

# Pemetaan Aplikasi Hidrogen dan Kesenjangan Infrastruktur pada Sistem Energi Indonesia: Scoping Review Lintas Sektor

Zulfikar Aji Kusworo<sup>1\*</sup>, Rochsyid Anggara<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknologi Pertambangan, Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung, Indonesia;

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Pertambangan; Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta, Indonesia;

Email : zakusworo@esdm.go.id<sup>1</sup>, rochsyid.anggara@upnyk.ac.id<sup>2</sup>

## \*Corresponding Author

**Abstrak** : Hidrogen hijau semakin mendapat perhatian di Indonesia sebagai solusi dekarbonisasi bagi sektor-sektor yang sulit dielektrifikasi secara langsung, seperti panas proses industri, bahan baku kimia, angkutan berat, dan penyimpanan energi jangka panjang. PP No. 40/2025 tentang Kebijakan Energi Nasional beserta Peta Jalan Hidrogen dan Amonia Nasional (RHAN) 2025–2060 telah menetapkan 215 rencana aksi yang terbagi dalam tiga fase implementasi. Meskipun demikian, keberhasilan ekosistem hidrogen tidak dapat dinilai hanya dari kapasitas produksi saja; kesiapan seluruh rantai nilai, mulai dari elektroliser di hulu hingga pengguna akhir di hilir, justru menjadi faktor penentu utama. Melalui pendekatan scoping review, studi ini memetakan peluang aplikasi hidrogen di sektor industri, transportasi, dan kelistrikan, sekaligus mengidentifikasi hambatan infrastruktur pada masing-masing sektor. Sumber yang ditelaah mencakup artikel jurnal, laporan lembaga, dan dokumen kebijakan. Hasil kajian menunjukkan bahwa industri yang selama ini sudah menggunakan hidrogen, yaitu amonia dan kilang minyak, merupakan sektor yang paling siap untuk bertransisi melalui substitusi secara bertahap. Sebaliknya, sektor transportasi dan kelistrikan masih membutuhkan dukungan infrastruktur yang lebih luas, meliputi stasiun pengisian hidrogen, terminal pelabuhan, fasilitas penyimpanan, standar keselamatan, serta kejelasan skema offtake. Reformasi tata kelola karbon melalui Perpres 110/2025 dan penetapan kode KBLI khusus hidrogen turut memperkuat kelayakan investasi. Peta kesenjangan yang dihasilkan diharapkan dapat menjadi acuan bagi penentuan prioritas riset, alokasi investasi, dan arah kebijakan ke depan.

**Kata Kunci** : hidrogen hijau; infrastruktur energi; scoping review; dekarbonisasi

Jurnal Energi Baru & Terbarukan, 2026, Vol. 7, No. 2, pp 1 – 13

Received : 7 Maret 2026

Accepted : 1 April 2026

Published : 1 April 2026



**Copyright**: © 2022 by the authors. [Jurnal Energi Baru dan Terbarukan](#) (p-ISSN: [2809-5456](#) and e-ISSN: [2722-6719](#)) published by Master Program of Energy, School of Postgraduate Studies. This article is an open access article distributed under the terms and condition of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](#) (CC BY-SA 4.0).

**Abstract :** *Green hydrogen is increasingly gaining attention in Indonesia as a decarbonization pathway for sectors that are difficult to electrify directly, including industrial process heat, chemical feedstocks, heavy-duty transport, and long-duration energy storage. Government Regulation No. 40/2025 on National Energy Policy, together with the National Hydrogen and Ammonia Roadmap (RHAN) 2025–2060, establishes 215 action plans across three implementation phases. However, the success of a hydrogen ecosystem cannot be assessed solely based on production capacity; the readiness of the entire value chain, from upstream electrolyzers to downstream end-users, is the critical determinant. Through a scoping review approach, this study maps hydrogen application opportunities across industry, transport, and power sectors while identifying infrastructure bottlenecks in each sector. Sources reviewed include journal articles, institutional reports, and policy documents. Findings indicate that industries already using hydrogen, namely ammonia and oil refining, are the most prepared for a phased transition. In contrast, transport and power sectors still require broader infrastructure support, including hydrogen refuelling stations, port terminals, storage facilities, safety standards, and clear offtake mechanisms. Carbon governance reforms through Presidential Regulation 110/2025 and the establishment of dedicated KBLI business classification codes further strengthen investment bankability. The resulting gap map is expected to serve as a reference for determining research priorities, investment allocation, and future policy direction.*

**Keywords :** *green hydrogen; energy infrastructure; scoping review; decarbonization*

---

## 1. Pendahuluan

Sistem energi dunia saat ini sedang mengalami peralihan dari bahan bakar fosil menuju sumber energi rendah karbon. Tekanan untuk mengatasi perubahan iklim mendorong berbagai negara menerapkan kombinasi strategi, yaitu elektrifikasi secara luas, peningkatan efisiensi energi, dan penggunaan bahan bakar alternatif untuk sektor-sektor yang sulit dielektifikasi. Dalam konteks inilah hidrogen berperan, bukan sebagai solusi untuk semua permasalahan energi, melainkan sebagai pelengkap yang tepat untuk kebutuhan tertentu (IEA, 2023; Staffell et al., 2019). Hidrogen dapat berfungsi ganda, yaitu sebagai penyeimbang variabilitas energi terbarukan sekaligus sebagai bahan baku bagi proses industri yang masih bergantung pada karbon. Meski demikian, beberapa kajian mengingatkan bahwa elektrifikasi langsung hampir selalu lebih efisien apabila secara teknis memungkinkan (Palys & Daoutidis, 2022).

Bagi Indonesia, persoalan ini memiliki konteks tersendiri. Negara ini mengejar dua target besar secara bersamaan, yaitu pertumbuhan ekonomi menuju visi Indonesia Emas 2045 dan komitmen mencapai Net Zero Emission (NZE) paling lambat tahun 2060 (IESR, 2023). Kedua target tersebut tidak selalu mudah diselaraskan. Melalui PP No. 40/2025 tentang Kebijakan Energi Nasional, pemerintah berupaya menjembatani keduanya dengan menetapkan hidrogen dan amonia dari sumber terbarukan, seperti energi surya, panas bumi, dan tenaga air, sebagai prioritas di atas opsi berbasis fosil. Regulasi ini juga mengadopsi terminologi warna hidrogen (hijau, biru, abu-abu) sehingga setiap regulasi turunan di tingkat kementerian maupun daerah memiliki acuan yang konsisten (Kementerian ESDM, 2025a).

Dari sisi permintaan, angkanya cukup signifikan. Pada tahun 2024, total konsumsi hidrogen di Asia Tenggara mencapai 4 juta ton, dan Indonesia menyerap sekitar 35 persen dari jumlah tersebut sehingga menjadikannya pasar hidrogen terbesar di ASEAN (IEA, 2025). Namun, hampir seluruh pasokan tersebut masih berupa hidrogen abu-abu yang diproduksi melalui proses *Steam Methane*

*Reforming* (SMR) tanpa penangkapan karbon (IESR, 2024). Dengan kata lain, permintaan terhadap hidrogen memang sudah ada, tetapi sumber pasokannya belum beralih ke opsi yang lebih bersih.

Permasalahan hidrogen tidak terbatas pada aspek produksi saja. Berbagai literatur menegaskan bahwa keberhasilan pengembangan hidrogen sangat bergantung pada kesiapan seluruh mata rantai, mulai dari cara menyimpan, mengangkut, hingga mendistribusikan gas ini ke pengguna akhir. Ketersediaan standar mutu, standar keselamatan, serta aturan pasar yang jelas juga menjadi prasyarat penting. Tanpa kesiapan tersebut, proyek-proyek percontohan berisiko tidak dapat berkembang melampaui tahap pilot (Gordon et al., 2023; Topolski et al., 2022).

Sejumlah studi telah mulai mengisi peta pengetahuan ini yang menunjukkan adanya peluang produksi hidrogen dari tenaga angin di beberapa lokasi di Indonesia, meskipun keekonomiannya masih sangat sensitif terhadap asumsi pendapatan (Hesty et al., 2025). Beberapa peneliti lainnya mengkaji opsi sumber daya non-konvensional untuk produksi hidrogen dalam skala besar (Prasetyo et al., 2025) dan prospek kendaraan sel bahan bakar (*Fuel Cell Electric Vehicle/FCEV*) di Indonesia yang menekankan pentingnya kebijakan pendukung (Veza et al., 2025). Untuk *blending* hidrogen di pipa gas, literatur internasional sudah cukup kaya membahas risiko embrittlement dan isu integritas jaringan (Islam et al., 2024; Topolski et al., 2022).

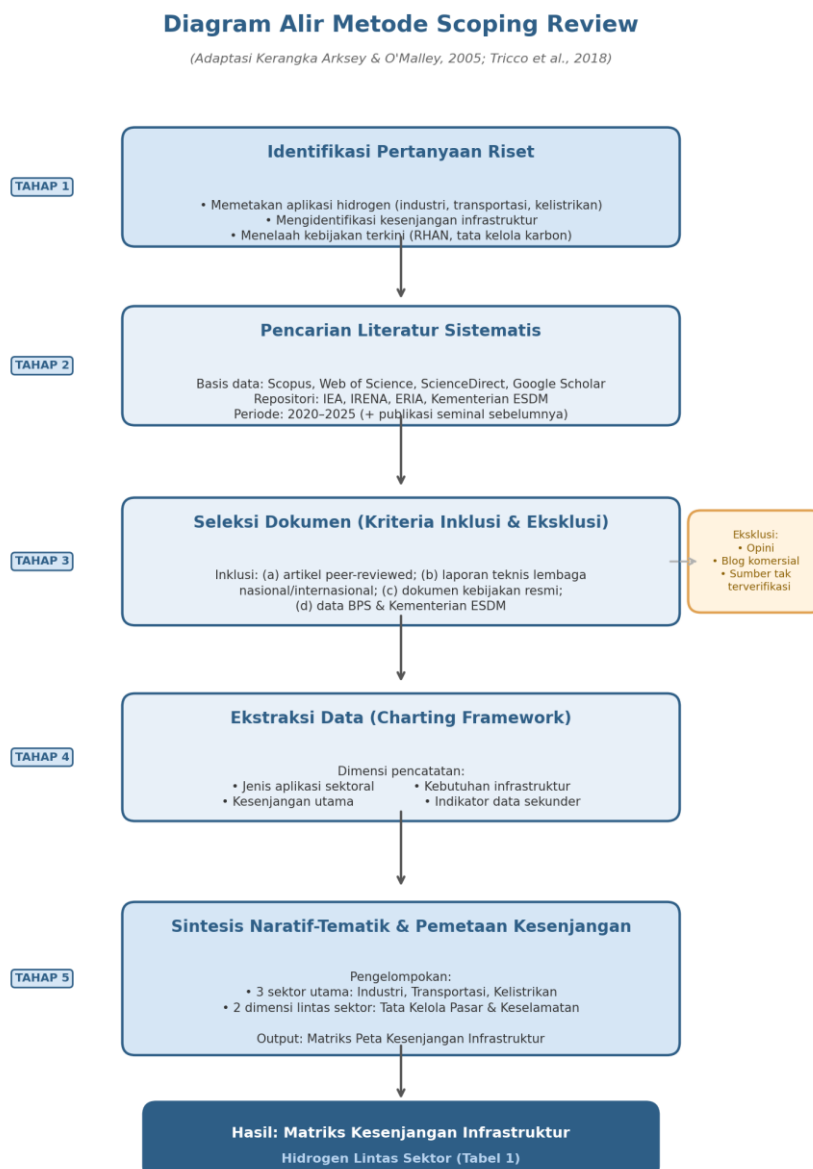
Namun, kajian-kajian itu cenderung berdiri sendiri. Sebagian fokus ke produksi, sebagian lain ke aplikasi sektoral, sementara aspek infrastruktur dan tata kelola lintas sektor jarang dibahas dalam satu kerangka utuh. Studi ini bertujuan mengisi celah tersebut melalui *scoping review* yang: (1) memetakan aplikasi hidrogen pada sektor industri, transportasi, dan kelistrikan di Indonesia, (2) mengidentifikasi kesenjangan infrastruktur utama di masing-masing sektor, (3) menelaah kebijakan terbaru termasuk RHAN dan reformasi karbon, serta (4) merumuskan agenda riset dan rekomendasi kebijakan.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan kajian literatur terstruktur yang bertujuan memetakan kondisi terkini aplikasi hidrogen di Indonesia serta mengidentifikasi kesenjangan infrastruktur yang menghambat implementasinya. Metode yang digunakan adalah *scoping review*, yaitu suatu pendekatan tinjauan literatur sistematis yang dirancang untuk mengeksplorasi cakupan dan sifat bukti penelitian pada suatu topik tertentu, tanpa dibatasi oleh kriteria inklusi yang seketat *systematic review*. Pendekatan ini dipandang paling sesuai mengingat topik hidrogen di Indonesia bersifat lintas sektor dan multidisiplin, mencakup aspek teknologi, ekonomi, kebijakan, hingga logistik, sehingga memerlukan kerangka yang cukup fleksibel untuk menangkap keragaman jenis bukti yang tersedia. Secara keseluruhan, proses penelitian dilaksanakan melalui empat tahap utama, yaitu penetapan desain kajian, pencarian dan pengumpulan sumber data, seleksi dokumen berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan, serta ekstraksi dan sintesis temuan. Masing-masing tahap diuraikan secara rinci pada subbagian berikut.

### 2.1. Desain Kajian

Studi ini menggunakan pendekatan *scoping review* berdasarkan kerangka kerja yang dikembangkan oleh Arksey dan O'Malley dengan penyempurnaan dari Tricco et al.. Pendekatan ini dipilih karena cakupan topik yang luas dan bersifat lintas sektor, sehingga lebih sesuai untuk memetakan bukti yang tersedia dibandingkan *systematic review* yang menerapkan kriteria inklusi secara ketat. Fokus kajian meliputi tiga hal, yaitu mengidentifikasi jenis aplikasi hidrogen, menginventarisasi kebutuhan infrastruktur, serta menemukan celah yang menghambat implementasi.



**Gambar 1.** Diagram Alir Metode *Scoping Review* (Arksey & O'Malley, 2005; Tricco et al., 2018)

## 2.2. Strategi Pencarian dan Sumber Data

Pencarian literatur dilakukan melalui basis data *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect*, dan *Google Scholar*, serta dilengkapi dengan repositori kebijakan dari IEA, IRENA, ERIA, dan Kementerian ESDM. Kata kunci yang digunakan meliputi: “hydrogen and Indonesia”, “green hydrogen and Southeast Asia”, “hydrogen infrastructure and gap”, serta beberapa variasi lainnya. Periode pencarian diprioritaskan pada lima tahun terakhir (2020–2025), dengan pengecualian bagi publikasi seminal yang lebih awal apabila masih relevan sebagai landasan konseptual.

## 2.3. Kriteria Seleksi

Dokumen yang dimasukkan dalam telaah meliputi: (a) artikel *peer-reviewed* mengenai teknologi, ekonomi, atau kebijakan hidrogen; (b) laporan teknis dari lembaga nasional maupun internasional; (c) dokumen kebijakan resmi pemerintah; serta (d) data dari BPS dan Kementerian ESDM. Dokumen yang

dikecualikan adalah opini tanpa dukungan data, blog komersial, dan sumber yang metodologinya tidak dapat diverifikasi.

#### 2.4. Ekstraksi dan Sintesis Data

Setiap temuan dicatat ke dalam charting framework yang mencakup: jenis aplikasi sektoral, kebutuhan infrastruktur, kesenjangan utama, dan indikator yang dapat diverifikasi melalui data sekunder. Hasil ekstraksi disintesis secara naratif-tematik dengan pengelompokan ke dalam tiga sektor utama (industri, transportasi, dan kelistrikan) serta dua dimensi lintas sektor (tata kelola pasar dan keselamatan). Pemetaan kesenjangan disajikan dalam bentuk matriks untuk memudahkan identifikasi hambatan prioritas.

Dengan menerapkan keempat tahap tersebut secara berurutan, studi ini berupaya menghasilkan peta bukti yang komprehensif mengenai peluang dan hambatan pengembangan hidrogen di Indonesia. Pendekatan naratif-tematik yang digunakan dalam sintesis memungkinkan pengelompokan temuan berdasarkan sektor dan dimensi permasalahan, sehingga kesenjangan infrastruktur dapat diidentifikasi secara lebih terstruktur. Keterbatasan utama dari metode scoping review adalah bahwa pendekatan ini tidak melakukan penilaian kualitas metodologis (*critical appraisal*) terhadap masing-masing sumber secara individual sebagaimana lazim dilakukan dalam *systematic review*. Meskipun demikian, pemilihan sumber yang ketat melalui kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan, serta triangulasi antarjenis dokumen, diharapkan dapat menjaga keandalan temuan yang dihasilkan. Bagian berikut menyajikan hasil dan pembahasan berdasarkan kerangka analisis yang telah diuraikan.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan temuan scoping review yang telah disintesis secara naratif-tematik. Pembahasan disusun dalam tujuh subbagian yang saling terkait. Subbagian pertama menguraikan arsitektur kebijakan nasional melalui Peta Jalan Hidrogen dan Amonia Nasional (RHAN) 2025–2060 sebagai kerangka regulasi utama. Subbagian kedua memetakan lanskap aplikasi hidrogen di tiga sektor, yaitu industri berat, ketenagalistrikan, dan transportasi. Subbagian ketiga dan keempat membahas realisasi proyek percontohan serta dinamika biaya produksi yang menentukan daya saing hidrogen hijau. Subbagian kelima mengkaji tantangan logistik distribusi hidrogen di negara kepulauan, diikuti oleh subbagian keenam yang membahas reformasi tata kelola karbon dan insentif fiskal. Terakhir, seluruh temuan dirangkum dalam matriks kesenjangan rantai nilai (Tabel 1) yang menjadi luaran utama kajian ini, dilengkapi dengan implikasi kebijakan dan agenda riset ke depan.

#### 3.1. Arsitektur Kebijakan: Peta Jalan Hidrogen dan Amonia Nasional (RHAN) 2025–2060

Pada bulan April 2025, Kementerian ESDM secara resmi meluncurkan RHAN 2025–2060. Dokumen ini merupakan turunan dari Strategi Hidrogen Nasional yang diterbitkan pada Desember 2023 (Kementerian ESDM, 2025b). Hal yang perlu dicatat adalah bahwa RHAN disusun dengan pendekatan *demand-driven*, di mana kapasitas produksi dihitung berdasarkan proyeksi kebutuhan pembeli (*offtaker*), bukan semata-mata berdasarkan potensi sumber daya. Tujuannya adalah untuk menghindari pembangunan fasilitas yang pada akhirnya tidak terpakai. RHAN dibangun di atas tiga pilar, yaitu memperkuat ketahanan energi nasional, mendorong dekarbonisasi pasar domestik, dan meningkatkan peran Indonesia sebagai eksportir hidrogen dan amonia bersih (GGGI, 2025).

Secara operasional, RHAN memuat 215 rencana aksi yang dibagi ke dalam tiga fase. Fase Inisiasi (2025–2034) menargetkan kapasitas *electrolyzer* sebesar 734 MW, pencampuran hidrogen 20% pada jaringan gas, *co-firing* amonia 3–10% di PLTU, serta pengoperasian 3.000 unit FCEV. Fase

Pengembangan (2035–2045) menaikkan proporsi pencampuran menjadi 40–60% dan menyiapkan PLTU berbasis amonia murni dengan kapasitas 2 GW. Fase Akselerasi (2046–2060) menargetkan substitusi total gas kota dengan hidrogen dan konsumsi sebesar 4,2 juta ton per tahun di sektor pembangkit listrik. Pembagian fase ini menunjukkan bahwa beban terberat diletakkan pada dekade pertama; apabila target awal tidak tercapai, dampaknya dapat mengganggu pencapaian fase-fase berikutnya (Baker McKenzie, 2025).

Dari aspek dampak ekonomi, implementasi RHAN diproyeksikan mampu memberikan kontribusi hingga USD 70 miliar terhadap PDB Indonesia dan menciptakan sekitar 300.000 lapangan kerja baru di sektor terkait hidrogen hingga tahun 2060 (GGGI, 2025).

### 3.2. Lanskap Aplikasi Sektoral

Industri pupuk amonia dan kilang minyak selama ini sudah menggunakan hidrogen sebagai bahan baku proses. Oleh karena itu, transisi ke hidrogen hijau di sektor ini relatif lebih mudah karena yang perlu diubah hanya sumber molekul hidrogennya, yaitu dari SMR berbasis gas alam menjadi elektrolisis berbasis energi terbarukan (IEA, 2023; Staffell et al., 2019). PT Pupuk Indonesia, dengan kapasitas produksi 18,7 juta ton per tahun senilai sekitar USD 4,5 miliar, menjadi calon offtaker yang paling siap di kawasan ini. Kerja sama antara Pupuk Indonesia, PLN, dan ACWA Power untuk memproduksi amonia hijau tidak hanya bertujuan mengurangi emisi, tetapi juga mengantisipasi penerapan *Carbon Border Adjustment Mechanism* (CBAM) Uni Eropa yang mulai memengaruhi daya saing komoditas ekspor Indonesia (Pupuk Indonesia, 2025; SuaraEnergi, 2025).

Di sisi lain, industri baja menghadapi tantangan yang lebih berat, emisi dari sektor baja domestik berpotensi mencapai 24,9 juta ton CO<sub>2</sub> pada tahun 2030 apabila proses *Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace* (BF-BOF) tetap dipertahankan (CELIOS, 2025). Jalur yang secara teknis dapat menghilangkan emisi ini adalah *Direct Reduced Iron* (DRI) berbasis hidrogen, namun penerapannya membutuhkan pasokan hidrogen dalam volume yang sangat besar, biaya retrofit pelabuhan curah yang tinggi, serta sensitivitas yang besar terhadap CAPEX (Boretti, 2023; CELIOS, 2025).

Bagi PLN, hidrogen memiliki dua fungsi utama, yaitu memperpanjang masa pakai pembangkit yang sudah tua melalui co-firing dan menyerap kelebihan produksi energi terbarukan melalui skema *Power-to-Hydrogen* (P2H) (Palys & Daoutidis, 2022; Parra et al., 2019). Beberapa uji coba telah dilaksanakan, di antaranya co-firing hidrogen di PLTDG Pesanggaran, Bali, dan co-firing amonia hijau di PLTU Labuan, Banten, bekerja sama dengan PT Pupuk Kujang (PLN, 2025).

Satu hal yang belum banyak mendapat perhatian adalah pemasangan generator sel bahan bakar (*fuel cell*) di Gili Ketapang, Jawa Timur. Proyek percontohan ini menunjukkan potensi hidrogen untuk mengurangi ketergantungan pulau-pulau kecil terhadap pasokan bahan bakar minyak yang biaya logistiknya mahal (PLN, 2025). RHAN sendiri menargetkan penyerapan 4,2 juta ton hidrogen per tahun untuk sektor pembangkit pada tahun 2060, sebuah angka yang menunjukkan betapa besarnya ketergantungan sistem kelistrikan masa depan terhadap molekul ini (GGGI, 2025).

Sektor transportasi merupakan salah satu penyumbang emisi gas rumah kaca terbesar di Indonesia, khususnya dari segmen angkutan barang dan logistik jarak jauh yang masih sangat bergantung pada bahan bakar minyak. Berbeda dengan kendaraan penumpang ringan yang telah memiliki jalur dekarbonisasi yang relatif jelas melalui kendaraan listrik baterai (BEV), segmen angkutan berat menghadapi keterbatasan teknis berupa bobot baterai yang tinggi, waktu pengisian yang lama, serta jangkauan operasi yang belum memadai untuk rute antar kota maupun antar pulau. Dalam konteks inilah hidrogen, melalui teknologi kendaraan sel bahan bakar (FCEV), muncul sebagai opsi

pelengkap yang dirancang bukan untuk menggantikan BEV, melainkan untuk mengisi celah yang tidak dapat dijangkau oleh elektrifikasi langsung.

Perlu ditegaskan bahwa FCEV tidak dirancang untuk bersaing dengan kendaraan listrik baterai di segmen kendaraan penumpang ringan. Target utama FCEV adalah bus, truk, dan armada logistik jarak jauh yang sulit dielektrifikasi karena keterbatasan bobot baterai dan lamanya waktu pengisian (Veza et al., 2025). RHAN menargetkan pengoperasian 3.000 unit FCEV komersial pada dekade pertama (Kementerian ESDM, 2025b).

PLN telah meresmikan *Hydrogen Refueling Station* (HRS) pertama di Senayan, Jakarta, dan Toyota berkomitmen untuk membangun stasiun serupa di Karawang (Listrik Indonesia, 2025). Namun, permasalahan yang dihadapi bersifat klasik: biaya kompresi gas ke tekanan 350–700 bar yang tinggi, mahalanya buffer storage, dan rendahnya tingkat utilisasi aset pada masa-masa awal operasi. Tanpa adanya insentif operasional, operator stasiun pengisian berisiko mengalami kesulitan finansial yang serius (Gordon et al., 2023; Veza et al., 2025). Di sektor maritim, rencana penggunaan amonia sebagai bahan bakar kapal juga memunculkan kebutuhan akan regulasi keselamatan pelabuhan yang saat ini belum tersedia (Islam et al., 2024).

### 3.3. Realisasi Proyek Percontohan dan Infrastruktur Produksi

Dalam kurun waktu 2024 hingga 2026, beberapa proyek hidrogen di Indonesia telah melampaui tahap kajian dan memasuki tahap pembangunan fisik. Proyek pertama adalah pengoperasian 22 *Green Hydrogen Plant* (GHP) oleh PLN yang tersebar dari Sumatera hingga Jawa. Unit yang paling menonjol adalah fasilitas di PLTP Kamojang, Jawa Barat, yang merupakan fasilitas pertama di Asia Tenggara yang menggunakan energi panas bumi secara langsung untuk mengoperasikan elektroliser. Keunggulan utama panas bumi adalah kemampuannya beroperasi selama 24 jam tanpa gangguan intermittensi yang biasa terjadi pada pembangkit listrik tenaga surya (PLN, 2025).

Proyek kedua dilaksanakan oleh PT Pertamina Geothermal Energy (PGE) yang membangun pilot plant di wilayah kerja panas bumi Ulubelu, Lampung, dengan investasi sekitar USD 3 juta. PGE memilih teknologi *Anion Exchange Membrane* (AEM), yang berbeda dari teknologi PEM maupun alkaline konvensional. AEM menawarkan tingkat efisiensi yang sebanding dengan PEM namun tanpa memerlukan logam mulia. Fasilitas ini ditargetkan mampu memproduksi 100 kg hidrogen per hari dengan efisiensi di atas 82% dan beroperasi penuh pada akhir tahun 2026 (PGE, 2025; ThinkGeoEnergy, 2025).

Proyek ketiga diinisiasi oleh Aslan Energy Capital melalui proyek Hidrogen Energi Mitra Utama (HEMU) di Batam-Bintan, Kepulauan Riau, dengan target *Final Investment Decision* (FID) pada tahun 2026 untuk kapasitas electrolyzer hingga 600 MW. Lokasi proyek ini berjarak hanya 40 km dari Singapura sehingga dapat memanfaatkan fasilitas Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) Galang Batang sekaligus menekan biaya transportasi yang sering menjadi penghambat kelayakan proyek hidrogen (BioEnergy Times, 2025; Energies Media, 2025).

### 3.4. Dinamika Biaya Produksi dan Daya Saing Regional

Kelayakan ekonomi hidrogen hijau diukur menggunakan indikator *Levelized Cost of Hydrogen* (LCOH). Pada kondisi saat ini, LCOH hidrogen hijau berbasis tenaga surya di Indonesia berada pada kisaran USD 4,3 hingga 8,3 per kilogram, atau sekitar dua hingga empat kali lipat lebih mahal dibandingkan hidrogen abu-abu (IESR, 2024). Komponen biaya terbesar, yaitu mencapai 70%, berasal dari biaya listrik energi terbarukan, sementara sisanya merupakan depresiasi biaya investasi *electrolyzer* (Kementerian ESDM, 2025c).

Meskipun demikian, biaya *electrolyzer* terus mengalami penurunan seiring dengan peningkatan skala produksi di Tiongkok dan kurva pembelajaran global. Proyeksi menunjukkan bahwa CAPEX *electrolyzer* dapat turun hingga USD 88/kW untuk sistem alkali dan USD 60/kW untuk sistem PEM pada pertengahan abad ini (IESR, 2024). Apabila penurunan ini dikombinasikan dengan turunnya biaya panel surya dan turbin angin, LCOH hidrogen hijau di Indonesia berpotensi mencapai USD 2 per kilogram sebelum tahun 2040 (BloombergNEF, 2023; IESR, 2024). Pada titik tersebut, membangun fasilitas hidrogen hijau baru akan lebih murah dibandingkan mengoperasikan pabrik SMR yang sudah ada.

Di tingkat ASEAN, persaingan untuk menarik investasi semakin ketat. Malaysia dan Vietnam telah menyusun peta jalan hidrogen masing-masing. Total kapasitas produksi hidrogen rendah emisi di kawasan ini diproyeksikan mencapai 480 kiloton per tahun pada 2030, namun baru sekitar 6% proyek yang telah mencapai tahap *Final Investment Decision* (Herbert Smith Freehills, 2025; IEA, 2025). Kondisi ini menunjukkan bahwa peluang masih terbuka lebar, namun negara yang lebih cepat dalam menyederhanakan regulasi akan lebih dahulu menarik modal investasi.

### 3.5. Tantangan Logistik di Negara Kepulauan

Hidrogen memiliki kepadatan energi per volume yang rendah pada suhu kamar. Di negara daratan, hal ini sudah menjadi tantangan tersendiri. Di Indonesia yang terdiri dari ribuan pulau, tantangan logistik tersebut menjadi semakin besar (Abdin et al., 2021). Saat ini terdapat tiga opsi pengangkutan yang menjadi bahan perdebatan, yaitu Hidrogen Cair (LH<sub>2</sub>), Amonia (NH<sub>3</sub>), dan *Liquid Organic Hydrogen Carriers* (LOHC).

Untuk keperluan ekspor jarak jauh ke Jepang atau Eropa, amonia menjadi pilihan utama karena infrastruktur pelabuhan pupuk di Bontang dan Palembang sudah tersedia, dan efisiensi rantai konversi amonia (73%) lebih tinggi dibandingkan LH<sub>2</sub> (60%) (Pellegrini et al., 2024). Akan tetapi, sifat racun amonia menjadikannya tidak layak untuk distribusi di kawasan permukiman.

Untuk distribusi antar pulau di dalam negeri, LOHC menjadi alternatif yang menarik. Senyawa ini dapat diangkut dengan cara yang sama seperti bahan bakar minyak (BBM), yaitu menggunakan kapal tangki, truk, dan terminal milik Pertamina tanpa memerlukan modifikasi yang berarti. Untuk jarak tempuh 150 hingga 300 km, yang merupakan jarak tipikal antar pulau di Indonesia, biaya distribusi LOHC berkisar antara EUR 1,49 hingga 1,90 per kilogram, yang lebih kompetitif dibandingkan tabung gas terkompresi (ERIA, 2025; Staudt et al., 2025). Kekurangan utama LOHC adalah perlunya pembangunan terminal reaktor dehidrogenasi di pelabuhan penerima.

### 3.6. Reformasi Tata Kelola Karbon dan Insentif Fiskal

Peraturan Presiden Nomor 110 Tahun 2025 tentang Penyelenggaraan Instrumen Nilai Ekonomi Karbon membawa empat perubahan penting. Pertama, perdagangan karbon dipisahkan dari pemenuhan *Nationally Determined Contribution* (NDC) nasional sehingga pengembang hidrogen hijau dapat langsung menjual kredit karbon kepada pembeli global. Kedua, standar sukarela internasional seperti Verra dan Gold Standard diakui melalui perjanjian rekognisi timbal balik. Ketiga, Sistem Registri Unit Karbon (SRUK) didirikan untuk mencegah terjadinya perhitungan ganda (*double counting*). Keempat, batas atas alokasi emisi diperjelas untuk menciptakan tekanan kepatuhan yang nyata (AHP Law, 2025; Ashurst, 2025; Umbra Law, 2025).

Selain itu, Kementerian ESDM bersama BPS mendorong penetapan kode Klasifikasi Baku Lapangan Usaha Indonesia (KBLI) khusus untuk rantai pasok hidrogen agar pelaku usaha memiliki identitas legal yang jelas dalam mengurus perizinan, perpajakan, dan penanaman modal asing

(Kementerian ESDM, 2025c). Badan Standardisasi Nasional (BSN) melalui Komite Teknis 27-11 juga telah mengesahkan SNI ISO 14687 untuk spesifikasi kualitas bahan bakar hidrogen dan SNI ISO 19880-1 untuk desain teknis stasiun pengisian hidrogen (BSN, 2025).

Untuk keperluan ekspor, sertifikasi *Guarantee of Origin* (GoO) menjadi syarat yang harus dipenuhi agar produk hidrogen Indonesia dapat memasuki pasar Eropa yang menerapkan *Renewable Energy Directive* (RED II) dan CBAM (CertifHy, 2024; Green Hydrogen Organisation, 2025). Dari sisi insentif fiskal, kebijakan *Tax Holiday* yang selama ini menjadi instrumen utama kini perlu disesuaikan dengan ketentuan Pajak Minimum Global 15%. Sebagai pengganti, pemerintah menyiapkan skema *Refundable Tax Credits* dan *Super Tax Deduction* yang memungkinkan pengurangan pajak hingga di atas 100% untuk investasi di bidang riset dan pengembangan teknologi (MUC Consulting, 2025; OECD, 2025; PwC, 2025).

### 3.7. Peta Kesenjangan Rantai Nilai

Tabel 1 menyajikan rangkuman hasil pemetaan kesenjangan infrastruktur hidrogen lintas sektor di Indonesia.

**Tabel 1.** Peta Kesenjangan Infrastruktur Hidrogen Lintas Sektor

Sektor	Aplikasi	Infrastruktur Kunci	Gap Utama	Rekomendasi
Industri	Amonia/Pupuk, Kilang	<i>electrolyzer</i> , listrik EBT, air, <i>storage</i>	Biaya CAPEX, sertifikasi emisi, <i>premium pricing</i>	Insentif tarif, pasokan <i>baseload</i> panasbumi
Industri	Baja/DRI	Suplai H <sub>2</sub> besar, hub pelabuhan	Volume masif, <i>midstream</i> mahal	Subsidi <i>green steel</i> , integrasi kawasan
Kelistrikan	<i>Co-firing</i> , P2H	<i>Retrofit burner</i> , <i>integrasi grid</i>	NO <sub>x</sub> , efisiensi RTE, aturan grid	Pilot skala besar, standar SNI
Transportasi	FCEV <i>heavy-duty</i>	HRS 350/700 bar, <i>buffer storage</i>	HRS minim, utilisasi rendah	<i>Captive market</i> bus/truk pemerintah
Transportasi	Maritim	Terminal bunkering, kontrol NO <sub>x</sub>	Regulasi, toksisitas amonia	Pilot koridor maritim hijau
Logistik	Distribusi antar pulau	Terminal LOHC, reaktor dehidrogenasi	Belum ada infrastruktur <i>cracking</i>	Modifikasi armada BBM Pertamina
Karbon	GoO, perdagangan karbon	SRUK, lembaga verifikasi	<i>Double counting</i> , defisit standar	Eksekusi Perpres 110/2025
SDM & Safety	SOP, pelatihan	SNI, emergency response	SDM tersertifikasi kurang	Program pelatihan, adopsi SNI

Sumber: Sintesis penulis dari hasil *scoping review*.

### 3.8. Implikasi Kebijakan dan Agenda Riset

Berdasarkan keseluruhan temuan, langkah yang paling realistis dalam jangka pendek adalah memperkuat sektor yang sudah menggunakan hidrogen, yaitu industri amonia dan kilang, sebagai jangkar permintaan awal. Bersamaan dengan itu, beberapa hal perlu segera ditindaklanjuti: penguatan infrastruktur *midstream* termasuk uji coba LOHC untuk distribusi antar pulau; penyusunan kerangka sertifikasi emisi dan *Guarantee of Origin*; percepatan standardisasi keselamatan SNI disertai program

pengembangan sumber daya manusia; serta pemanfaatan ruang fiskal dari Perpres 110/2025 untuk memonetisasi kredit karbon (Gordon et al., 2023; IEA, 2023; Topolski et al., 2022).

Adapun riset berbasis data sekunder yang dapat segera dilakukan meliputi: pemetaan spasial keseimbangan *supply-demand* hidrogen menggunakan data BPS dan ESDM; evaluasi kesiapan pelabuhan untuk mendukung distribusi LOHC; analisis kesenjangan standar keselamatan terhadap benchmark ISO; serta kajian bibliometrik riset hidrogen di ASEAN untuk mengidentifikasi tema-tema yang belum banyak diteliti.

#### 4. Kesimpulan

Studi ini menegaskan bahwa industri pupuk amonia dan kilang minyak, yang selama ini sudah menggunakan hidrogen abu-abu, merupakan titik masuk yang paling logis untuk memulai transisi ke hidrogen rendah karbon di Indonesia. Substitusi secara bertahap di kedua sektor ini tidak memerlukan perombakan pada peralatan pengguna akhir sehingga risiko teknis dan biayanya lebih terkendali. Sebaliknya, sektor transportasi dan pembangkit listrik membutuhkan ekosistem pendukung yang jauh lebih lengkap sebelum dapat beroperasi dalam skala komersial.

Dari sisi produksi, tiga proyek menunjukkan perkembangan yang menjanjikan, yaitu 22 *Green Hydrogen Plant* yang dioperasikan PLN (terutama unit berbasis panas bumi di Kamojang), pilot AEM electrolyzer milik PGE di Ulubelu, dan mega-proyek HEMU berkapasitas 600 MW di Batam. Kemampuan panas bumi untuk mengatasi masalah intermittensi, yang merupakan kendala utama electrolyzer berbasis tenaga surya, menjadikannya keunggulan khas Indonesia yang belum banyak dimiliki oleh negara lain.

Terkait biaya, LCOH hidrogen hijau di Indonesia saat ini masih berada pada kisaran USD 4,3 hingga 8,3 per kilogram. Angka ini memang belum kompetitif dibandingkan dengan hidrogen abu-abu, namun tren penurunan biaya electrolyzer dan energi terbarukan membuka peluang pencapaian target USD 2 per kilogram sebelum tahun 2040. Apabila titik tersebut tercapai, argumen ekonomi untuk beralih ke hidrogen hijau akan menjadi jauh lebih kuat.

Hal yang juga penting untuk dicatat adalah bahwa hambatan pengembangan hidrogen di Indonesia bersifat sistemik. Peningkatan kapasitas produksi saja tidak akan memadai apabila infrastruktur penyimpanan, transportasi, distribusi, dan regulasi pasar belum terbangun secara selaras. Perpres 110/2025 dan penetapan KBLI khusus hidrogen merupakan langkah maju yang signifikan, namun implementasinya perlu dikawal agar tidak berhenti pada tataran kebijakan saja. Dari aspek logistik, LOHC layak dieksplorasi lebih lanjut karena teknologi ini dapat memanfaatkan infrastruktur BBM yang sudah ada, yaitu sebuah solusi yang sangat relevan bagi negara kepulauan.

Persaingan di tingkat ASEAN juga perlu menjadi perhatian serius. Malaysia dan Vietnam telah memulai langkah-langkah strategis masing-masing. Indonesia memiliki keunggulan berupa pasar terbesar di kawasan, cadangan panas bumi terluas di dunia, dan klaster industri pupuk yang sudah mapan. Apabila keunggulan-keunggulan ini tidak segera dimanfaatkan melalui penyederhanaan regulasi dan pemberian kepastian offtake, maka modal investasi asing berpotensi mengalir ke negara lain.

Peta aplikasi dan kesenjangan yang disusun dalam studi ini dapat menjadi titik awal bagi penelitian selanjutnya, antara lain pemetaan spasial keseimbangan *supply-demand* hidrogen, evaluasi tekno-ekonomi LOHC pada rute distribusi kepulauan, serta studi mengenai dampak reformasi tata kelola karbon terhadap kelayakan pendanaan proyek. Pada akhirnya, perpindahan dari fase pilot

menuju skala komersial membutuhkan upaya yang berjalan secara paralel di berbagai bidang sekaligus, dan tidak ada satu bidang pun yang dapat diabaikan.

#### Daftar Pustaka

- Abdin, Z., Tang, C., Liu, Y., & Catchpole, K. (2021). Large-scale stationary hydrogen storage via liquid organic hydrogen carriers. *IScience*, 24(9), 102966. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102966>
- AHP Law. (2025). *Indonesia Sets New Carbon Framework under Presidential Regulation 110/2025*. <https://www.ahp.id/indonesia-sets-new-carbon-framework-under-presidential-regulation-110-2025/>
- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1), 19–32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Ashurst. (2025). *Major Overhaul of Indonesia's Carbon Regulatory Framework*. <https://www.ashurst.com/en/insights/major-overhaul-of-indonesias-carbon-regulatory-framework/>
- Baker McKenzie. (2025). *Hydrogen Developments: Indonesia*. <https://resourcehub.bakermckenzie.com/en/resources/hydrogen-heat-map/asia-pacific/indonesia/topics/hydrogen-developments>
- BioEnergy Times. (2025). *Aslan Energy Capital Targets 2026 for Major Hydrogen Investment in Indonesia*. <https://bioenergytimes.com/aslan-energy-capital-targets-2026-for-major-hydrogen-investment-in-indonesia/>
- BloombergNEF. (2023). *2023 Hydrogen Levelized Cost Update: Green Beats Gray*. <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/2023-hydrogen-levelized-cost-update-green-beats-gray/>
- Boretti, A. (2023). The perspective of hydrogen direct reduction of iron. *Journal of Cleaner Production*, 429, 139585. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139585>
- BSN. (2025). *SNI Teknologi Hidrogen (KT 27-11)*. <https://ebtke.esdm.go.id/informasi-publik/sni-teknologi-hidrogen-kt-27-11>
- CELIOS. (2025). *The Prospects of Decarbonizing Indonesia's Steel Industry*. <https://celios.co.id/wp-content/uploads/2025/03/CELIOS-The-Prospects-of-Indonesias-Steel-Decarbonization-2025-1.pdf>
- CertifHy. (2024). *The Role of Guarantees of Origin and Certificates for the Development of the Clean Hydrogen Industry*. <https://www.certifyhy.eu/sin-categoria/the-role-of-guarantees-of-origin-and-certificates-for-the-development-of-the-clean-hydrogen-industry/>
- Energies Media. (2025). *Indonesia's Aslan Energy Capital Targets 2026 FID for 600 MW Green Hydrogen Venture*. <https://energiesmedia.com/aslan-energy-targets-2026-fid-for-hydrogen/>
- ERIA. (2025). *ASEAN Low-Carbon Energy Technologies Roadmap (ALERT) – Phase I: ASEAN's Long-Term Strategy on Hydrogen and Ammonia*. <https://www.eria.org/research/asean-low-carbon-energy-technologies-roadmap-alert-phase-i-asean-s-long-term-strategy-on-hydrogen-and-ammonia>
- GGGI. (2025). *Indonesia Strives for an Ecosystem of Clean Hydrogen for a Greener Future*. <https://gggi.org/indonesia-strives-for-an-ecosystem-of-clean-hydrogen-for-a-greener-future/>
- Gordon, J. A., Balta-Ozkan, N., & Nabavi, S. A. (2023). Socio-technical barriers to domestic hydrogen futures: Repurposing pipelines, policies, and public perceptions. *Applied Energy*, 336, 120850. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120850>

- Green Hydrogen Organisation. (2025). *Principles and Policy Implementation Options on Certification and Categorisation*. <https://gh2.org/sites/default/files/2025-04/HHP%20Law%20Firm%20%28Third%20Report%29.pdf>
- Herbert Smith Freehills. (2025). *Indonesia's Green Hydrogen Roadmap: A Collaborative Effort for Sustainable Energy*. <https://www.hsfkramer.com/insights/2025-04/indonesia-green-hydrogen-roadmap-a-collaborative-effort-for-sustainable-energy>
- Hesty, N. W., Aminuddin, Supriatna, N. K., Cendrawati, D. G., Nurliyanti, V., Nurrohimi, A., Fithri, S. R., Niode, N., & Al Irsyad, M. I. (2025). Unlocking development of green hydrogen production through techno-economic assessment of wind energy by considering wind resource variability: A case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 138, 1249–1262. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.294>
- IEA. (2023). *Global Hydrogen Review 2023*. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>
- IEA. (2025). *Global Hydrogen Review 2025: Executive Summary*. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025/executive-summary>
- IESR. (2023). *Building Indonesia's Green Hydrogen Production and Market*. <https://iesr.or.id/en/building-indonesias-green-hydrogen-production-and-market/>
- IESR. (2024). *Government Must Build a Competitive National Green Hydrogen Ecosystem*. <https://iesr.or.id/en/government-must-build-a-competitive-national-green-hydrogen-ecosystem/>
- Islam, A., Alam, T., Sheibley, N., Edmonson, K., Burns, D., & Hernandez, M. (2024). Hydrogen blending in natural gas pipelines: A comprehensive review of material compatibility and safety considerations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 93, 1429–1461. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.10.384>
- Kementerian ESDM. (2025a). *Peta Jalan Hidrogen dan Amonia Nasional 2025–2060*. <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-peta-jalan-hidrogen-dan-amonia-nasional.pdf>
- Kementerian ESDM. (2025b). *Peraturan Pemerintah Nomor 40 Tahun 2025 tentang Kebijakan Energi Nasional (NEP 2025)*. <https://esdm.go.id/>
- Kementerian ESDM. (2025c). *Penyusunan KBLI Dorong Percepatan Pengembangan Hidrogen Sebagai Energi Masa Depan*. <https://ebtke.esdm.go.id/artikel/berita/penyusunan-kbli-dorong-percepatan-pengembangan-hidrogen-sebagai-energi-masa-depan>
- Listrik Indonesia. (2025). *Begini Perkembangan 215 Rencana Aksi Hidrogen di Indonesia*. <https://listrikindonesia.com/detail/16281/begini-perkembangan-215-rencana-aksi-hidrogen-di-indonesia>
- MUC Consulting. (2025). *Effect of the Global Minimum Tax: Tax Holiday Replaced by Refundable Tax Credit*. <https://muc.co.id/en/article/effect-of-the-global-minimum-tax-tax-holiday-replaced-by-refundable-tax-credit>
- OECD. (2025). *Super Tax Deduction: Indonesia*. <https://stip.oecd.org/stip/interactive-dashboards/policy-initiatives/2025%2Fdata%2FpolicyInitiatives%2F200003106>
- Palys, M. J., & Daoutidis, P. (2022). Power-to-X: A review and perspective. *Computers & Chemical Engineering*, 165, 107948. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107948>
- Parra, D., Valverde, L., Pino, F. J., & Patel, M. K. (2019). A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 279–294. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.010>

- Pellegrini, L. A., Spatolisano, E., Restelli, F., De Guido, G., de Angelis, A. R., & Lainati, A. (2024). *Green H<sub>2</sub> Transport through LH<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> and LOHC: Opportunities and Challenges*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-66556-1>
- PGE. (2025). *PGE Launches Geothermal-Based Green Hydrogen Pilot Project as a Concrete Step Beyond Electricity*. <https://www.pge.pertamina.com/en/press-release/pge-launches-geothermal-based-green-hydrogen-pilot-project-as-a-concrete-step-beyond-electricity>
- PLN. (2025). *Wujudkan Swasembada Energi, PLN Akselerasi Pengembangan Hidrogen di Tanah Air*. <https://web.pln.co.id/cms/media/siaran-pers/2025/04/wujudkan-swasembada-energi-pln-akselerasi-pengembangan-hidrogen-di-tanah-air/>
- Prasetyo, S. D., Trisnoaji, Y., Arifin, Z., & Mahadi, A. A. (2025). Harnessing unconventional resources for large-scale green hydrogen production: An economic and technological analysis in Indonesia. *Unconventional Resources*, 6, 100174. <https://doi.org/10.1016/j.unres.2025.100174>
- Pupuk Indonesia. (2025). *Lanjutkan Kerja Sama, Pupuk Indonesia, PLN dan ACWA Power Bangun Ekosistem Hidrogen Hijau*. <https://www.pupuk-indonesia.com/media-info/detail/585/>
- PwC. (2025). *Indonesia: Corporate – Tax Credits and Incentives*. <https://taxsummaries.pwc.com/indonesia/corporate/tax-credits-and-incentives>
- Staffell, I., Scamman, D., Velazquez Abad, A., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., Shah, N., & Ward, K. R. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463–491. <https://doi.org/10.1039/C8EE01157E>
- Staudt, C., Hofsaß, C., Lewinski, B. von, Mörs, F., Prabhakaran, P., Bajohr, S., Graf, F., & Kolb, T. (2025). Process Engineering Analysis of Transport Options for Green Hydrogen and Green Hydrogen Derivatives. *Energy Technology*, 13(2), 2301526. <https://doi.org/10.1002/ente.202301526>
- SuaraEnergi. (2025). *Pemerintah Paparkan Potensi Indonesia Sebagai Pemimpin Produsen Hidrogen dan Amonia Regional*. <https://suaraenergi.com/pemerintah-paparkan-potensi-indonesia-sebagai-pemimpin-produsen-hidrogen-dan-amonia-regional/>
- ThinkGeoEnergy. (2025). *Pertamina Investing USD 3m on Geothermal-Powered Green Hydrogen Pilot in Indonesia*. <https://www.thinkgeoenergy.com/pertamina-investing-usd-3m-on-geothermal-powered-green-hydrogen-pilot-in-indonesia/>
- Topolski, K., Reznicek, E. P., Erdener, B. C., San Marchi, C. W., Ronevich, J. A., Fring, L., Simmons, K., Fernandez, O. J. G., Hodge, B.-M., & Chung, M. (2022). *Hydrogen Blending into Natural Gas Pipeline Infrastructure: Review of the State of Technology* (Numbers SAND2022-11790). <https://doi.org/10.2172/1893355>
- Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M. D. J., Horsley, T., Weeks, L., Hempel, S., Akl, E. A., Chang, C., McGowan, J., Stewart, L., Hartling, L., Aldcroft, A., Wilson, M. G., Garritty, C., ... Straus, S. E. (2018). PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467–473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>
- Umbra Law. (2025). *Client Alert – PR 110/2025: New Regulation Reinvents Indonesia's Carbon Trading Regime*. <https://umbra.law/2025/10/16/client-alert-pr-110-2025/>
- Veza, I., Yusuf, A. A., Epin, V., Ismael, M. A., Putra, N. R., Idris, M., Zulkarnain, M., & Opia, A. C. (2025). Hydrogen fuel cell electric vehicles (FCEV) in Indonesia: Policy for clean transport, net-zero emissions, and energy security of hydrogen fuel cell electric vehicles. *Energy* 360, 4, 100041. <https://doi.org/10.1016/j.energ.2025.100041>

