

PERAN *BLUE HYDROGEN* DALAM MENDUKUNG TARGET NZE DAN KEBIJAKAN PENGEMBANGAN KENDARAAN LISTRIK DI INDONESIA

Ario Usman Maulana^{1*}

¹Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Perminyakan, Sekolah Tinggi Teknologi Migas
*Email: ariousman461@gmail.com

ABSTRAK

Indonesia menghadapi tantangan ganda dalam transisi energi: memenuhi permintaan energi yang terus meningkat sekaligus mencapai target *Net Zero Emissions (NZE)* pada tahun 2060. Sementara hidrogen hijau dianggap sebagai solusi ideal jangka panjang, biaya produksi yang tinggi dan ketergantungan pada infrastruktur energi terbarukan yang belum matang menjadi kendala signifikan. Penelitian ini menganalisis peran strategis hidrogen biru yang diproduksi dari gas alam dengan teknologi *Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS)* sebagai teknologi jembatan yang pragmatis dan layak secara ekonomi. Melalui pendekatan analisis tekno-ekonomi dan kebijakan kualitatif, studi ini mengevaluasi kelayakan ekonomi hidrogen biru dibandingkan sumber energi lain, sinerginya dengan kebijakan pengembangan kendaraan listrik nasional, dan keselarasan dengan peta jalan energi Indonesia. Hasil analisis menunjukkan bahwa hidrogen biru memiliki keunggulan biaya yang signifikan (\$1.00 - \$2.80/kg) dibandingkan hidrogen hijau (\$3.00 - \$8.00/kg), memungkinkannya untuk diimplementasikan dalam skala besar dalam waktu dekat. Selain itu, hidrogen biru dapat mendukung diversifikasi teknologi di sektor transportasi melalui *Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV)*, melengkapi program *Battery Electric Vehicle (BEV)* yang ada, dan meningkatkan ketahanan energi nasional.

Kata Kunci: CCUS, Hidrogen Biru, Transisi Energi, *Net Zero Emissions*, Kendaraan Listrik.

ABSTRACT

Indonesia faces a dual challenge in its energy transition: meeting rising energy demand while achieving its Net Zero Emissions (NZE) target by 2060. While green hydrogen is considered the ideal long-term solution, its high production costs and reliance on immature renewable energy infrastructure pose significant barriers. This research analyzes the strategic role of blue hydrogen produced from natural gas with Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) technology as a pragmatic and economically viable bridging technology. Through a qualitative techno-economic and policy analysis approach, this study evaluates the economic feasibility of blue hydrogen compared to other energy sources, its synergy with the national electric vehicle development policy, and its alignment with Indonesia's energy roadmap. The analysis indicates that blue hydrogen has a significant cost advantage (\$1.00 - \$2.80/kg) over green hydrogen (\$3.00 - \$8.00/kg), enabling large-scale implementation in the near term. Furthermore, blue hydrogen can support technological diversification in the transportation sector through Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV), complementing the existing Battery Electric Vehicle (BEV) program and enhancing national energy security.

Keywords: CCUS, Blue Hydrogen, Energy Transition, *Net Zero Emissions*, Electric Vehicle.

1. Pendahuluan

Momentum global untuk dekarbonisasi sistem energi telah menempatkan hidrogen sebagai vektor energi bersih yang potensial untuk masa depan. Negara-negara maju seperti Jepang, Jerman, dan Amerika Serikat secara aktif berinvestasi dalam pengembangan ekonomi hidrogen sebagai pilar strategi mitigasi perubahan iklim mereka (Hydrogen Council, 2023). Sejalan dengan komitmen global, Indonesia telah menetapkan target ambisius dalam Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional (RPJPN) 2025-

2045, yang menargetkan penurunan intensitas emisi karbon menuju *Net Zero Emissions* (NZE) dan peningkatan bauran Energi Baru dan Energi Terbarukan (EBET) hingga 70% pada tahun 2045.

Kajian literatur dan praktik global saat ini mengklasifikasikan hidrogen berdasarkan proses produksinya, yang dikenal sebagai "spektrum warna hidrogen". Hidrogen abu-abu (*grey hydrogen*) diproduksi dari reformasi metana atau gasifikasi batu bara tanpa penanganan emisi CO₂. Hidrogen biru (*blue hydrogen*) menggunakan proses yang sama namun dilengkapi dengan teknologi *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) untuk menangkap emisi CO₂. Sementara itu, hidrogen hijau (*green hydrogen*) diproduksi melalui elektrolisis air menggunakan listrik dari sumber energi terbarukan, sehingga hampir tanpa emisi (Patel *et al.*, 2024).

Meskipun hidrogen hijau sering dipandang sebagai tujuan akhir, terdapat kesenjangan kritis antara idealisme teknologi tersebut dengan realitas ekonomi dan infrastruktur di negara berkembang seperti Indonesia. Biaya produksi hidrogen hijau yang masih tinggi, berkisar antara \$3 hingga \$8 per kilogram, menjadi penghalang utama implementasi skala besar (BNEF, 2023). Di sisi lain, Indonesia memiliki cadangan gas alam terbukti sebesar 41.62 TCF dan infrastruktur bahan bakar fosil yang masif, termasuk 253 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbasis batu bara (Kementerian ESDM, 2023). Mengabaikan aset ini dan menunggu kematangan teknologi hidrogen hijau berisiko memperpanjang ketergantungan pada sumber energi beremisi tinggi.

Berbagai penelitian terdahulu telah banyak berfokus pada tantangan spesifik dari setiap jalur energi. Sebagian besar studi terkini menyoroti tingginya biaya investasi dan tantangan infrastruktur dalam implementasi hidrogen hijau di negara berkembang (Santoso & Wibowo, 2023). Studi lain berfokus pada pengembangan teknis CCUS sebagai solusi dekarbonisasi industri, namun seringkali terlepas dari konteks kebijakan energi nasional yang lebih luas (PSEN, 2025). Terdapat kesenjangan (*gap*) dalam literatur yang secara integratif menganalisis hidrogen biru tidak hanya dari sisi teknologi, tetapi juga menyambungkannya secara strategis dengan kebijakan spesifik seperti program akselerasi kendaraan listrik di Indonesia.

Kebaruan ilmiah dari penelitian ini terletak pada analisis integratif yang memadukan evaluasi teknologi hidrogen biru dengan keselarasan strategisnya terhadap kebijakan energi dan target dekarbonisasi spesifik Indonesia. Penelitian ini memposisikannya bukan sebagai alternatif, melainkan sebagai akselerator transisi energi nasional. Dengan demikian, tujuan dari artikel ini adalah untuk melakukan analisis teknologi dan kebijakan mengenai peran hidrogen biru dalam transisi energi Indonesia. Secara spesifik, penelitian ini mengevaluasi kelayakan ekonominya relatif terhadap sumber energi lain, sinergi strategisnya dengan agenda pengembangan kendaraan listrik nasional, dan keselarasan dengan target NZE jangka panjang.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis teknologi dan kebijakan kualitatif. Metode ini dipilih untuk mensintesis dan menganalisis secara komprehensif data teknis, parameter ekonomi, dan dokumen kebijakan guna mengevaluasi viabilitas dan kesesuaian strategis hidrogen biru dalam konteks spesifik Indonesia. Pendekatan ini memungkinkan integrasi berbagai variabel yang mempengaruhi pengambilan keputusan di tingkat nasional. Sumber data yang digunakan dalam analisis ini bersifat sekunder, berasal dari dokumen dan laporan otoritatif yang telah dipublikasikan, meliputi dokumen kebijakan seperti Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional 2025-2045, data instansi pemerintah seperti Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM),

serta laporan lembaga energi internasional seperti International Energy Agency (IEA) dan BloombergNEF (BNEF) untuk data komparatif.

2.1 Kerangka Analisis

Tekno-Ekonomi dan Kebijakan Analisis dilakukan melalui beberapa tahapan terstruktur. Pertama, dilakukan pemetaan teknologi produksi hidrogen biru, berfokus pada Steam Methane Reforming (SMR) dan Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) sebagai kerangka kerja teknologi utama. Kedua, dilakukan analisis kelayakan ekonomi dan kebijakan secara kualitatif dengan parameter yang telah ditetapkan.

Parameter analisis teknno-ekonomi yang digunakan meliputi data sekunder mengenai:

1. Biaya Produksi (Levelized Cost of Hydrogen - LCOH) untuk hidrogen biru (\$/kg).
2. Biaya komparatif hidrogen hijau, hidrogen abu-abu, dan bahan bakar fosil (\$/kg atau ekuivalen).
3. Estimasi biaya modal dan operasional teknologi CCUS.
4. Ketersediaan bahan baku (cadangan gas alam nasional).

Parameter analisis kebijakan yang digunakan meliputi:

1. Target *Net Zero Emissions* (NZE) 2060.
2. Target bauran energi dalam RPJPN 2025-2045.
3. Peraturan Presiden No. 55 Tahun 2019 tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai.
4. Peta jalan energi nasional yang relevan.

Kriteria penentuan kelayakan strategis hidrogen biru dalam penelitian ini didasarkan pada tiga hal: (1) Keunggulan biaya komparatif yang signifikan dibandingkan hidrogen hijau dalam jangka pendek-menengah; (2) Keselarasan dengan ketersediaan sumber daya energi domestik (gas alam); dan (3) Kemampuan untuk mendukung atau bersinergi secara positif dengan target kebijakan nasional yang ada (NZE 2060 dan pengembangan kendaraan listrik).

2.2 Deskripsi Teknologi

Fokus Kerangka kerja teknologi yang menjadi fokus utama analisis adalah jalur produksi hidrogen biru melalui *Steam Methane Reforming* (SMR) dan *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS).

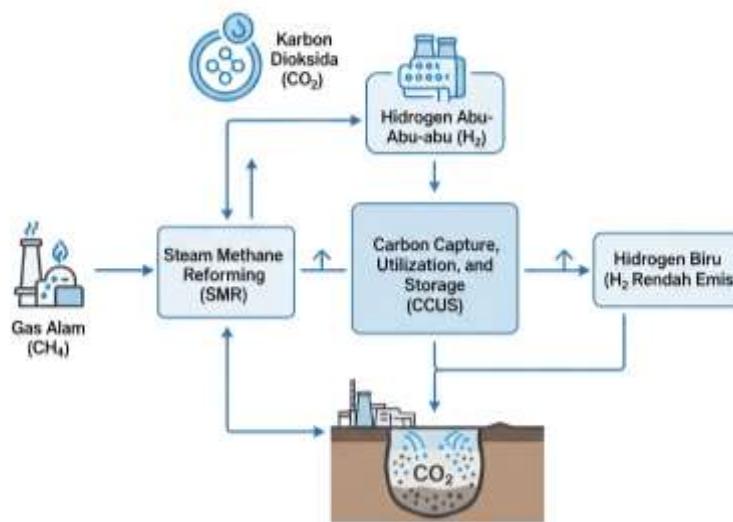
1. **Steam Methane Reforming (SMR):** Teknologi ini dianalisis sebagai proses dominan untuk produksi hidrogen, yang menyumbang sekitar 95% dari pasokan global saat ini (Alhaji et al., 2022). Proses SMR melibatkan reaksi gas alam, terutama metana (CH₄), dengan uap air pada suhu tinggi untuk menghasilkan hidrogen (H₂) dan karbon dioksida (CO₂). Proses ini sangat relevan bagi Indonesia yang masih bergantung pada bahan bakar fosil untuk pembangkit listrik, seperti 253 PLTU yang beroperasi (Kementerian ESDM, 2023).
2. **Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS):** Teknologi ini diidentifikasi sebagai komponen kunci yang mengubah hidrogen abu-abu menjadi hidrogen biru. CCUS bekerja dengan menangkap emisi CO₂ yang dihasilkan selama proses SMR, mencegah pelepasannya ke atmosfer, dan menyimpannya di formasi geologis atau memanfaatkannya untuk produk lain. Analisis ini mengakui bahwa biaya teknologi penangkapan, yang mencapai 80% dari total biaya CCUS, merupakan tantangan utama yang perlu diatasi (Global CCS Institute, 2024).

3. Hasil Dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan temuan-temuan utama dari analisis dan membahas implikasinya secara mendalam. Pembahasan disusun ke dalam tiga sub-bagian tematik: analisis kelayakan ekonomi, sinergi dengan sektor transportasi, dan keselarasan dengan kebijakan energi nasional.

3.1 Analisis Komparatif dan Kelayakan Ekonomi Hidrogen Biru

Kelayakan ekonomi merupakan faktor penentu dalam adopsi teknologi energi baru. Analisis data menunjukkan bahwa hidrogen biru menempati posisi strategis dari segi biaya produksi saat ini. Dengan biaya produksi yang diperkirakan antara \$1.00 hingga \$2.80 per kilogram, hidrogen biru secara signifikan lebih kompetitif dibandingkan hidrogen hijau, yang biayanya berkisar antara \$3.00 hingga \$8.00 per kilogram (BNEF, 2023). Meskipun bahan baku fosil seperti gas alam (~\$0.102/kg) dan batu bara (~\$0.07/kg) jauh lebih murah, emisi yang dihasilkannya menjadikan keduanya tidak berkelanjutan dalam jangka panjang. Perbandingan ini dirangkum dalam Tabel 1.



Gambar 1. Proses Produksi Hidrogen Biru

Sumber : Data diolah Oleh Penulis (2025)

Tabel 1. Perbandingan Biaya Produksi dan Emisi Berbagai Sumber Energi

Sumber Energi	Biaya Produksi (Estimasi)	Intensitas Emisi (Kualitatif)	Keterangan
Batubara	~\$0.07/kg	Sangat Tinggi	Bahan bakar fosil dominan di Indonesia
Gas Alam	~\$0.102/kg	Tinggi	Bahan baku untuk hidrogen biru
Minyak Mentah	~\$0.548/kg	Sangat Tinggi	Dominan di sektor transportasi
Hidrogen Biru	\$1.00 - \$2.80/kg	Rendah (dengan CCUS >90%)	Produksi dari gas alam dengan penangkapan karbon
Hidrogen Hijau	\$3.00 - \$8.00/kg	Sangat Rendah / Nol	Produksi dari energi

terbarukan via
elektrolisis

Sumber: Diolah dari BNEF (2023) dan data harga bahan bakar fosil.

Data pada Tabel 1 secara jelas mengilustrasikan "posisi jembatan" yang diisi oleh hidrogen biru. Ia menawarkan solusi energi rendah karbon dengan struktur biaya yang jauh lebih terjangkau daripada hidrogen hijau pada tingkat kematangan teknologi saat ini. Hal ini menjadikannya pilihan paling realistik untuk dekarbonisasi skala besar dalam jangka pendek hingga menengah bagi negara dengan sumber daya gas alam yang melimpah seperti Indonesia, sebagaimana dirangkum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Potensi Sumber Daya Energi Primer di Indonesia

Sumber Energi	Cadangan Terbukti / Potensi	Keterangan
Gas Alam	33.8 - 41.62 TCF	Cadangan signifikan untuk produksi hidrogen biru.
Batubara	38.84 Miliar Ton	Sumber energi dominan namun beremisi tinggi.
Minyak Bumi	2.3 Miliar Barel	Menurun dan berkontribusi pada emisi sektor transportasi.
Energi Terbarukan	3,689 GW	Potensi besar untuk hidrogen hijau jangka panjang.

Sumber: Disintesis dari Kementerian ESDM (2023) dan EIA (2024)

Lebih jauh, pengembangan hidrogen biru memiliki implikasi strategis yang melampaui sekadar produksi energi. Kelayakan komersial hidrogen biru sangat bergantung pada efektivitas dan efisiensi biaya teknologi CCUS. Dengan demikian, kebijakan yang mendorong produksi hidrogen biru secara inheren akan menciptakan permintaan pasar yang stabil dan berskala besar untuk infrastruktur CCUS (PSEN, 2025). Permintaan ini dapat menjadi insentif ekonomi yang kuat bagi sektor publik dan swasta untuk berinvestasi dalam riset dan pengembangan guna menurunkan biaya teknologi penangkapan karbon. Dengan kata lain, kebijakan hidrogen biru berfungsi sebagai katalis untuk pembangunan ekosistem CCUS nasional. Setelah infrastruktur ini terbangun, ia dapat dimanfaatkan untuk dekarbonisasi sektor-sektor lain yang sulit dikurangi emisinya (*hard-to-abate sectors*), seperti industri semen dan pembangkit listrik tenaga batu bara. Tabel 3 menunjukkan beberapa proyek CCUS skala besar yang telah beroperasi secara global, menjadi bukti kelayakan teknologi ini.

Tabel 3. Contoh Proyek CCUS Skala Besar yang Beroperasi di Dunia

Nama Proyek	Lokasi	Kapasitas Penangkapan (CO2 Mtpa)	Sektor	Tahun Mulai
Gorgon Carbon	Australia	3.4 - 4.0	Pemrosesan Gas	2019

Dioxide Injection

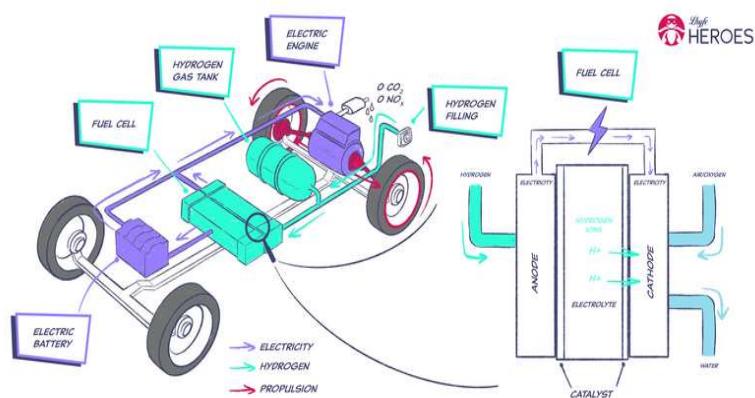
Shute Creek Gas Processing Facility	Amerika Serikat	7.0	Pemrosesan Gas	1986
Century Plant	Amerika Serikat	5.0	Pemrosesan Gas	2010
Sleipner CO2 Injection	Norwegia	0.85	Pemrosesan Gas	1996
Illinois Industrial CCS	Amerika Serikat	1.0	Produksi Etanol	2017

Sumber: Diolah dari Global CCS Institute (2024).

3.2 Sinergi Strategis dengan Sektor Transportasi dan Pengembangan Kendaraan Listrik

Sektor transportasi merupakan salah satu penyumbang emisi gas rumah kaca terbesar di Indonesia. Saat ini, kebijakan pemerintah sangat terfokus pada pengembangan *Battery Electric Vehicles* (BEV), yang ditandai dengan investasi ambisius pada pembangunan smelter nikel di Sulawesi untuk produksi baterai (Peraturan Presiden No. 55, 2019). Konversi sepeda motor konvensional ke listrik saja diperkirakan dapat menghemat 300 juta kg emisi per hari (Kementerian ESDM, 2023).

Meskipun pemerintah telah banyak mengkaji nikel sebagai bahan baku baterai, faktanya baterai tipe NMC (*Nickel Manganese Cobalt*) tidak lebih unggul dibandingkan LFP (*Lithium Ferro Phosphate*) dari segi keamanan dan siklus hidup. Hidrogen menawarkan jalur komplementer melalui *Fuel Cell Electric Vehicles* (FCEV). FCEV menggunakan sel bahan bakar untuk mengubah energi kimia dari hidrogen dan oksigen menjadi listrik untuk menggerakkan motor, dengan produk sampingan hanya air dan panas.



Gambar 2. Mekanisme Sel Bahan Bakar Hidrogen
Sumber: Ihyfe-heroes.com

Teknologi FCEV menawarkan keunggulan unik dibandingkan BEV, terutama dalam hal jarak tempuh yang lebih jauh dan waktu pengisian bahan bakar yang jauh lebih cepat, yang sangat krusial untuk kendaraan komersial, logistik, dan angkutan berat

jarak jauh (Rahman & Dewi, 2024). Mendorong pengembangan FCEV berbasis hidrogen biru bukan berarti menggantikan strategi BEV. Sebaliknya, ini adalah langkah strategis untuk membangun portofolio teknologi mobilitas listrik yang lebih beragam dan tangguh, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Karakteristik *Battery Electric Vehicle* (BEV) dan *Fuel Cell Electric Vehicle* (FCEV)

Karakteristik	<i>Battery Electric Vehicle</i> (BEV)	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i> (FCEV)
Sumber Energi	Listrik dari grid, disimpan dalam baterai	Hidrogen, dikonversi menjadi listrik oleh sel bahan bakar
Jarak Tempuh	Umumnya lebih rendah (rata-rata ~350 km)	Umumnya lebih tinggi (rata-rata >600 km)
Waktu Pengisian	Lama (30 menit untuk 80% pada <i>fast charging</i> , beberapa jam di rumah)	Cepat (3-5 menit untuk pengisian penuh)
Infrastruktur	Jaringan listrik yang sudah ada, memerlukan stasiun pengisian	Memerlukan stasiun pengisian hidrogen khusus
Biaya Kendaraan	Cenderung lebih rendah dan terus menurun	Saat ini lebih tinggi karena teknologi sel bahan bakar
Berat Sistem	Berat baterai meningkat signifikan dengan penambahan jarak tempuh	Berat sistem penyimpanan hidrogen lebih ringan untuk jarak jauh
Aplikasi Ideal	Kendaraan penumpang perkotaan, perjalanan jarak pendek-menengah	Kendaraan berat, logistik, bus, perjalanan jarak jauh

Sumber: Diolah dari berbagai studi komparatif (Thomas, 2014; Plötz et al., 2020).

Ketergantungan yang sangat besar pada baterai berbasis nikel (seperti tipe NMC) memiliki risiko strategis. Pasar global baterai sangat dinamis, dengan potensi pergeseran ke arah kimia baterai lain seperti *Lithium Ferro Phosphate* (LFP) yang lebih unggul dalam hal keamanan dan siklus hidup, atau bahkan teknologi baru seperti baterai sodium-ion. Jika terjadi pergeseran teknologi global atau disrupti pada rantai pasok kobalt (komponen penting lain dalam baterai NMC), investasi masif Indonesia pada ekosistem nikel dapat menjadi rentan.

Dengan mengembangkan jalur FCEV secara paralel, Indonesia melakukan mitigasi risiko teknologi. Strategi ini menciptakan ketahanan (*resilience*) dalam program dekarbonisasi transportasi nasional, memastikan bahwa transisi tidak bergantung pada satu jenis teknologi. Lebih penting lagi, bahan bakar untuk FCEV, yaitu hidrogen biru, dapat diproduksi secara domestik dari cadangan gas alam yang melimpah. Hal ini secara langsung meningkatkan ketahanan energi nasional (*energy security*), mengurangi ketergantungan pada komponen baterai impor, dan menciptakan nilai tambah ekonomi

di dalam negeri.

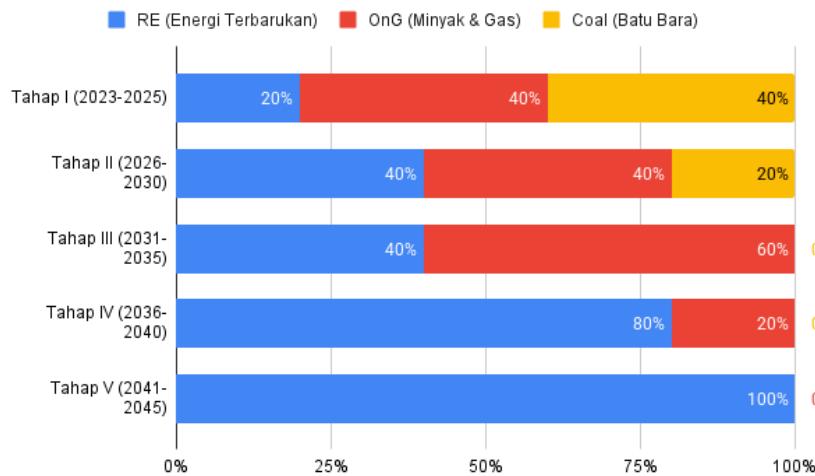
3.3 Implikasi Kebijakan dan Keselarasan dengan Peta Jalan Energi

Strategi pengembangan hidrogen biru menunjukkan keselarasan yang kuat dengan berbagai pilar kebijakan nasional Indonesia. Pertama, ia secara langsung mendukung pencapaian beberapa *Sustainable Development Goals* (SDGs), terutama Tujuan 7 (Energi Bersih dan Terjangkau), Tujuan 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur), dan Tujuan 13 (Penanganan Perubahan Iklim). Kedua, strategi ini sejalan dengan visi RPJPN 2025-2045 untuk mempercepat transisi energi dan menurunkan intensitas emisi menuju NZE. Keselarasan antara manfaat strategi hidrogen biru dan target kebijakan nasional dirangkum dalam Tabel 5.

Tabel 5. Keselarasan Strategi Hidrogen Biru dengan Target Kebijakan Nasional Indonesia

Manfaat Strategi Hidrogen Biru	Target Kebijakan Terkait	Kontribusi Spesifik
Reduksi Emisi Skala Besar	Penurunan intensitas emisi karbon menuju NZE (RPJPN 2025-2045)	Memungkinkan dekarbonisasi sektor industri dan kelistrikan melalui CCUS.
Akselerasi Transisi Energi	Peningkatan bauran EBET hingga 70% pada 2045 (RPJPN 2025-2045)	Menyediakan sumber energi rendah karbon yang dapat diimplementasikan lebih cepat dari hidrogen hijau.
Peningkatan Keamanan Energi	Indeks ketahanan energi target 8,24 pada 2045 (RPJPN 2025-2045)	Manfaatkan cadangan gas alam domestik (41.62 TCF) untuk produksi energi.
Inovasi Industri & Infrastruktur	SDG 9: Industri, Inovasi, dan Infrastruktur	Mendorong pengembangan teknologi baru (CCUS) dan infrastruktur CO2.
Dukungan Transportasi Ramah Lingkungan	Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik (Perpres 55/2019)	Menyediakan jalur komplementer (FCEV) untuk dekarbonisasi sektor transportasi berat.

Pembahasan ini menunjukkan bahwa strategi hidrogen biru bukanlah inisiatif yang berdiri sendiri, melainkan sebuah enabler lintas sektor yang kuat. Untuk mencapai tujuan dari strategi ini, harus ada sebuah peta jalan yang jelas. Peta jalan semacam itu, yang mencontoh kerangka kerja di AS dan Tiongkok, diperlukan untuk menerjemahkan konsep strategis ini menjadi rencana aksi yang konkret. Peta jalan terintegrasi yang mengusulkan transisi bauran energi dan elektrifikasi transportasi secara bertahap disajikan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Peta Jalan Transisi Bauran Energi dan Elektrifikasi Transportasi (2023-2045)

Peta jalan yang diusulkan pada Gambar 3 mengasumsikan penggunaan energi fosil akan berkurang secara bertahap, dengan gasifikasi dimulai pada tahap awal untuk menekan emisi batu bara. Pada tahun 2030, transisi ke energi terbarukan akan dimulai secara masif, sejalan dengan adopsi kendaraan listrik yang semakin luas. Ini memberikan konteks visual untuk bagaimana target NZE dapat dicapai secara bertahap.

4. Kesimpulan

Analisis dalam penelitian ini menegaskan bahwa hidrogen biru, yang diproduksi melalui SMR dengan teknologi CCUS, memegang peran strategis yang krusial dan pragmatis dalam peta jalan transisi energi Indonesia menuju target *Net Zero Emissions*. Kesimpulan utama dapat disintesis ke dalam tiga argumen inti. Pertama, dari perspektif ekonomi, hidrogen biru berfungsi sebagai teknologi jembatan yang efektif dari segi biaya, menawarkan solusi rendah karbon yang lebih terjangkau (\$1.00 - \$2.80/kg) dibandingkan hidrogen hijau (\$3.00 - \$8.00/kg) saat ini. Kedua, dalam konteks sektor transportasi, pengembangan hidrogen biru dan FCEV menawarkan strategi diversifikasi yang vital untuk melengkapi program BEV, meningkatkan ketahanan energi dengan memanfaatkan gas alam domestik. Ketiga, hidrogen biru menciptakan jalur simbiosis bagi industri bahan bakar fosil untuk berpartisipasi secara konstruktif dalam transisi energi melalui adopsi infrastruktur CCUS skala besar.

Berdasarkan temuan tersebut, dua rekomendasi kebijakan utama diajukan untuk dipertimbangkan oleh pemerintah dan para pemangku kepentingan:

- 1. Merencanakan Pengembangan Teknologi Baru yang Muncul:** Diperlukan dukungan pemerintah yang terarah serta investasi dalam penelitian dan pengembangan untuk menurunkan biaya teknologi kunci, terutama teknologi penangkapan karbon dalam sistem CCUS. Mengatasi hambatan biaya ini akan membuka kelayakan ekonomi hidrogen biru dan mempercepat pembangunan infrastruktur dekarbonisasi nasional.
- 2. Menyusun Peta Jalan Transisi Energi yang Holistik dan Terintegrasi:** Indonesia perlu segera mengembangkan peta jalan transformasi energi yang holistik dan terintegrasi, yang secara eksplisit mendefinisikan peran, target, dan jadwal untuk hidrogen biru, serta memberikan sinyal regulasi dan investasi yang jelas kepada pasar.

5. Daftar Pustaka

Alhaji, S. N., Anas, H., & Aliyu, S. (2022). Influence of Catalytic Supports on Methane Steam Reforming: A Short Review. *American Journal of Applied Chemistry*, 10(5), 141–147. <http://www.sciencepublishinggroup.com/j/ajac>

BEIS. (2021). Hydrogen_Production_Cost_Annex. In *Diakses dari berbagai publikasi BNEF*.

Climate Chance. (2020). New Global Synthesis Report on Climate Finance. <Https://Www.Climate-Chance.Org/En/the-New-Global-Climate-Finance-Synthesis-Report-2020/>.

Energy Agency, I. (2024). *Global Hydrogen Review 2024*, IEA, Paris. www.iea.org

Global CCS Institute (GCCSI). (2024). Global Status of CCS 2024. *Global CCS Institute*, June, 1–89.

Gnann, T., Funke, S., Jakobsson, N., Plötz, P., Sprei, F., & Bennehag, A. (2018). Fast charging infrastructure for electric vehicles: Today's situation and future needs. *Transportation Research Part D Transport and Environment*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.03.004>

Patel, G. H., Havukainen, J., Horttanainen, M., Soukka, R., & Tuomaala, M. (2024). Climate change performance of hydrogen production based on life cycle assessment. In *Green Chemistry* (Vol. 26, Issue 2, pp. 992–1006). <https://doi.org/10.1039/d3gc02410e>

Perpres. (2019). Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (Battery) Electric Vehicle) Untuk Transportasi Jalan. *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 55 Tahun 2019*, 008553, 1–22. <https://jdih.esdm.go.id/storage/document/Perpres Nomor 55 Tahun 2019.pdf>

Thomas, C. E. (2018). Clean Diesel Technology for off-road engines and equipment: Tier 4 and more. *National Hydrogen Assocation Conference and Hydrogen Expo*, 83(1), 1–12. <Https://www.energy.gov/eere/fuelcells/downloads/fuel-cell-and-battery-electric-vehicles-compared%0Awww.pioneer.com/home/site/us/agronomy/corn-production-narrow-rows%0Ahttps://www.press.bmwgroup.com/global/article/attachment/T0284828EN/415571>