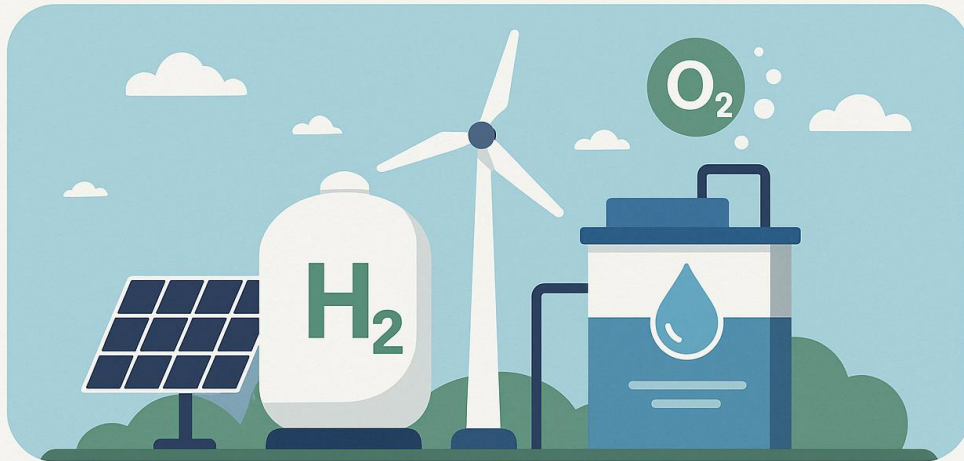


GREEN HYDROGEN: KATALIS BARU DALAM EKONOMI RENDAH KARBON

Oleh: Rudy C Tarumingkeng



Prof Ir Rudy C Tarumingkeng, PhD

Guru Besar Manajemen NUP: 9903252922

Rektor, Universitas Cenderawasih, Papua (1978-1988)

Rektor, Universitas Kristen Krida Wacana, Jakarta (1991-2000)

Ketua Dewan Guru Besar, IPB-University, Bogor (2005-2006)

Data Analyst, dan Ketua Senat Akademik, IBM-ASMI, Jakarta

© RUDYCT Academic Series

rudyct75@gmail.com

Bogor, Indonesia

10 December 2025

GREEN HYDROGEN: KATALIS BARU DALAM EKONOMI RENDAH KARBON

I. Pendahuluan: Dari Krisis Iklim ke Mimpi Ekonomi Rendah Karbon

Dunia sedang bergerak, pelan tetapi pasti, dari ekonomi berbasis fosil menuju **ekonomi rendah karbon**. Pendorongnya jelas: krisis iklim, frekuensi bencana alam yang meningkat, tekanan publik, regulasi karbon, dan transformasi teknologi energi. Dalam lanskap baru ini, muncul satu “aktor baru” yang sering disebut sebagai **game changer: hidrogen hijau (green hydrogen)**.

Selama puluhan tahun, hidrogen sudah digunakan di industri — terutama untuk produksi amonia (pupuk), pemurnian minyak, dan industri kimia. Namun, sebagian besar hidrogen itu diproduksi melalui **bahan bakar fosil** (gas alam atau batubara), yang justru menghasilkan emisi CO₂ tinggi. Inilah yang disebut **hidrogen abu-abu (grey hydrogen)**.

Memasuki dekade 2020-an, logika energi mulai berubah. Kombinasi **energi terbarukan yang makin murah**, kemajuan teknologi **elektroliser**, dan kebutuhan mencapai **net-zero emissions** melahirkan gagasan:

Bagaimana jika hidrogen diproduksi dari **air** menggunakan listrik dari **energi terbarukan** (matahari, angin, hidro, geothermal), sehingga nyaris **tanpa emisi karbon**?

Dari sinilah istilah “**green hydrogen**” memperoleh momentumnya. Ia dipandang bukan sekadar sumber energi baru, tetapi **katalis** yang dapat:

1. Menjembatani sektor listrik dan sektor industri berat.
2. Mengurangi emisi di sektor yang sulit didekarbonisasi (hard-to-abate sectors).
3. Mengubah peta geopolitik energi dan perdagangan global.

Lembaga-lembaga internasional seperti IEA (**International Energy Agency**) dan IRENA menempatkan hidrogen hijau sebagai salah satu pilar penting dalam skenario menuju ekonomi rendah karbon global, meskipun menegaskan bahwa saat ini biayanya masih lebih tinggi dibanding hidrogen fosil dan adopsinya masih di tahap awal.([IEA](#))

II. Spektrum “Warna” Hidrogen: Mengapa “Hijau” Penting?

Dalam literatur energi, hidrogen sering diklasifikasikan berdasarkan **sumber energinya** dan **jejak karbon** dalam proses produksi. Secara ringkas:

1. Grey Hydrogen

- Diproduksi dari gas alam (melalui steam methane reforming) atau batubara (gasifikasi), **tanpa penangkapan karbon**.
- Biaya relatif murah: studi tekno-ekonomi menunjukkan kisaran sekitar **USD 1,5–2,5 per kg**, menjadikannya jalur paling ekonomis sejauh ini, tetapi dengan emisi CO₂ tinggi.([ScienceDirect](#))

2. Blue Hydrogen

- Proses serupa grey hydrogen, tetapi dilengkapi **carbon capture, utilisation and storage (CCUS)**.
- Emisi lebih rendah, namun tetap bergantung pada fosil dan infrastruktur penyimpanan CO₂.

3. Green Hydrogen (Hidrogen Hijau)

- Diproduksi melalui **elektrolisis air** yang menggunakan listrik **100% dari energi terbarukan** (solar, wind, hydro, dll.).
- Hampir **tanpa emisi CO₂** pada saat produksi, sehingga dianggap paling selaras dengan visi ekonomi rendah karbon. ([De Nora](#))

4. Istilah lain: **turquoise, pink, yellow hydrogen**, dan sebagainya, menunjukkan variasi sumber energi (nuklir, campuran grid, dll.), tetapi yang menjadi fokus transisi hijau adalah **green hydrogen**.

Dalam konteks **ekonomi rendah karbon**, green hydrogen menarik karena:

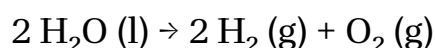
- Tidak hanya mengurangi emisi di sektor **listrik**, tetapi juga sektor **industri berat, transportasi berat, dan kimia** yang sulit dialiri listrik langsung (direct electrification).
- Dapat menjadi **media penyimpanan energi terbarukan** dalam skala besar (long-duration energy storage), menjembatani masalah intermitensi angin dan matahari.

Dengan kata lain, **hidrogen hijau adalah “jembatan molekuler”** antara berbagai sektor, membuatnya sangat potensial sebagai **katalis** transformasi sistem energi.

III. Mekanisme Dasar: Bagaimana Green Hydrogen Diproduksi?

1. Elektrolisis Air: Reaksi Sederhana, Sistem Kompleks

Secara kimia, produksi hidrogen hijau melalui elektrolisis tampak sederhana:



Dengan memberikan arus listrik pada air melalui **elektroliser**, molekul air dipecah menjadi gas hidrogen dan oksigen.

Tantangannya bukan pada persamaan kimia ini, melainkan pada **biaya listrik, efisiensi, dan skala sistem.**

Ada beberapa teknologi utama elektroliser:

- **Alkaline Electrolyser (AEL)**
Teknologi tertua, relatif murah, tetapi kurang fleksibel merespons fluktuasi daya dari energi terbarukan.
- **Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyser**
Lebih kompak, respons cepat, cocok dipadukan dengan PLTS dan PLTB, tetapi biaya material (membran, katalis logam mulia) masih tinggi.
- **Solid Oxide Electrolyser (SOEC)**
Bekerja pada suhu tinggi, berpotensi efisiensi tinggi jika dikombinasikan dengan panas buangan industri, tetapi teknologinya masih dalam tahap pengembangan dan belum masif komersial. ([ScienceDirect](#))

2. Integrasi dengan Energi Terbarukan

Agar “hijau”, listrik yang digunakan harus berasal dari **energi terbarukan**. Di sinilah muncul skenario-skenario berikut:

- **Co-located plants:** PLTS/PLTB/PLTA dibangun berdekatan dengan pabrik elektroliser, sehingga listrik langsung disalurkan ke produksi hidrogen.
- **Grid-based with Guarantees of Origin:** elektroliser terhubung ke jaringan listrik nasional, tetapi diklaim hijau jika operator membeli sertifikat energi terbarukan.
- **Off-grid remote projects:** di lokasi dengan potensi terbarukan besar (gurun, pulau berangin kencang, dsb.) untuk memproduksi hidrogen atau turunannya (amonia, metanol) sebagai komoditas ekspor. ([IRENA](#))

3. Narasi Singkat: Dari Sinar Matahari Menjadi Molekul Hidrogen

Bayangkan suatu kawasan pesisir di Indonesia Timur.

Hamparan **PLTS terapung** di atas waduk, dipadukan dengan **PLTB lepas pantai**. Pada siang hari, ketika beban listrik lokal sudah tercukupi, kelebihan listrik tidak dibiarkan terbuang, melainkan dialirkan ke **pabrik elektroliser**.

Air laut didesalinasi, kemudian diumpankan ke elektroliser. Dari proses itu muncul gas H_2 , yang kemudian:

- Dikompresi dan disimpan di tangki,
- Atau diubah menjadi **amonia hijau** (green ammonia) untuk keperluan pupuk atau bahan bakar kapal,
- Atau dikirim melalui pipa/hub ke kawasan industri baja yang ingin bertransisi dari batubara kokas ke **direct reduced iron (DRI)** berbasis hidrogen.

Inilah gambaran naratif bagaimana green hydrogen menjadi bagian dari ekosistem ekonomi rendah karbon.

IV. Ekonomi Hidrogen Hijau: Biaya, Paritas, dan Tantangan

1. Biaya Produksi Saat Ini

Secara global, **produksi green hydrogen saat ini masih lebih mahal** dibanding hidrogen fosil. Laporan **IEA Global Hydrogen Review 2024** menegaskan bahwa hidrogen terbarukan umumnya masih sekitar **1,5–6 kali** lebih mahal dibanding hidrogen dari fosil tanpa penangkapan karbon (grey hydrogen).([IEA](#))

Data di Eropa pada 2024 menunjukkan bahwa biaya produksi hidrogen via **elektrolisis dengan listrik jaringan** berada di kisaran **4,1–16,1 EUR/kg** tergantung kombinasi faktor (harga listrik, faktor kapasitas, teknologi, dan lokasi).([European Hydrogen Observatory](#))

Sebaliknya, grey hydrogen di berbagai studi tekno-ekonomi masih berkisar sekitar **USD 1,5–2,5 per kg**, sehingga gap ekonomi masih cukup lebar. ([ScienceDirect](#))

2. Faktor Penentu Biaya

Ada beberapa komponen utama biaya green hydrogen:

1. Harga listrik dari energi terbarukan

- Ini adalah faktor paling menentukan. Analisis IESR, misalnya, menyebut bahwa jika harga listrik energi terbarukan bisa turun di bawah **4 sen USD/kWh**, maka biaya produksi hidrogen hijau dapat mendekati, bahkan menyamai, grey hydrogen dalam jangka waktu tertentu. ([IESR](#))

2. CAPEX dan efisiensi elektroliser

- Harga per kW, umur teknis (lifetime), faktor kapasitas, dan efisiensi listrik-ke-hidrogen.

3. Faktor kapasitas (jam operasi per tahun)

- Semakin stabil dan tinggi output listrik terbarukan yang tersedia (misalnya kombinasi angin-matahari-hidro), semakin rendah biaya per kg H₂.

4. Biaya penyimpanan, kompresi, dan transportasi

- Hidrogen adalah gas sangat ringan, perlu kompresi atau konversi ke bentuk lain (amonia, LOHC), yang semua menambah biaya.

3. Menuju Paritas Biaya (Cost Parity)

Beberapa studi dan analisis pasar memproyeksikan bahwa di banyak wilayah, **green hydrogen dapat mencapai cost parity** dengan grey hydrogen sekitar **tahun 2030-an**, terutama jika:

- Harga energi terbarukan terus menurun,
- Kapasitas produksi elektroliser meningkat (economies of scale),
- Kebijakan insentif (subsidi, tax credit, harga karbon) diterapkan lebih agresif. ([BloombergNEF](#))

Artinya, secara ekonomi, *visi* green hydrogen sebagai katalis ekonomi rendah karbon **bukan ilusi**, tetapi juga **bukan otomatis**. Ia sangat tergantung pada desain kebijakan, dinamika pasar, dan kecepatan inovasi teknologi.

4. Realitas Pasar: Antara Ekspektasi dan Koreksi

Beberapa laporan terbaru menunjukkan bahwa euforia awal terhadap hidrogen bersih mulai memasuki fase **koreksi realitas**. Sejumlah proyek hidrogen skala besar di sektor minyak dan gas dilaporkan **ditunda atau dibatalkan** karena kombinasi biaya yang masih tinggi, ketidakpastian kebijakan, dan lemahnya permintaan jangka pendek. ([Financial Times](#))

Ini mengajarkan bahwa green hydrogen **bukan peluru perak**, melainkan bagian dari portofolio solusi yang harus diposisikan secara realistis.

V. Peran Green Hydrogen dalam Ekonomi Rendah Karbon

Mengapa banyak laporan menyebut hidrogen hijau sebagai **katalis** dalam ekonomi rendah karbon? Karena ia mampu **membuka jalur dekarbonisasi** di sektor-sektor yang sulit dijangkau oleh elektrifikasi langsung.

1. Dekarbonisasi Industri Berat

a. Industri Baja

Produksi baja konvensional sangat bergantung pada batubara kokas (coke) dan menghasilkan emisi CO₂ besar. Teknologi **Direct Reduced Iron (DRI)** berbasis hidrogen memungkinkan:

- Menggantikan karbon (C) sebagai reduktan dengan hidrogen (H₂).
- Emisi utama bergeser dari CO₂ menjadi H₂O (uap air) — dengan syarat hidrogen yang digunakan adalah **green hydrogen**.

Proyek-proyek “green steel” di Eropa dan negara Nordik menjadi contoh bagaimana hidrogen hijau dapat memutus rantai karbon di

industri yang selama ini dianggap mustahil untuk “hijau”.([ScienceDirect](#))

b. Industri Amonia dan Pupuk

Amonia tradisional diproduksi dengan hidrogen dari fosil. Menggantinya dengan hidrogen hijau menghasilkan **green ammonia** yang dapat:

- Mengurangi jejak karbon sektor pupuk,
- Menjadi **carrier** hidrogen untuk perdagangan global dan bahan bakar kapal di masa depan.([World Trade Organization](#))

Narasi Indonesia:

PT Pupuk Kujang, misalnya, telah menguji **amonia “hibrida”** yang memadukan hidrogen hijau dengan hidrogen abu-abu untuk uji coba co-firing di PLTU Labuan — sebuah langkah transisi menuju skala yang lebih besar di masa depan.([AHK Indonesien](#))

c. Industri Petrokimia dan Kilang

Kilang minyak menggunakan hidrogen untuk desulfurisasi. Mengganti hidrogen fosil dengan green hydrogen dapat menurunkan jejak karbon produk BBM dan petrokimia.

2. Energi Listrik dan Penyimpanan Jangka Panjang

Sistem listrik berbasis energi terbarukan membutuhkan **penyimpanan** agar tetap andal ketika matahari tidak bersinar dan angin tidak bertiup. Di sinilah hidrogen hijau memainkan peran:

- Saat surplus energi terbarukan → listrik digunakan untuk memproduksi H_2 .
- Saat defisit → H_2 diubah kembali menjadi listrik melalui **fuel cell** atau turbin gas yang kompatibel.

Meskipun efisiensi siklus penuh belum seideal baterai untuk penyimpanan jangka pendek, untuk **penyimpanan musiman (seasonal storage)**, hidrogen menawarkan opsi yang lebih realistis.([De Nora](#))

3. Transportasi Berat: Truk, Kapal, dan Pesawat

- **Truk jarak jauh dan alat berat:** Fuel cell hydrogen menawarkan jangkauan yang lebih panjang dan waktu pengisian cepat dibanding baterai di beberapa skenario.
- **Maritim:** Ammonia hijau dan metanol hijau sebagai bahan bakar kapal bebas karbon mulai diuji di rute internasional.
- **Aviation:** Synthetic e-fuels berbasis green hydrogen berpotensi mengurangi emisi aviasi, meski biayanya masih tinggi.

Green hydrogen dalam konteks ini bertindak sebagai “**bahan bakar molekul hijau**” untuk transportasi lintas batas yang sulit sepenuhnya dialiri listrik.

VI. Dimensi Geopolitik: Hydrogen Diplomacy dan Rantai Pasok Global

1. Hidrogen Hijau sebagai Komoditas Baru

Laporan WTO dan IRENA menyoroti bahwa jika produksi green hydrogen tumbuh pesat, ia akan:

- Menciptakan **rantai pasok baru**: dari manufaktur elektroliser, infrastruktur pipa, kapal tanker amonia, hingga sertifikasi karbon.
- Menghasilkan **arus perdagangan baru**: negara kaya energi terbarukan (anggur “matahari & angin”) menjadi “eksportir molekul energi” ke negara industri besar yang kekurangan lahan atau sumber terbarukan. ([World Trade Organization](#))

Negara seperti **Australia, Chili, Maroko, Namibia, dan beberapa negara di Asia Tenggara** diproyeksikan menjadi pemain penting ekspor hidrogen/amonia hijau ke **Uni Eropa, Jepang, dan Korea Selatan**.

2. Keadilan Transisi dan Risiko “Kolonialisme Energi Baru”

Di sisi lain, muncul kekhawatiran bahwa:

- Negara berkembang hanya akan menjadi **“ladang produksi”** untuk ekspor hidrogen, sementara nilai tambah teknologi dan manufaktur tetap terkonsentrasi di negara maju.
- Jika tidak diatur, eksploitasi sumber daya (air, lahan, dan energi terbarukan) untuk ekspor hidrogen bisa berbenturan dengan kebutuhan domestik (listrik rakyat, air bersih, pangan).

Karena itu, diskursus green hydrogen tidak bisa dilepaskan dari prinsip **“just transition”** dan kedaulatan energi.

VII. Peta Jalan dan Prospek Green Hydrogen di Indonesia

Indonesia memiliki kombinasi yang sangat menarik untuk pengembangan green hydrogen: **potensi energi terbarukan besar, kebutuhan dekarbonisasi industri, serta peluang ekspor regional.**

1. Potensi Sumber Daya dan Lokasi

Kajian lembaga seperti IESR dan berbagai studi energi menunjukkan bahwa:

- Potensi proyek energi terbarukan yang layak secara finansial di Indonesia disebut dapat mencapai sekitar **333 GW**, yang dapat menjadi basis untuk produksi green hydrogen jika tidak seluruh listriknya dapat terserap PLN.([PwC](#))
- Pemerintah dan pemangku kepentingan telah mengidentifikasi **belasan lokasi potensial** (sekitar 17 site) untuk produksi hidrogen hijau dengan estimasi biaya produksi di 2040 sekitar **USD 1,9–3,9/kg**, relatif kompetitif dibanding kisaran global saat ini **USD 2,7–12,8/kg**.([IESR](#))
- Beberapa provinsi seperti **Sumatera Utara, Kalimantan Timur, dan Sumatera Selatan** mulai muncul sebagai lokasi kunci untuk proyek hidrogen rendah karbon karena kombinasi sumber terbarukan dan infrastruktur energi.([Petromindo](#))

Di tingkat makro, pemerintah Indonesia juga menyatakan niat untuk menarik investasi hingga sekitar **USD 25,2 miliar** di sektor hidrogen hijau hingga 2060 sebagai bagian dari strategi net-zero. ([Green Hydrogen Organisation](#))

2. Narasi Kasus: Green Ammonia dan PLTU

Contoh konkret (narasi sederhana) yang sudah terjadi:

- **PT Pupuk Kujang** mengembangkan pilot proyek yang menggabungkan hidrogen hijau ke dalam rantai produksi amonia, menghasilkan “**hybrid green ammonia**”.
- Amonia ini kemudian digunakan dalam uji **co-firing** di **PLTU Labuan**, sebagai langkah awal menggantikan sebagian batubara dengan bahan bakar rendah karbon. ([AHK Indonesien](#))

Narasi seperti ini menunjukkan bahwa green hydrogen **tidak harus langsung serba besar**. Ia bisa dimulai dari skala pilot yang menghubungkan **industri pupuk, pembangkit listrik, dan kebijakan transisi energi**.

3. Peluang Strategis Indonesia

Beberapa peluang strategis:

1. Dekarbonisasi industri berbasis sumber daya alam

- Smelter nikel, tembaga, dan industri logam lain berpotensi menjadi kluster pengguna hidrogen hijau untuk proses reduksi atau sebagai bahan bakar proses.

2. Pupuk dan ketahanan pangan

- Produksi amonia hijau bukan hanya peluang ekspor, tetapi juga kontribusi bagi **ketahanan pangan nasional** melalui rantai pupuk yang lebih rendah jejak karbon.

3. Ekspor ke negara tetangga

- Jepang, Korea, dan Singapura memiliki keterbatasan sumber daya terbarukan dan sedang mencari pemasok hidrogen hijau di kawasan. Indonesia berpotensi menjadi

“green hydrogen hub” regional jika infrastruktur dan regulasinya siap.

4. Pemanfaatan potensi energi terbarukan “remote”

- Potensi matahari dan angin di kawasan terpencil yang sulit disambungkan ke jaringan PLN dapat dioptimalkan melalui skema produksi hidrogen untuk ekspor atau industri lokal.

4. Tantangan Utama di Indonesia

Namun, tantangannya tidak kecil:

- **Regulasi dan kebijakan yang belum pasti**
 - Skema tarif, insentif, standar sertifikasi “hijau”, dan integrasi dengan RUPTL/RUEN masih terus berkembang.
- **Keterbatasan infrastruktur**
 - Pipa hidrogen, terminal ekspor amonia, jaringan transmisi listrik untuk memasok proyek-proyek besar.
- **Kapasitas teknis dan SDM**
 - Perlu ekosistem riset–industri–pendidikan tinggi yang kuat untuk mengembangkan teknologi lokal dan menghindari ketergantungan penuh pada impor teknologi.
- **Risiko “proyek mercusuar”**
 - Tanpa analisis kelayakan mendalam dan desain kebijakan yang matang, ada risiko proyek besar hanya berhenti di fase MoU atau tidak mencapai operasi optimal — seperti yang terlihat di beberapa proyek global yang ditunda atau dibatalkan. ([Financial Times](#))

VIII. Model Bisnis dan Kebijakan: Menjadikan Green Hydrogen Benar-Benar Katalis

Agar green hydrogen menjadi **katalis** (bukan hanya jargon), diperlukan kombinasi **model bisnis inovatif** dan **kebijakan publik yang konsisten**.

1. Menciptakan Permintaan (Demand Creation)

Beberapa instrumen yang banyak dibahas di dunia:

- **Mandat atau standard**
 - Misalnya kewajiban minimum penggunaan hidrogen rendah karbon di kilang, baja, atau pupuk (quota-based).
- **Contracts for Difference (CfD)**
 - Pemerintah menanggung selisih antara biaya produksi green hydrogen dan harga pasar hidrogen fosil, untuk mendorong proyek pionir.
- **Carbon pricing dan pajak karbon**
 - Dengan memberi harga pada emisi CO₂, biaya relatif grey hydrogen naik, sehingga green hydrogen menjadi lebih kompetitif. ([IRENA](#))

2. Pengembangan Hydrogen Hubs

Alih-alih membangun fasilitas terpisah di banyak tempat, banyak negara mengembangkan **hydrogen hubs atau valleys**, yaitu:

- Kluster regional di mana produksi, penyimpanan, distribusi, dan konsumen hidrogen terkonsentrasi.
- Hal ini menurunkan biaya infrastruktur dan memudahkan integrasi dengan jaringan listrik serta pelabuhan.

Untuk Indonesia, hydrogen hubs bisa diarahkan ke:

- **Kawasan industri existing** (Misal: Cilegon, kawasan smelter di Sulawesi, kawasan pupuk di Cikampek/Gresik).
- **Kawasan pelabuhan utama** (untuk ekspor amonia/metanol hijau).

3. Kolaborasi Multi-Helix

Transisi ini tidak bisa dikerjakan hanya oleh satu aktor. Diperlukan:

- **Pemerintah:** regulasi, insentif, perencanaan ruang dan energi.
- **BUMN & swasta:** investasi, inovasi model bisnis, proyek pionir.
- **Perguruan tinggi dan lembaga riset:** riset teknologi, kajian kebijakan, pengembangan SDM.
- **Masyarakat sipil:** memastikan transisi tetap adil dan tidak mengorbankan kebutuhan dasar masyarakat (listrik, air, lahan).

Green hydrogen sebagai katalis hanya mungkin jika **jejaring aktor** ini saling menguatkan, bukan saling menunggu.

IX. Perspektif Transisi Adil: Pekerjaan, Keadilan, dan Risiko Sosial

Ekonomi rendah karbon bukan hanya soal teknologi, tetapi juga **soal manusia**. Dalam konteks green hydrogen:

1. Peluang Penciptaan Lapangan Kerja

- Manufaktur panel surya, turbin angin, elektroliser, konstruksi infrastruktur hidrogen, operasi-pemeliharaan, hingga sektor pendukung (logistik, jasa, pendidikan).

2. Risiko bagi Pekerja Fosil

- Pekerja di sektor batubara, minyak, dan gas mungkin terdampak jika permintaan beralih. Kebijakan transisi harus memikirkan **re-skilling dan up-skilling** agar mereka tidak tertinggal.

3. Keadilan Antarwilayah

- Proyek green hydrogen yang besar bisa memengaruhi **penggunaan lahan dan sumber air** di suatu daerah. Masyarakat lokal harus dilibatkan sejak awal agar tidak terjadi konflik sumber daya. ([IRENA](#))

4. Kedaulatan Energi dan Ketahanan Pangan

- Jika daerah dengan potensi besar energi terbarukan dan air difokuskan untuk ekspor hidrogen, perlu dipastikan bahwa **kebutuhan listrik domestik dan air bersih** tetap diprioritaskan.

Dalam ekonomi rendah karbon yang sehat, green hydrogen harus diposisikan sebagai **jalan bersama**, bukan hanya peluang bisnis segelintir pihak.

X. Menimbang Peluang dan Risiko: Realisme di Tengah Optimisme

1. Peluang

- **Multi-sektor:** dapat mengurangi emisi di sektor listrik, industri, dan transportasi sekaligus.
- **Komplementer dengan elektrifikasi:** bukan bersaing dengan baterai dan kendaraan listrik, melainkan melengkapi di segmen yang tidak mudah dielektrifikasi langsung.
- **Menciptakan rantai nilai baru:** dari manufaktur elektroliser hingga jasa sertifikasi karbon dan perdagangan internasional.

2. Risiko dan Batasan

- **Over-hype dan proyek tidak realistis:** beberapa proyek global yang ditunda menunjukkan bahwa kombinasi biaya tinggi dan permintaan yang belum terbentuk dapat menggagalkan proyek. ([Financial Times](#))
- **Persaingan penggunaan lahan dan air:** produksi green hydrogen skala besar butuh air (walau dapat diambil dari laut dengan desalinasi) dan lahan untuk pembangkit terbarukan.
- **Ketidakpastian regulasi dan pembiayaan:** investor memerlukan sinyal kebijakan jangka panjang yang stabil.

3. Prinsip “No Regret”

Sebagai katalis ekonomi rendah karbon, green hydrogen sebaiknya dikembangkan dengan prinsip:

- **Fokus pada sektor yang benar-benar “hard-to-abate”**, seperti baja, kimia berat, dan transportasi berat.
- **Menghindari penggunaan yang tidak efisien**, misalnya mengganti penggunaan listrik langsung yang sudah bersih dengan hidrogen hanya demi “label hijau”.
- **Mengintegrasikan dengan strategi energi nasional**, bukan berdiri terpisah sebagai “proyek tren sesaat”.

XI. Penutup: Green Hydrogen sebagai Katalis, Bukan Satu-satunya Jawaban

Jika kita kembali ke judul:

“Green Hydrogen: Katalis Baru dalam Ekonomi Rendah Karbon”

maka ada beberapa gagasan kunci yang dapat disarikan sebagai fondasi artikel panjang Bapak:

1. **Green hydrogen adalah energi pembawa (energy carrier), bukan sumber energi primer.** Ia mengubah listrik terbarukan menjadi molekul yang bisa disimpan, diangkut, dan digunakan lintas sektor.
2. **Perannya katalitik, bukan tunggal.** Ia mempercepat dekarbonisasi sektor-sektor yang sulit dielektrifikasi langsung: industri berat, kimia, dan transportasi berat.
3. **Secara ekonomi, green hydrogen sedang bergerak dari mahal dan eksperimental menuju lebih kompetitif**, dengan proyeksi tercapainya paritas biaya di beberapa wilayah sekitar 2030-an — sangat bergantung pada turunnya biaya energi terbarukan, skala elektroliser, dan kebijakan yang tepat.([IEA](#))
4. **Secara geopolitik, green hydrogen berpotensi mengubah peta perdagangan energi:** negara kaya sumber terbarukan dapat

menjadi eksportir “molekul hijau”. Namun, ini menuntut arsitektur perdagangan dan tata kelola baru yang menjamin keadilan dan keberlanjutan. ([World Trade Organization](#))

5. Bagi Indonesia, green hydrogen adalah peluang sekaligus ujian.

- Peluang karena kita punya potensi energi terbarukan besar, kebutuhan dekarbonisasi industri, dan kedekatan dengan pasar Jepang–Korea–Singapura.
- Ujian karena keberhasilan sangat bergantung pada kualitas perencanaan, desain kebijakan, dan kemampuan mengintegrasikan transisi ini dengan agenda pembangunan nasional (ketahanan energi, ketahanan pangan, pengembangan SDM, dan pemerataan regional). ([Green Hydrogen Organisation](#))

6. Ekonomi rendah karbon yang berkeadilan mensyaratkan bahwa green hydrogen harus dirancang untuk memperkuat kesejahteraan manusia, bukan sekadar mengganti satu komoditas energi dengan komoditas energi baru.

- [Financial Times](#)
- [thetimes.com](#)
- [Financial Times](#)

REFLEKSI DAN DISKUSI

“Green Hydrogen: Katalis Baru dalam Ekonomi Rendah Karbon”

Bagian ini dimaksudkan sebagai bahan renungan kritis sekaligus panduan diskusi kelas atau FGD, baik di lingkungan akademik maupun praktisi kebijakan dan bisnis.

1. Dari Euforia Teknologi ke Kearifan Transisi

Green hydrogen sering dipromosikan sebagai “jawaban baru” atas krisis iklim. Namun, setiap teknologi besar selalu membawa **harapan** sekaligus **risiko baru**. Refleksi pertama yang perlu diajukan adalah:

- Apakah kita sedang mengulangi pola lama, yaitu menggantungkan masa depan pada satu komoditas energi baru, tanpa mereformasi **pola konsumsi energi** dan **gaya hidup** yang boros?
- Apakah green hydrogen akan mendorong perubahan struktur ekonomi menuju efisiensi, keadilan, dan keberlanjutan, atau hanya mengganti satu “mesin uang” dengan mesin uang yang lain?

Transisi energi yang bijak menuntut kita untuk melihat green hydrogen **bukan sekadar solusi teknis**, tetapi bagian dari **pergeseran paradigma**: dari logika “eksploitasi tanpa batas” menuju logika “pengelolaan bijak dan regeneratif”.

2. Green Hydrogen dan Keadilan Iklim

Green hydrogen membutuhkan:

- Lahan yang luas untuk PLTS/PLTB,
- Akses air (desalinasi atau air tawar),
- Modal finansial dan teknologi tinggi.

Pertanyaan keadilan muncul di sini:

1. Siapa yang paling diuntungkan?

- Apakah hanya perusahaan besar dan negara maju yang memiliki modal teknologi, ataukah masyarakat lokal juga memperoleh manfaat dalam bentuk lapangan kerja

bermutu, transfer pengetahuan, dan perbaikan layanan dasar?

2. Siapa yang menanggung biaya sosial dan ekologis?

- Jika pembangunan klaster energi terbarukan dan pabrik hidrogen mengalihfungsikan lahan pertanian atau pesisir, bagaimana nasib komunitas yang sebelumnya menggantungkan hidup di sana?
- Apakah ada mekanisme konsultasi publik yang transparan dan adil?

3. Apakah green hydrogen akan memperkuat atau melemahkan kedaulatan energi nasional?

- Bila sebagian besar produksi dialokasikan untuk ekspor, sementara di dalam negeri listrik masih defisit dan BBM fosil tetap dominan, maka transisi energi justru berpotensi menciptakan “**kolonialisme energi bentuk baru**”.

Refleksi keadilan ini penting agar narasi “ekonomi rendah karbon” tidak terjebak menjadi sekadar **proyek hijau elitis**, tetapi benar-benar menyentuh dimensi kesejahteraan rakyat.

3. Menimbang Prioritas: Di Mana Green Hydrogen Paling Masuk Akal?

Secara teknis dan ekonomis, banyak ahli mengingatkan bahwa green hydrogen sebaiknya **tidak digunakan untuk semua hal**. Ada prinsip “no regret uses” yang bisa dijadikan dasar:

1. Sektor sulit-dikurangi (hard-to-abate)

- Baja, semen, kimia berat, dan transportasi jarak jauh adalah sektor yang paling rasional untuk diprioritaskan.
- Mengarahkan green hydrogen ke penggunaan yang bisa dielektrifikasi langsung (misalnya mengganti motor listrik

dengan fuel cell di sektor yang sudah cocok dengan baterai) justru **tidak efisien**.

2. Integrasi dengan ketahanan pangan dan industri nasional

- Pengembangan **green ammonia** untuk industri pupuk bisa diposisikan bukan hanya sebagai komoditas ekspor, tetapi juga sebagai pilar ketahanan pangan domestik.
- Di sini ada ruang diskusi: bagaimana menyeimbangkan tujuan ekspor, kebutuhan industri, dan misi menurunkan jejak karbon rantai pasok pangan?

3. Prioritas investasi negara berkembang

- Dengan sumber daya fiskal yang terbatas, pertanyaannya:
 - Lebih mendesak mana, membangun jaringan listrik yang handal untuk desa-desa yang belum terlistriki, atau membangun proyek green hydrogen skala besar untuk ekspor?
 - Bagaimana menimbang **manfaat jangka pendek** bagi rakyat dengan **manfaat jangka panjang** bagi sistem energi dan iklim?

Refleksi prioritas ini mengingatkan bahwa ekonomi rendah karbon bukan kompetisi “siapa paling futuristik”, melainkan **siapa paling bijak mengalokasikan sumber daya**.

4. Tantangan Tata Kelola: Regulasi, Transparansi, dan Sertifikasi “Hijau”

Green hydrogen akan melibatkan:

- Skema tarif listrik energi terbarukan,
- Insentif fiskal (subsidi, tax credit, dll.),
- Sertifikasi hijau (berapa persen benar-benar dari energi terbarukan, bagaimana jejak air dan lahan diukur),

- Mekanisme perdagangan internasional (standar, label karbon, dsb.).

Beberapa pertanyaan reflektif:

1. Bagaimana memastikan transparansi sertifikasi?

- Jika suatu proyek mengklaim dirinya “green”, publik berhak tahu:
 - Berapa persentase listrik yang benar-benar berasal dari energi terbarukan?
 - Apakah ada mekanisme audit independen?

2. Bagaimana mencegah “greenwashing”?

- Apakah mungkin sebuah proyek menggunakan label “hidrogen hijau” untuk mendapatkan insentif, padahal praktik di lapangan tidak sepenuhnya selaras dengan prinsip keberlanjutan?

3. Apa peran lembaga pendidikan dan riset?

- Universitas dan lembaga riset bisa berperan sebagai penyeimbang narasi, menyediakan kajian kritis, data, dan rekomendasi berbasis bukti — bukan sekadar mengikuti arus promosi teknologi.

Dengan kata lain, tata kelola green hydrogen harus dirancang **setransparan mungkin**, sehingga kepercayaan publik dan pelaku pasar dapat terjaga.

5. Green Hydrogen dan Pengembangan SDM: Dari Teknisi ke “Energy System Thinker”

Ekonomi rendah karbon yang bertumpu pada green hydrogen memerlukan jenis kapasitas manusia yang baru:

1. Keterampilan teknis baru

- Desain, operasi, dan pemeliharaan elektroliser, fuel cell, sistem penyimpanan, dan perangkat keselamatan hidrogen.
- Integrasi sistem energi terbarukan, jaringan listrik, dan manajemen beban.

2. Kemampuan sistemik (system thinking)

- Mampu melihat keterkaitan antara kebijakan energi, industri, lingkungan, sosial, dan geopolitik.
- Memahami bahwa keputusan investasi di sektor energi akan berdampak pada pola pekerjaan, struktur ekonomi daerah, dan tata ruang.

3. Etika profesi dan tanggung jawab sosial

- Insinyur, ekonom, dan pembuat kebijakan energi akan berhadapan langsung dengan konsekuensi jangka panjang keputusan mereka terhadap generasi mendatang.
- Di sini muncul pertanyaan mendasar:
 - Bagaimana mengintegrasikan etika keberlanjutan ke dalam kurikulum teknik, ekonomi, dan manajemen?
 - Apakah generasi muda hanya diajarkan mengoptimalkan profit dan efisiensi, atau juga diajak menimbang keadilan iklim dan tanggung jawab antargenerasi?

Refleksi ini menekankan bahwa green hydrogen bukan hanya proyek infrastruktur, tetapi juga **proyek peradaban** yang menuntut transformasi cara kita mendidik dan memimpin.

6. Pertanyaan Diskusi untuk Kelas, Seminar, atau FGD

Berikut sejumlah pertanyaan pemantik diskusi yang dapat digunakan dalam kegiatan pembelajaran atau lokakarya:

A. Perspektif Kebijakan dan Ekonomi

1. Jika Anda adalah pembuat kebijakan di negara berkembang, bagaimana Anda menyeimbangkan investasi di green hydrogen dengan kebutuhan mendesak lain (pendidikan, kesehatan, infrastruktur dasar)?
2. Apakah Indonesia sebaiknya memposisikan diri sebagai **produsen dan eksportir green hydrogen**, atau lebih mengutamakan pemanfaatan domestik untuk dekarbonisasi industri nasional? Mengapa?
3. Sejauh mana kebijakan harga karbon (carbon pricing) diperlukan untuk membuat green hydrogen menjadi kompetitif dibanding hidrogen fosil?

B. Perspektif Sosial dan Keadilan Iklim

4. Bagaimana menjamin bahwa proyek green hydrogen tidak menimbulkan konflik lahan dan air dengan masyarakat lokal? Model partisipasi seperti apa yang perlu dikembangkan?
5. Apa yang dimaksud dengan **transisi energi yang adil** (just transition) dalam konteks pengembangan green hydrogen? Berikan contoh kebijakan atau program yang dapat mengurangi dampak negatif pada pekerja di sektor fosil.

C. Perspektif Teknologi dan Inovasi

6. Di antara berbagai aplikasi green hydrogen (baja hijau, pupuk hijau, bahan bakar kapal, penyimpanan energi), sektor mana yang paling layak dijadikan prioritas di Indonesia? Jelaskan dengan argumen teknis dan ekonomis.
7. Menurut Anda, apakah fokus riset di perguruan tinggi sebaiknya lebih banyak pada **pengembangan teknologi dasar** (misalnya peningkatan efisiensi elektroliser) atau pada **inovasi model bisnis dan kebijakan**? Mengapa?

D. Perspektif Etika dan Filosofis

8. Apakah mengejar ekonomi rendah karbon melalui green hydrogen otomatis berarti kita telah bertindak etis terhadap generasi

mendatang? Apa saja “blind spot” moral yang mungkin masih tersisa?

9. Bagaimana peran nilai-nilai lokal (misalnya kearifan tradisional tentang alam dan kebersahajaan hidup) dalam mengarahkan penggunaan teknologi seperti green hydrogen agar tidak jatuh menjadi sekadar alat baru untuk konsumsi berlebihan?

7. Penutup Reflektif

Green hydrogen membuka horizon baru: ia menawarkan visi tentang dunia di mana **energi bersih** tidak hanya mengalir dalam kabel listrik, tetapi juga tersimpan dalam molekul yang dapat menggerakkan industri, transportasi, dan pertanian secara lebih ramah iklim.

Namun, pada saat yang sama, ia menguji **kedewasaan kolektif** kita:

- Apakah teknologi digunakan sekadar untuk mempertahankan pola produksi dan konsumsi yang sama, hanya dengan label “hijau”?
- Ataukah ia menjadi katalis bagi transformasi lebih dalam: cara kita merencanakan pembangunan, memandang keadilan antargenerasi, dan menghargai bumi sebagai rumah bersama?

Pertanyaan-pertanyaan reflektif inilah yang diharapkan dapat memperkaya pembacaan atas artikel “**Green Hydrogen: Katalis Baru dalam Ekonomi Rendah Karbon**”, sehingga topik ini tidak berhenti pada level teknis, tetapi mengalir ke percakapan yang lebih luas tentang masa depan ekonomi, lingkungan, dan kemanusiaan.

GLOSARIUM

1. Ammonia hijau (*green ammonia*)

Amonia yang diproduksi menggunakan hidrogen hijau dan nitrogen dari udara. Dapat dipakai sebagai bahan baku pupuk rendah emisi maupun carrier/bahan bakar dalam transisi energi.

2. Carbon capture, utilization and storage (CCUS)

Serangkaian teknologi untuk menangkap CO₂ dari proses industri atau pembangkit, kemudian dimanfaatkan kembali (utilization) atau disimpan jangka panjang di formasi geologi (storage).

3. Carbon pricing (harga karbon)

Kebijakan yang memberi “harga” atas emisi CO₂ melalui pajak karbon, perdagangan emisi, atau instrumen lain sehingga mendorong pelaku ekonomi beralih ke teknologi rendah karbon, termasuk green hydrogen.

4. Co-firing amonia

Pencampuran amonia (termasuk ammonia hijau atau hybrid green ammonia) dengan batubara atau bahan bakar lain di boiler/turbin PLTU untuk menurunkan porsi batubara dan emisi karbon.

5. Elektrolis (*electrolysis*)

Proses pemecahan air (H₂O) menjadi hidrogen (H₂) dan oksigen (O₂) dengan menggunakan energi listrik. Jika listrik berasal dari energi terbarukan, hidrogen yang dihasilkan dapat diklasifikasikan sebagai hidrogen hijau.

6. Elektroliser alkaline (AEL)

Jenis elektroliser yang menggunakan larutan elektrolit basa (alkaline). Teknologinya relatif matang dan biaya investasi lebih rendah, tetapi responsnya kurang fleksibel terhadap fluktuasi listrik dari PLTS/PLTB.

7. Elektroliser PEM (*proton exchange membrane*)

Elektroliser yang menggunakan membran penukar proton. Mampu merespons perubahan daya dengan cepat dan cocok dipadukan

dengan energi terbarukan intermiten, meski biaya material dan katalisnya lebih tinggi.

8. Elektroliser SOEC (*solid oxide electrolyser cell*)

Elektroliser suhu tinggi yang bekerja menggunakan elektrolit keramik padat. Berpotensi mencapai efisiensi tinggi jika memanfaatkan panas buangan industri, tetapi masih pada tahap pengembangan dan demonstrasi.

9. Ekonomi rendah karbon (*low-carbon economy*)

Model pembangunan ekonomi yang menekan emisi gas rumah kaca melalui peningkatan efisiensi energi, peralihan ke energi terbarukan, dekarbonisasi industri, dan perubahan pola konsumsi. Green hydrogen diposisikan sebagai salah satu pilar pendukung.

10. Energi terbarukan (*renewable energy*)

Sumber energi yang berasal dari proses alam yang berulang, seperti surya, angin, air, panas bumi, dan biomassa. Dalam konteks hidrogen hijau, energi ini menjadi input listrik utama untuk proses elektrolisis.

11. Fuel cell (sel bahan bakar)

Perangkat elektrokimia yang mengubah energi kimia hidrogen langsung menjadi listrik dan panas dengan emisi utama berupa uap air. Digunakan pada kendaraan hidrogen, sistem pembangkit, dan aplikasi stasioner lainnya.

12. Geopolitik energi hidrogen

Dampak strategis dan politik dari berkembangnya produksi, perdagangan, dan penggunaan hidrogen (terutama hidrogen hijau) terhadap hubungan antarnegara, peta impor–ekspor energi, serta ketergantungan teknologi.

13. Green hydrogen (hidrogen hijau)

Hidrogen yang diproduksi dari air melalui elektrolisis dengan listrik yang bersumber sepenuhnya dari energi terbarukan, sehingga emisi CO₂ dari proses produksinya sangat rendah hingga mendekati nol.

14. Grey hydrogen (hidrogen abu-abu)

Hidrogen yang diproduksi dari bahan bakar fosil (umumnya gas alam atau batubara) tanpa penangkapan CO₂. Biaya produksinya rendah tetapi intensitas emisinya tinggi.

15. Hard-to-abate sectors (sektor sulit-dikurangi)

Sektor industri dan transportasi yang sulit didekarbonisasi hanya dengan elektrifikasi langsung, misalnya baja, semen, kimia berat, pelayaran jarak jauh, dan penerbangan. Green hydrogen banyak ditargetkan untuk sektor ini.

16. Hydrogen diplomacy (diplomasi hidrogen)

Upaya diplomatik antarnegara untuk menjalin kerja sama produksi, investasi, dan perdagangan hidrogen hijau dan turunannya, termasuk pembiayaan, transfer teknologi, dan standar sertifikasi.

17. Hydrogen hub / hydrogen valley

Kawasan atau klaster geografis di mana produksi, penyimpanan, distribusi, dan konsumsi hidrogen terkonsentrasi. Pendekatan ini menurunkan biaya infrastruktur dan memperkuat ekosistem industri hidrogen.

18. Hydrogen value chain (rantai nilai hidrogen)

Seluruh mata rantai aktivitas terkait hidrogen: produksi (upstream), penyimpanan dan transportasi (midstream), hingga pemanfaatan di industri, pembangkitan listrik, dan transportasi (downstream).

19. Just transition (transisi berkeadilan)

Pendekatan transisi energi yang memastikan peralihan menuju ekonomi rendah karbon tidak mengorbankan pekerja dan komunitas rentan, melainkan menyediakan perlindungan sosial, pelatihan ulang, dan partisipasi publik.

20. Levelized Cost of Hydrogen (LCOH)

Biaya rata-rata terdiskonto untuk memproduksi satu kilogram hidrogen sepanjang umur proyek, yang memasukkan faktor investasi, operasi, biaya listrik, dan faktor kapasitas. Dipakai sebagai indikator keekonomian proyek hidrogen.

21. Net-zero emission

Kondisi di mana jumlah emisi gas rumah kaca yang dilepas ke atmosfer seimbang dengan jumlah yang diserap atau dihilangkan, baik melalui penyerapan alami maupun teknologi penangkapan karbon.

22. Roadmap hidrogen nasional

Dokumen kebijakan yang memetakan peran hidrogen (khususnya hidrogen rendah emisi) dalam bauran energi jangka panjang, termasuk target kapasitas, prioritas sektor, kebutuhan infrastruktur, dan dukungan regulasi.

23. Sektor baja hijau (*green steel*)

Praktik produksi baja yang mengganti reduktan berbasis karbon (kokas/batubara) dengan hidrogen (idealnya green hydrogen), sehingga emisi CO₂ proses berkurang drastis dan produk baja berjejak karbon rendah.

24. Sektor pupuk hijau

Produksi amonia dan pupuk nitrogen yang memanfaatkan hidrogen hijau sebagai bahan baku, sehingga menurunkan intensitas emisi rantai pasok pertanian dan ketahanan pangan.

25. Transisi energi

Perubahan struktural sistem energi dari dominasi fosil menuju sistem berbasis energi terbarukan, efisiensi, dan teknologi rendah karbon (termasuk green hydrogen), yang menyentuh aspek teknis, ekonomi, sosial, dan politik.

REFERENSI

1. International Energy Agency. (2024). *Global Hydrogen Review 2024*. Paris: IEA. ([IEA](#))
2. International Energy Agency. (2024). *Global Hydrogen Review 2024 – Hydrogen production*. Paris: IEA. ([IEA](#))

3. International Renewable Energy Agency. (2022). *World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway*. Abu Dhabi: IRENA. ([IRENA](#))
4. International Renewable Energy Agency. (2022). *Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor*. Abu Dhabi: IRENA. ([IRENA](#))
5. International Renewable Energy Agency. (2022). *Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal*. Abu Dhabi: IRENA. ([IRENA](#))
6. International Renewable Energy Agency & World Trade Organization. (2023). *International Trade and Green Hydrogen & Enabling Global Trade in Renewable Hydrogen and Derivatives*. Geneva & Abu Dhabi. ([World Trade Organization](#))
7. International Renewable Energy Agency. (2020). *Green Hydrogen: A Guide to Policy Making* (dan laporan terkait biaya produksi hidrogen hijau). ([IRENA](#))
8. Bhuiyan, M. M. H., et al. (2025). Hydrogen as an alternative fuel: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy* (online first). ([ScienceDirect](#))
9. Algburi, S., et al. (2025). The green hydrogen role in the global energy transformations. *Jurnal energi berkelanjutan* (artikel ilmiah mengenai kontribusi green hydrogen terhadap transisi energi global). ([ScienceDirect](#))
10. Institute for Essential Services Reform. (2025). *Accelerating Green Hydrogen Deployment through a Comprehensive National Hydrogen Roadmap*. Jakarta: IESR. ([IESR](#))
11. Institute for Essential Services Reform. (2025). *Indonesia Has 333 GW of Financially Viable Renewable Energy Projects*. Jakarta: IESR. ([IESR](#))
12. Institute for Essential Services Reform. (2025). *Building Indonesia's Green Hydrogen Production and Market*. Jakarta: IESR. ([IESR](#))

13. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Direktorat Jenderal EBTKE. (2025). *Pemerintah Dukung Inisiatif Co-firing Amonia di PLTU Labuan*. Jakarta. (ebtke.esdm.go.id)
14. PT Pupuk Kujang. (2025). Rangkaian siaran pers dan berita mengenai produksi hybrid green ammonia dan uji coba co-firing di PLTU Labuan, bekerja sama dengan PLN Indonesia Power. (pupuk-kujang.co.id)
15. International Energy Agency. (2024). *Executive Summary – Global Hydrogen Review 2024*. Paris: IEA (bagian proyeksi permintaan dan peran low-emissions hydrogen). ([IEA](https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024))
16. Reuters. (2025, 12 September). IEA cuts 2030 low-emissions hydrogen production outlook by nearly a quarter. ([Reuters](https://www.reuters.com/business/energy/iea-cuts-2030-low-emissions-hydrogen-production-outlook-nearly-a-quarter-2025-09-12/))
17. Reuters. (2025, 23 Juli). Green hydrogen retreat poses threat to emissions targets. ([Reuters](https://www.reuters.com/business/energy/green-hydrogen-retreat-poses-threat-emissions-targets-2025-07-23/))
18. Reuters. (2025, 23 Juli). Cancelled and postponed green hydrogen projects. ([Reuters](https://www.reuters.com/business/energy/cancelled-postponed-green-hydrogen-projects-2025-07-23/))

Copilot for this article - Chatgpt 5.1 Thinking, Access date: 10 December 2025. Prompting on Writer's account ([Rudy C Tarumingkeng](https://chatgpt.com/c/693959ef-0c6c-8321-9172-cc699cdb634d))
<https://chatgpt.com/c/693959ef-0c6c-8321-9172-cc699cdb634d>