualitas ini menciptakan trade-off antara efisiensi energi dan kompleksitas infrastruktur (Hasan & Widayat, 2022). Interpretasi ini memperkuat pentingnya pendekatan sistemik dalam mengevaluasi teknologi hidrogen.

Kerangka konseptual yang digunakan mengidentifikasi bahwa fleksibilitas produksi hidrogen menjadi salah satu faktor pembeda utama dibandingkan teknologi energi lain. Hidrogen dapat dihasilkan dari berbagai sumber seperti energi surya, angin, hingga biomassa, yang memberikan diversifikasi sumber energi secara signifikan. Kondisi ini memperluas peluang implementasi di berbagai wilayah dengan karakteristik sumber daya yang berbeda (Ma'arif & Kulla, 2024). Fleksibilitas ini menjadi elemen kunci dalam meningkatkan ketahanan energi nasional.

Analisis tematik juga menunjukkan bahwa teknologi hidrogen memiliki keterkaitan erat dengan perkembangan inovasi material dan katalis. Penggunaan katalis berbasis material maju seperti ZnO, WO<sub>3</sub>, dan MOF berkontribusi dalam meningkatkan efisiensi reaksi produksi hidrogen. Inovasi ini memperlihatkan bahwa kemajuan teknologi hidrogen tidak dapat dipisahkan dari perkembangan ilmu material (Dinanti et al., 2025). Pendekatan ini memperkuat dimensi interdisipliner dalam pengembangan energi terbarukan.

Dalam konteks sistem energi, hidrogen memiliki potensi integrasi yang tinggi dengan teknologi mikrogrid. Integrasi ini memungkinkan optimalisasi distribusi energi serta peningkatan efisiensi konversi secara keseluruhan. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa kombinasi penyimpanan energi

dan sumber terbarukan dapat meningkatkan stabilitas sistem energi (Effendi, 2024). Interpretasi ini mempertegas bahwa hidrogen berperan sebagai elemen penghubung dalam sistem energi terintegrasi.

**Tabel 1. Karakteristik Utama Teknologi Hidrogen dalam Sistem Energi**

Parameter	Deskripsi Analitis	Implikasi Sistem
Kepadatan Energi	Tinggi berbasis massa	Efisien untuk transportasi
Fleksibilitas Produksi	Multi-sumber energi	Diversifikasi energi
Penyimpanan	Kompleks dan bertekanan tinggi	Tantangan infrastruktur
Emisi	Sangat rendah saat penggunaan	Mendukung dekarbonisasi
Integrasi Sistem	Tinggi dalam mikrogrid	Stabilitas energi meningkat

Sumber: Sintesis konseptual dari Hasan & Widayat (2022), Effendi (2024), Ma'arif & Kulla (2024).

Data pada tabel menunjukkan bahwa keunggulan utama hidrogen terletak pada dimensi energi dan lingkungan, sementara keterbatasannya berada pada aspek teknis dan infrastruktur. Pola ini memperlihatkan adanya ketidakseimbangan antara potensi teoritis dan kesiapan implementatif. Analisis ini sejalan dengan temuan bahwa teknologi energi baru sering menghadapi hambatan pada fase difusi awal (Ningsih, 2024). Interpretasi tersebut memperkuat pentingnya intervensi kebijakan dalam mempercepat adopsi.

Selain itu, dimensi lingkungan menunjukkan bahwa hidrogen memiliki keunggulan signifikan dalam mengurangi emisi karbon pada tahap penggunaan. Hal ini menjadikannya relevan dalam agenda dekarbonisasi industri dan transportasi global. Studi terkait menunjukkan bahwa penerapan hidrogen dapat berkontribusi terhadap target pengurangan emisi nasional (Dewi et al., 2024). Konteks ini menempatkan hidrogen sebagai solusi strategis dalam mitigasi perubahan iklim.

Namun demikian, pendekatan siklus hidup menunjukkan bahwa dampak lingkungan hidrogen tidak sepenuhnya nol. Proses produksi berbasis bahan bakar fosil masih menghasilkan emisi yang signifikan. Oleh karena itu, transisi menuju hidrogen hijau menjadi prasyarat penting dalam meningkatkan keberlanjutan teknologi ini (Meilinda et al., 2024). Analisis ini memperlihatkan pentingnya konsistensi antara sumber energi dan teknologi yang digunakan.

Dalam perspektif ekonomi energi, hidrogen juga memiliki implikasi terhadap struktur investasi dan pembiayaan. Pengembangan teknologi ini membutuhkan dukungan finansial yang besar, terutama dalam pembangunan infrastruktur. Studi menunjukkan bahwa pembiayaan hijau menjadi instrumen penting dalam mendukung pengembangan energi terbarukan (Ningsih, 2024). Hal ini menegaskan bahwa aspek ekonomi tidak dapat dipisahkan dari evaluasi teknologi.

Sintesis konseptual menunjukkan bahwa posisi hidrogen dalam transisi energi bersifat komplementer terhadap teknologi lain. Hidrogen tidak menggantikan energi terbarukan lain, tetapi memperkuat sistem melalui fungsi penyimpanan dan distribusi energi. Pendekatan ini konsisten dengan teori sistem energi berkelanjutan yang menekankan integrasi teknologi (Dewi, 2023). Analisis ini memperlihatkan bahwa keberhasilan hidrogen bergantung pada sinergi antar teknologi.

Secara metodologis, hasil analisis ini menunjukkan ketahanan melalui triangulasi literatur lintas disiplin. Integrasi perspektif teknis, lingkungan, dan kebijakan menghasilkan pemahaman yang lebih komprehensif. Keunikan pendekatan ini terletak pada pemetaan hubungan antar variabel dalam satu kerangka analitis terpadu. Kontribusi ini memberikan dasar teoritis yang kuat bagi pengembangan kebijakan energi berbasis hidrogen di masa depan (Energy & Riset, 2023).

### **Kompleksitas Infrastruktur dan Efisiensi Sistem dalam Implementasi Teknologi Hidrogen**

Analisis konseptual menunjukkan bahwa kompleksitas infrastruktur menjadi determinan utama dalam menilai kelayakan implementasi teknologi hidrogen dalam sistem energi modern. Berbeda dengan karakteristik intrinsik hidrogen sebagai *energy carrier*, dimensi infrastruktur menyoroti kebutuhan investasi besar pada sistem produksi, penyimpanan, dan distribusi yang terintegrasi secara teknis dan spasial. Ketergantungan pada teknologi elektrolisis, kompresi, serta jaringan distribusi bertekanan tinggi menciptakan tantangan sistemik yang tidak ditemukan pada energi konvensional (Rosyid & Oktaufik, 2009). Dalam konteks ini, efisiensi sistem tidak hanya ditentukan oleh proses konversi energi, tetapi juga oleh kesiapan ekosistem pendukung secara keseluruhan.

Konstruksi analitis mengindikasikan bahwa efisiensi energi hidrogen cenderung mengalami degradasi pada setiap tahap rantai nilai, mulai dari produksi hingga pemanfaatan akhir. Proses elektrolisis, misalnya, menunjukkan tingkat efisiensi yang masih terbatas jika dibandingkan dengan teknologi penyimpanan energi berbasis baterai (Effendi, 2024). Hal ini memperlihatkan adanya *energy loss cascade* yang bersifat kumulatif dalam sistem hidrogen. Dalam kerangka transisi energi, fenomena ini menimbulkan pertanyaan kritis mengenai rasionalitas alokasi sumber daya pada teknologi dengan efisiensi relatif rendah (Alnavis et al., 2024).

Selain aspek efisiensi, kompleksitas teknis dalam penyimpanan hidrogen juga menjadi isu strategis yang mempengaruhi skalabilitas teknologi. Hidrogen memerlukan kondisi tekanan tinggi atau suhu kriogenik untuk mempertahankan stabilitasnya, yang secara langsung meningkatkan biaya operasional dan risiko keselamatan. Tantangan ini semakin kompleks ketika diintegrasikan dalam sistem energi skala besar seperti industri atau transportasi berat (Riyanti et al., 2025). Oleh karena itu, pendekatan inovatif berbasis material dan rekayasa sistem menjadi krusial dalam mengatasi keterbatasan tersebut.

Dalam perspektif komparatif, teknologi hidrogen menunjukkan perbedaan signifikan dengan sistem energi alternatif dalam hal kebutuhan infrastruktur dan efisiensi operasional. Misalnya, teknologi berbasis listrik langsung seperti baterai memiliki keunggulan dalam efisiensi konversi dan kemudahan distribusi energi. Namun, hidrogen tetap memiliki nilai strategis dalam aplikasi tertentu seperti industri berat dan transportasi jarak jauh yang membutuhkan densitas energi tinggi (Ma'arif & Kulla, 2024). Dengan demikian, posisi hidrogen lebih tepat dipahami sebagai pelengkap dalam bauran energi, bukan sebagai substitusi tunggal.

**Tabel 2. Perbandingan Kompleksitas Infrastruktur dan Efisiensi Sistem Energi**

Parameter	Hidrogen	Baterai Listrik	Energi Fosil
Efisiensi Konversi Energi	30–40%	70–90%	35–45%
Kompleksitas Infrastruktur	Tinggi	Sedang	Rendah
Biaya Penyimpanan	Tinggi (kompresi/kriogenik)	Sedang	Rendah
Risiko Distribusi	Tinggi (flammable)	Rendah	Sedang
Kesiapan Teknologi	Berkembang	Matang	Sangat matang

Sumber: Sintesis konseptual berdasarkan Effendi (2024), Ma'arif & Kulla (2024), dan Alnavis et al. (2024).

Tabel tersebut mengilustrasikan bahwa hidrogen memiliki tantangan struktural yang lebih kompleks dibandingkan dengan teknologi energi lainnya, terutama dalam aspek efisiensi dan infrastruktur. Tingginya biaya penyimpanan dan distribusi menunjukkan bahwa pengembangan teknologi ini masih memerlukan inovasi signifikan untuk mencapai skala ekonomi. Di sisi lain, keunggulan dalam fleksibilitas penggunaan tetap menjadi nilai tambah yang tidak dimiliki oleh semua sistem energi (Dewi et al., 2024). Interpretasi ini menegaskan bahwa evaluasi teknologi hidrogen harus mempertimbangkan trade-off multidimensional.

Integrasi sistem hidrogen dalam kerangka energi terbarukan juga menghadapi tantangan koordinasi antar sektor yang bersifat lintas disiplin. Keterhubungan antara sektor energi, industri, dan transportasi menciptakan kebutuhan akan sistem yang adaptif dan interoperabel. Hal ini menuntut adanya pendekatan sistemik yang tidak hanya berbasis teknologi, tetapi juga kebijakan dan regulasi yang mendukung (Energy & Riset, 2023). Dengan demikian, kompleksitas tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga institusional.

Lebih lanjut, dinamika biaya dalam pengembangan infrastruktur hidrogen memperlihatkan adanya ketergantungan terhadap skala produksi dan kemajuan teknologi. Investasi awal yang tinggi seringkali menjadi hambatan utama dalam adopsi teknologi ini secara luas. Namun, dalam jangka panjang, potensi penurunan biaya melalui inovasi dan ekonomi skala tetap terbuka (Ningsih, 2024). Hal ini menunjukkan bahwa analisis ekonomi harus dilakukan secara dinamis dan tidak statis.

Dalam konteks lingkungan, kompleksitas sistem hidrogen juga berdampak pada siklus hidup emisi yang dihasilkan. Meskipun hidrogen sering dikategorikan sebagai energi bersih, proses produksinya masih bergantung pada sumber energi primer yang digunakan. Jika produksi masih berbasis energi fosil, maka manfaat lingkungan menjadi terbatas (Dewi, 2023). Oleh karena itu, integrasi dengan sumber energi terbarukan menjadi syarat utama untuk mencapai keberlanjutan.

Pendekatan berbasis inovasi material seperti nanoteknologi dan katalis hijau mulai menunjukkan potensi dalam meningkatkan efisiensi dan mengurangi kompleksitas sistem hidrogen. Penggunaan material seperti ZnO, WO<sub>3</sub>, dan MOF dalam proses produksi hidrogen dapat meningkatkan efisiensi reaksi serta menurunkan kebutuhan energi (Dinanti et al., 2025). Selain itu, aplikasi nanoteknologi dalam penyimpanan energi juga membuka peluang untuk mengatasi keterbatasan teknis yang ada (Hariyanto & Romadon, 2023). Inovasi ini menjadi indikator bahwa tantangan yang ada bersifat dinamis dan dapat direduksi melalui kemajuan teknologi.

Sintesis konseptual menegaskan bahwa kompleksitas infrastruktur dan efisiensi sistem merupakan dua variabel kunci yang menentukan posisi strategis hidrogen dalam transisi energi global. Evaluasi yang bersifat parsial akan menghasilkan bias dalam pengambilan keputusan, sehingga diperlukan pendekatan holistik yang mengintegrasikan dimensi teknis, ekonomi, dan lingkungan. Dalam kerangka ini, teknologi hidrogen tidak dapat dinilai secara tunggal, melainkan sebagai bagian dari sistem energi yang lebih luas (Heriyanto et al., 2025). Pendekatan multidimensional ini menjadi kontribusi utama dalam memperkuat ketahanan analitis penelitian.

### Implikasi Lingkungan Berbasis Siklus Hidup dan Dimensi Kebijakan dalam Pengembangan Teknologi Hidrogen

Evaluasi berbasis *lifecycle assessment* menunjukkan bahwa dampak lingkungan teknologi hidrogen tidak dapat direduksi pada fase penggunaan semata, melainkan harus dianalisis secara menyeluruh dari produksi hingga konsumsi akhir. Pendekatan ini mengungkap bahwa emisi dan jejak lingkungan sangat bergantung pada sumber energi primer yang digunakan dalam proses produksi hidrogen. Hidrogen yang dihasilkan dari energi fosil tetap menghasilkan emisi signifikan, sehingga mengurangi klaim keberlanjutan yang sering dilekatkan pada teknologi ini (Dewi, 2023). Perspektif ini memperkuat kebutuhan analisis sistemik yang melampaui pendekatan parsial berbasis output energi.

Dimensi lingkungan juga memperlihatkan keterkaitan erat antara teknologi hidrogen dan sistem pengelolaan sumber daya alam yang lebih luas. Penggunaan air dalam proses elektrolisis, misalnya, menimbulkan implikasi terhadap keberlanjutan sumber daya air, terutama di wilayah dengan keterbatasan akses air bersih. Selain itu, integrasi hidrogen dalam sistem energi memerlukan sinkronisasi dengan kebijakan lingkungan yang adaptif terhadap dinamika teknologi (Rumahorbo & Nursadi, 2023). Hal ini menunjukkan bahwa keberlanjutan hidrogen bersifat kontekstual dan bergantung pada kondisi lokal.

Dalam kerangka transisi energi, teknologi hidrogen memiliki potensi untuk mendukung dekarbonisasi sektor-sektor yang sulit dialiri listrik secara langsung. Sektor industri berat dan transportasi maritim menjadi contoh area di mana hidrogen dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengurangan emisi karbon. Namun, efektivitasnya tetap bergantung pada integrasi dengan energi terbarukan sebagai sumber produksi utama (Meilinda et al., 2024). Oleh karena itu, posisi hidrogen lebih relevan sebagai bagian dari strategi dekarbonisasi sektoral.

Aspek kebijakan menjadi faktor kunci dalam menentukan arah pengembangan teknologi hidrogen dalam skala nasional maupun global. Roadmap hidrogen yang disusun secara strategis dapat mempercepat adopsi teknologi melalui insentif, regulasi, dan dukungan investasi. Kebijakan yang tidak terintegrasi berpotensi menciptakan ketidakseimbangan antara inovasi teknologi dan kesiapan pasar (Energy & Riset, 2023). Dalam konteks ini, sinergi antara kebijakan energi dan lingkungan menjadi prasyarat utama.

**Tabel 3. Evaluasi Dampak Lingkungan dan Dukungan Kebijakan Teknologi Hidrogen**

Dimensi Analisis	Indikator Utama	Implikasi Lingkungan	Dukungan Kebijakan
Produksi Energi	Sumber energi primer	Emisi CO <sub>2</sub> tinggi/rendah	Insentif energi terbarukan

Konsumsi Sumber Daya	Kebutuhan air elektrolisis	Tekanan pada sumber daya air	Regulasi penggunaan air
Aplikasi Sektoral	Industri & transportasi	Reduksi emisi sektoral	Subsidi teknologi hijau
Siklus Hidup Teknologi	Emisi total sepanjang siklus	Variatif tergantung metode produksi	Standar emisi nasional
Integrasi Sistem Energi	Konektivitas dengan EBT	Optimalisasi dampak lingkungan	Roadmap energi nasional

Sumber: Sintesis konseptual berdasarkan Dewi (2023), Meilinda et al. (2024), dan Energy & Riset (2023).

Tabel tersebut memperlihatkan bahwa dampak lingkungan teknologi hidrogen bersifat multidimensional dan sangat dipengaruhi oleh kerangka kebijakan yang mengaturnya. Variasi pada setiap indikator menunjukkan bahwa tidak ada satu pendekatan tunggal yang dapat menjamin keberlanjutan teknologi ini. Kebijakan yang adaptif dan berbasis bukti menjadi instrumen penting dalam mengarahkan pengembangan hidrogen menuju sistem energi yang lebih bersih (Ningsih, 2024). Hal ini menegaskan pentingnya integrasi antara analisis teknis dan kebijakan publik.

Pendekatan berbasis ekonomi lingkungan juga menunjukkan bahwa pembiayaan hijau memainkan peran signifikan dalam mempercepat adopsi teknologi hidrogen. Skema pembiayaan yang mendukung inovasi teknologi ramah lingkungan dapat mengurangi hambatan investasi awal yang tinggi. Selain itu, instrumen keuangan seperti *carbon pricing* dan *green bonds* dapat meningkatkan daya tarik ekonomi teknologi ini (Ningsih, 2024). Integrasi antara aspek finansial dan lingkungan menjadi elemen strategis dalam pengembangan energi berkelanjutan.

Dalam konteks inovasi teknologi, pemanfaatan limbah sebagai sumber energi alternatif memberikan perspektif baru dalam mendukung produksi hidrogen yang lebih berkelanjutan. Teknologi pengolahan limbah padat dan cair dapat diintegrasikan dengan sistem produksi hidrogen untuk mengurangi dampak lingkungan secara simultan (Affandi et al., 2024). Pendekatan ini mencerminkan prinsip ekonomi sirkular yang semakin relevan dalam pengembangan energi modern. Dengan demikian, hidrogen tidak hanya berfungsi sebagai energi, tetapi juga sebagai bagian dari sistem pengelolaan sumber daya.

Lebih lanjut, teknologi alternatif seperti biogas dan biomassa menunjukkan potensi sinergi dengan sistem hidrogen dalam konteks diversifikasi energi. Pemanfaatan sumber daya lokal seperti limbah organik dapat meningkatkan ketahanan energi sekaligus mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil (Putra et al., 2024). Integrasi ini juga membuka peluang untuk pengembangan sistem energi berbasis komunitas yang lebih inklusif. Perspektif ini memperluas cakupan analisis dari skala makro ke mikro.

Dalam dimensi teknologi material, penggunaan katalis dan material inovatif menjadi faktor penting dalam meningkatkan efisiensi produksi hidrogen sekaligus menurunkan dampak lingkungan. Material seperti kaolin clay dan karbon aktif telah menunjukkan potensi dalam proses fotokatalisis yang lebih efisien (Komaril & Sudarman, 2022). Selain itu, pengembangan katalis hijau memberikan alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan material konvensional (Dinanti et al., 2025). Inovasi ini memperlihatkan bahwa dimensi lingkungan dan teknologi saling terkait secara erat.

Sintesis konseptual menegaskan bahwa keberhasilan teknologi hidrogen dalam mendukung transisi energi tidak hanya ditentukan oleh keunggulan teknis atau efisiensi sistem, tetapi juga oleh integrasi yang kuat dengan kebijakan lingkungan dan pendekatan berbasis siklus hidup. Analisis multidimensional menunjukkan bahwa tantangan utama terletak pada harmonisasi antara inovasi teknologi, keberlanjutan lingkungan, dan dukungan institusional. Dalam kerangka ini, teknologi hidrogen memiliki potensi strategis yang signifikan, namun memerlukan pendekatan implementasi yang adaptif dan berbasis bukti (Heriyanto et al., 2025). Pendekatan ini memperkuat kontribusi analitis penelitian dalam memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih komprehensif.

## KESIMPULAN

Sintesis multidimensional menunjukkan bahwa teknologi hidrogen memiliki posisi strategis sebagai energy carrier yang fleksibel dan berpotensi mendukung dekarbonisasi lintas sektor, terutama melalui keunggulan kepadatan energi berbasis massa, emisi operasional rendah, serta kemampuan

integrasi dalam sistem energi terbarukan. Namun, keunggulan tersebut diimbangi oleh keterbatasan struktural berupa efisiensi konversi yang relatif rendah, kompleksitas infrastruktur penyimpanan dan distribusi, serta ketergantungan pada sumber energi primer dalam menentukan dampak lingkungan secara keseluruhan. Evaluasi berbasis siklus hidup menegaskan bahwa klaim keberlanjutan hidrogen bersifat kondisional dan hanya optimal apabila diproduksi dari sumber energi terbarukan. Selain itu, dimensi kebijakan, pembiayaan, dan inovasi material berperan krusial dalam menjembatani kesenjangan antara potensi teoritis dan kesiapan implementatif. Dengan demikian, hidrogen lebih tepat diposisikan sebagai teknologi komplementer dalam sistem energi berkelanjutan yang memerlukan pendekatan integratif antara aspek teknis, ekonomi, lingkungan, dan institusional guna mencapai efektivitas transisi energi secara holistik.

## DAFTAR PUSTAKA

- Affandi, G. N., Berlianti, P. C. G., Ramadhania, N. R., Abi Shawaaba, R. S., & Radianto, D. O. (2024). Efektivitas Pengolahan Limbah Fisik (Padat Dan Cair) Dengan Menggunakan Teknologi Inovatif. *Jurnal Wilayah, Kota Dan Lingkungan Berkelanjutan*, 3(1), 84-98. <https://doi.org/10.58169/jwikal.v3i1.368>
- Alnavis, N. B., Wirawan, R. R., Solihah, K. I., & Nugroho, V. H. (2024). Energi listrik berkelanjutan: Potensi dan tantangan penyediaan energi listrik di Indonesia. *Journal of Innovation Materials, Energy, and Sustainable Engineering*, 1(2). <https://doi.org/10.61511/jimese.v1i2.2024.544>
- Barreto, D. T. D. S., & Khinanta, P. (2025). Peran Gas Alam Sebagai Bahan Bakar Penghubung Dalam Transisi Energi. *Citizen: Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia*, 5(4), 959-964. <https://doi.org/10.53866/jimi.v5i4.856>
- Dewi, A. W., Adam, M. K., Pipit, A., & Yusuf, L. A. (2024). Kajian potensi pengembangan teknologi hidrogen sebagai sumber EBT melalui skema CDM dalam mendukung pencapaian NDC Indonesia. *Spatial Review for Sustainable Development*, 1(2), 106-123. <https://doi.org/10.61511/srsd.v1i2.2024.1317>
- Dewi, I. R. (2023). *Energi Terbarukan: Pemanfaatan Energi Terbarukan sebagai Energi Alternatif yang Berkelanjutan dan Ramah Lingkungan-Rajawali Pers*. PT. RajaGrafindo Persada.
- Dinanti, C., Faista, M., & Al Barru, N. S. (2025). Perbandingan Katalis Hijau ZnO, WO<sub>3</sub>, dan MOF: Sintesis, Aplikasi, dan Potensi Lingkungan. *INDONESIAN JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY*, 4(2). <https://doi.org/10.14421/gra3x524>
- Effendi, R. (2024). Integrasi Sistem Energi Terbarukan dan Penyimpanan untuk Meningkatkan Efisiensi Konversi Energi pada Mikrogrid. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 8(1), 255-264. <https://doi.org/10.33379/gtech.v8i1.3682>
- Energy, H., & Riset, B. (2023). *Indonesia hidrogen roadmap* [Laporan teknis].
- Hariyanto, A., & Romadon, R. (2023). Aplikasi Nanoteknologi pada Energi Terbarukan untuk Peningkatan Efisiensi Sistem Penyimpanan Energi. *Journal of New Trends in Sciences*, 1(2), 01-15. <https://doi.org/10.59031/jnts.v1i2.763>
- Hasan, M. S., & Widayat, W. (2022). Produksi Hidrogen dengan Memanfaatkan Sumber Daya Energi Surya dan Angin di Indonesia. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 3(1), 38-48. <https://doi.org/10.14710/jekk.v%25vi%25i.13374>
- Heriyanto, H., Dianto, D., & Bahtiar, S. (2025). Dekarbonisasi Industri Sebagai Strategi Peningkatan Investasi di Kawasan Industri Maluku Kabupaten Sumbawa Barat. *Jurnal Manajemen dan Budaya*, 5(1), 21-35. <https://doi.org/10.51700/manajemen.v5i1.836>
- Komaril, Y., & Sudarman, S. (2022). Peran Kaolin Clay dan Karbon Aktif dalam Produksi Gas Hidrogen dengan Metode Fotokatalisis. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, 5(1), 46-55. <https://doi.org/10.30596/rmme.v5i1.10265>
- Ma'arif, S., & Kulla, I. H. (2024). Potensi Energi Baru Terbarukan Di Kawasan Maritim Indonesia: Tinjauan Teknologi Dan Tantangan Implementasi. *Jurnal Serina Sains, Teknik dan Kedokteran*, 2(1), 71-86. <https://doi.org/10.24912/jsstk.v2i1.32060>
- Mahendra, G. S., Judijanto, L., Tahir, U., Nugraha, R., Dwipayana, A. D., Nuryanneti, I., ... & Rakhmadani, D. P. (2024). *Green technology: Panduan teknologi ramah lingkungan*. PT Sonpedia Publishing Indonesia.



- Meilinda, R., Ningsih, P. A., Anggraini, D., & Pardi, H. (2024). Environmentally Friendly Maritime Fuel Alternative: A Review. *INDONESIAN JOURNAL OF CHEMICAL RESEARCH*, 9(1). <https://doi.org/10.20885/ijcr.vol9.iss1.art2>
- Ningsih, M. M. (2024). Pembiayaan ramah lingkungan terhadap sub sektor energi baru dan terbarukan di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 5(2), 12-29. <https://doi.org/10.14710/jebt.2024.22805>
- Nugraha, B. A., & Sopandi, T. P. (2022). Pengolahan Limbah Kulit Jeruk Sebagai Sumber Energi Terbarukan Di Desa Selorejo, Kabupaten Malang: Literature Review. *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, 8(1). <https://dx.doi.org/10.20527/jukung.v8i1.12965>
- Nurdiansyah, N., Setyani, M., Sespira, D., Anggiri, F., Aqbal, J., Erlangga, M. B., ... & Saputra, Y. (2024). Inovasi Teknologi Briket Solusi Cerdas Untuk Pengelolaan Limbah Dan Energi Berkelanjutan. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Bangsa*, 2(7), 2774-2780. <https://doi.org/10.59837/jpmba.v2i7.1334>
- Parman, P. (2024). Design of A Green Hydrogen System Powered by Solar Power Plants in Lombok. *ROTASI*, 26(4), 80-90. <https://doi.org/10.14710/rotasi.26.4.80-90>
- Putra, I. K. P., Yadnya, M. S., & Muljono, A. B. (2024). Potensi Pemanfaatan Biogas Kotoran Sapi Sebagai Sumber Energi Konsumsi Rumah Tangga. *Jurnal Pepadu*, 5(2), 292-296. <https://doi.org/10.29303/pepadu.v5i2.4922>
- Riyanti, L. E., Arrafat, B. S., Kurniawan, A., & Kurniawan, I. E. (2025). Sosialisasi Energi Terbarukan: Hidrogen Sebagai Solusi Bahan Bakar Ramah Lingkungan Untuk Masa Depan Penerbangan. *Darmabakti: Jurnal Inovasi Pengabdian dalam Penerbangan*, 6(1), 30-37. <https://doi.org/10.52989/darmabakti.v6i1.250>
- Rosyid, O. A., & Oktaufik, M. A. M. (2009). *Infrastruktur hidrogen untuk aplikasi fuel cell dalam era ekonomi hidrogen* [Laporan teknis]. Balai Besar Teknologi Energi (B2TE-BPPT).
- Rumahorbo, R. P., & Nursadi, H. (2023). Energi Baru Terbarukan Sumber Daya Air: Manfaat Dan Dampaknya Terhadap Lingkungan Hidup. *Jurnal Darma Agung*, 31(2). <http://dx.doi.org/10.46930/ojsuda.v31i2.2967>
- Syamsiro, M., Setyono, P., Hariyanti, K., & Sutanto, G. (2024). Kajian teknologi alternatif pengolahan sampah padat perkotaan menjadi energi terbarukan ramah lingkungan. *J-Proteksion: Jurnal Kajian Ilmiah dan Teknologi Teknik Mesin*, 9(1), 19-30. <https://doi.org/10.32528/jp.v9i1.1757>
- Taufiqurrohman, M., & Yusuf, M. (2022). Pemanfaatan energi terbarukan dalam pengolahan daur ulang limbah. *Jurnal MENTARI: Manajemen, Pendidikan dan Teknologi Informasi*, 1(1), 46-57. <https://doi.org/10.33050/mentari.v1i1.141>