



Kajian potensi pengembangan teknologi hidrogen sebagai sumber EBT melalui skema CDM dalam mendukung pencapaian NDC Indonesia

ASTRID WIANGGA DEWI^{1*}, MUHARAM KEMAL ADAM, AYU PIPIT, LATIFA ANDJANI YUSUF

¹ Program Studi Ilmu Lingkungan, Sekolah Ilmu Lingkungan, Universitas Indonesia, Depok, Jawa Barat, 16424, Indonesia;

*Korespondensi: astridwiangga@gmail.com

Diterima: 27 Juli, 2024

Disetujui: 28 Agustus, 2024

ABSTRAK

Latar Belakang: Dalam merealisasikan penanggulangan perubahan iklim global, Indonesia berkomitmen untuk berpartisipasi dalam merumuskan kebijakan penggunaan energi bersih yang ramah lingkungan. Salah satu rumusan kebijakan yang dihasilkan adalah upaya dalam menurunkan emisi dengan implementasi Energi Baru Terbarukan (EBT). **Temuan:** Salah satu potensi penggunaan EBT yang dapat dikembangkan adalah hidrogen. Teknologi hidrogen merupakan teknologi penghasil bahan bakar yang berpotensi karena dapat menghasilkan sumber energi bersih dan berkelanjutan tanpa emisi. Artikel ini bertujuan untuk meninjau prospek dan tantangan potensi penggunaan teknologi penghasil hidrogen di Indonesia. **Metode:** Untuk mencapai tujuan tersebut, metode systematic literature review digunakan dalam mengkaji sumber data primer dan sekunder dari penelitian terdahulu. Hasil studi pustaka selanjutnya dianalisis secara kualitatif (deskriptif). **Kesimpulan:** Hasil kajian menunjukkan bahwa sebagai bahan bakar potensial, hidrogen adalah unsur bumi yang paling banyak ditemukan dan dapat diproduksi berdasarkan sumber energi yang digunakan. Selain fitur pembakarannya yang bersih, daya tarik hidrogen sebagai EBT ramah lingkungan berasal dari tingkat efektivitas yang lebih besar daripada bahan bakar bensin. Berdasarkan hasil analisis komparatif, peluang produksi hidrogen dengan penggunaan panas bumi di Indonesia di nilai tinggi karena sumber daya panas bumi tersebar luas di beberapa wilayah Indonesia. Hasil kajian juga mengungkapkan bahwa biaya untuk skala kecil pemanfaatan panas bumi senilai 1,08 USD/kgH₂ dengan menggunakan pembangkit listrik. Namun, dari semua sumber daya yang dipertimbangkan dalam artikel ini, Steam Methane Reforming (SMR) dan gasifikasi batubara merupakan teknik yang paling murah terkait dengan faktor teknis operasional dan biaya senilai 1,2 – 2,2 USD/kg.H₂. Dengan adanya mekanisme CDM, Indonesia dapat menggunakan EBT hidrogen untuk mencapai target nasional pengurangan emisi. Artikel ini diakhiri dengan suatu bentuk proposal yang dapat membantu mengimplementasikan CDM di Indonesia menuju pencapaian target penurunan emisi nasional atau Nationally Determined Contribution (NDC).

KATA KUNCI: clean development mechanism (CDM); energi alternatif; energi baru terbarukan (EBT); teknologi hidrogen.

ABSTRACT

Background: In realizing the mitigation of global climate change, Indonesia is committed to participating in formulating policies for the use of environmentally friendly clean energy. One of the policy formulations produced is an effort to reduce emissions by implementing New and Renewable Energy (EBT). **Findings:** One of the potential uses of EBT that can be developed is hydrogen. Hydrogen technology is a potential fuel-producing technology because it can produce clean and sustainable energy sources without emissions. This article aims to review the

Cara Pengutipan:

Dewi et al. (2024). Kajian potensi pengembangan teknologi hidrogen sebagai sumber EBT melalui skema CDM dalam mendukung pencapaian NDC Indonesia. *Spatial Review for Sustainable Development*, 1(2), 106-122.
<https://doi.org/10.61511/srsd.v1i2.2024.1317>

Copyright: © 2024 dari Penulis. Dikirim untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan dari the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



prospects and challenges of the potential use of hydrogen-producing technology in Indonesia. **Methods:** To achieve this goal, the systematic literature review method is used in examining primary and secondary data sources from previous studies. The results of the literature study were then analyzed qualitatively (descriptively). **Conclusion:** The results of the study show that as a potential fuel, hydrogen is the most abundant element in the earth and can be produced based on the energy source used. In addition to its clean combustion features, the appeal of hydrogen as an environmentally friendly EBT comes from its greater level of effectiveness than gasoline. Based on the results of the comparative analysis, the opportunity for hydrogen production using geothermal energy in Indonesia is considered high because geothermal resources are widespread in several regions of Indonesia. The results of the study also revealed that the cost for small-scale geothermal utilization is 1.08 USD/kgH₂ using a power plant. However, of all the resources considered in this article, Steam Methane Reforming (SMR) and coal gasification are the cheapest techniques related to operational technical factors and costs of 1.2 - 2.2 USD / kg.H₂. With the CDM mechanism, Indonesia can use hydrogen EBT to achieve national emission reduction targets. This article ends with a form of proposal that can help implement CDM in Indonesia towards achieving national emission reduction targets or Nationally Determined Contribution (NDC).

KEYWORDS: alternative energy; clean development mechanism (CDM); hydrogen technology; new and renewable energy (EBT).

1. Pendahuluan

Pemanasan global mengakibatkan peningkatan intensitas suhu permukaan, munculnya gelombang panas, dan meningkatnya curah hujan di sebagian besar wilayah di bumi (IPCC, 2020), tidak terkecuali di Indonesia. Meskipun peningkatan suhu akibat pemanasan global di daerah tropis jauh lebih kecil daripada peningkatan suhu di daerah subtropis dan daerah kutub dikarenakan suhu udara di daerah tropis sudah mendekati suhu permukaan maksimum atau suhu kritis yang sulit untuk meningkat lagi (Aldrian et al., 2011), namun dampak peningkatan suhu ini di Indonesia sangat dirasakan.

Indonesia sebagai salah satu negara yang telah menyepakati Perjanjian Paris, harus berkomitmen dalam aksi ketahanan iklim pasca-2020. Berdasarkan Nationally Determined Contribution (NDC) Indonesia yang telah diserahkan kepada Sekretariat Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa tentang Perubahan Iklim (United Nations Framework Convention on Climate Change/UNFCCC), Pemerintah telah memproyeksikan peningkatan emisi gas rumah kaca di tahun 2030 dari beberapa sektor melalui skenario Business as Usual (BAU), di mana sektor kehutanan memiliki proyeksi level emisi gas rumah kaca yang cukup besar di tahun 2030, yaitu sebesar 714 juta tCO₂ (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2022).

Dan di dalam dokumen NDC ini, Pemerintah Indonesia telah menetapkan target pengurangan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) di Indonesia dalam dua skenario, yakni skenario tanpa syarat (dengan usaha sendiri) atau CM1 dengan target penurunan sebesar 31,89% dan skenario bersyarat (dengan dukungan internasional yang memadai) atau CM2 dengan target penurunan sebesar 43,2% pada tahun 2030. Dalam mencapai target ini, Pemerintah menargetkan penurunan emisi gas rumah kaca dari sektor energi sebesar 358 Mton CO₂eq atau sebesar 12,5% dengan skenario CM1 atau sebesar 446 Mton CO₂eq atau sebesar 15,5% dengan skenario CM2 (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2022).

Melalui komitmen ini, Indonesia berusaha untuk mendukung dalam melakukan aksi mitigasi dan adaptasi perubahan iklim dan melakukan investasi rendah karbon untuk masa depan yang lebih berkelanjutan (sustainable) dan tangguh (resilient) dengan tujuan utama adalah menjaga suhu global di bawah 20C, dibatasi 1,50C. Selain itu, dalam mencapai target ini, Indonesia juga menghadapi tantangan berat dalam mengembangkan dan mengimplementasikan proyek-proyek pengadaan energi terutama energi yang bersumber dari sumber terbarukan agar mampu menghasilkan energi yang bersih dan ramah lingkungan (Amin et al., 2022; Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2022).

Hal ini didorong akibat semakin menipisnya sumber daya bahan bakar fosil dan meningkatnya jumlah populasi masyarakat, menyebabkan meningkatnya permintaan akan

energi sehingga diperlukannya sumber daya yang mampu menghasilkan hidrogen bersih dalam skala besar (Amin et al., 2022).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi pengembangan proyek pengadaan energi yang bersumber dari sumber terbarukan melalui beberapa metode yang ada dengan melihat potensi sumber daya alam Indonesia. Di sisi lain, dalam penelitian ini juga akan membahas potensi pengembangan proyek pengadaan energi dari skema pendanaan finansial dan teknologi yang juga menjadi tantangan besar bagi Indonesia melalui mekanisme Clean Development Mechanism (CDM) sehingga diharapkan penelitian ini dapat menjadi referensi dan kajian lebih lanjut bagi penelitian berikutnya.

2. Metode

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan kualitatif. Analisis pada penelitian mengenai potensi pengembangan teknologi hidrogen sebagai sumber Energi Baru Terbarukan (EBT) ini dilakukan dengan metode Systematic Literature Review (SLR), khususnya dengan meta-analisis. SLR awalnya diterapkan di bidang medis, dan kemudian diterapkan di bidang teknik dan ilmu sosial. Ketika prosedur dilakukan dengan benar dan memiliki kesalahan yang sedikit dengan margin error yang minimal, penelitian dapat memberikan temuan dan kesimpulan yang andal sehingga dapat membantu mengambil keputusan yang baik. Semua literatur yang ada dan relevan dengan pertanyaan penelitian atau topik penelitian diidentifikasi secara logis, dievaluasi, dan ditafsirkan.

Metode yang digunakan adalah dengan mengumpulkan literatur mengenai EBT yang berfokus pada pengembangan teknologi hidrogen untuk menjawab pertanyaan penelitian ini. Tujuan penggunaan metode ini adalah untuk menghasilkan penelitian yang sistematis dan meminimalkan terjadinya bias dalam proses pencarian, identifikasi, penilaian, analisis, dan pengambilan kesimpulan. Sumber informasi untuk penelitian ini berupa data primer dan sekunder yang digunakan untuk menganalisis permasalahan pada penelitian ini. Kriteria inklusi terhadap sumber yang digunakan merupakan jurnal bereputasi dengan rentang waktu publikasi selama lima belas tahun terakhir yaitu dari tahun 2007 hingga tahun 2022 dengan mencari literatur dengan judul, abstrak, atau kata kuncinya yang menggambarkan topik dari penelitian ini. Pada metode systematic literature review ini terdapat beberapa tahapan, yaitu sebagai berikut (Mengist et al., 2020):

2.1 Tahap Persiapan

Tahapan persiapan dalam penelitian menggunakan metode SLR adalah untuk mempertimbangkan transparansi, transferability, dan replikasi karya, yang merupakan karakteristik yang membuat metode SLR. Hal ini akan meminimalkan bias dengan melakukan pencarian literatur yang lengkap. Pada tahap ini ditentukan ruang lingkup penelitian, rumusan pertanyaan penelitian, dan batasan penelitian untuk mengidentifikasi metode penelitian yang tepat. Pada penelitian ini pertanyaan penelitian yang ditentukan adalah: [a] Bagaimana potensi pengembangan teknologi hidrogen sebagai sumber EBT melalui skema CDM? [b] Bagaimana kebijakan dan rencana pemerintah Indonesia yang mendukung penggunaan sumber EBT?

2.2 Tahap Studi Pustaka

Pada tahap ini dilakukan strategi dalam studi pustaka atau pencarian literatur. Strategi dalam pencarian literatur untuk menemukan literatur yang sesuai sehingga dapat mengumpulkan informasi yang relevan. Pengumpulan dan inventarisasi data bersumber dari buku, artikel ilmiah, dan regulasi yang terbit lima belas terakhir. Database pencarian untuk penelitian ini adalah Scopus, Science Direct, dan Google Scholar dengan kata kunci:

Energi baru terbarukan (EBT), teknologi hidrogen, energi alternatif, Clean Development Mechanism (CDM).

2.3 Tahap Penilaian

Penilaian merupakan tahapan untuk menilai atau mengevaluasi artikel yang dipilih berdasarkan tujuan dari penelitian ini. Penilaian artikel yang digunakan dilakukan untuk mengidentifikasi artikel yang relevan. Terdapat dua langkah dasar dalam tahap ini yaitu memilih artikel menggunakan kriteria inklusi dan penilaian kualitas.

2.4 Tahap Sintesis

Tahap ini terdiri dari ekstraksi dan klasifikasi data yang relevan dari artikel yang dipilih untuk mendapatkan pengetahuan dan kesimpulan. Pada tahap ini melibatkan identifikasi dan ekstraksi data yang relevan dari artikel yang dipilih.

2.5 Tahap Analisis

Tahap analisis meliputi evaluasi data yang disintesis dan ekstraksi informasi yang penting dan menyimpulkan artikel yang dipilih. Pada tahap ini, pertanyaan penelitian yang dirumuskan akan memiliki jawaban. Dilakukan analisis secara deskriptif untuk menjelaskan hidrogen sebagai sumber EBT, peluang dan tantangan pengembangan hidrogen sebagai sumber EBT di Indonesia, perbandingan biaya produksi hidrogen, dan penerapan skema CDM dalam pengembangan teknologi berbasis hidrogen.

2.6 Tahap Pembuatan Artikel Penelitian

Tahap ini mencakup deskripsi serta penyajian metode yang dipilih dan hasil yang diperoleh dari literatur yang dipilih. Tahap pembuatan artikel penelitian dalam metode SLR merupakan tahapan terakhir yang dapat membantu memberikan hasil penelitian untuk tujuan ilmiah.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hidrogen sebagai Sumber Energi Terbarukan

Emisi CO₂ adalah sumber utama emisi Gas Rumah Kaca (GRK) karena memiliki dampak negatif terhadap kehidupan manusia dan sistem ekologi sehingga diperlukan langkah mitigasi dalam mencegah dan mengurangi emisi gas CO₂ melalui peninjauan potensi sumber energi terbarukan (Amin et al., 2022).

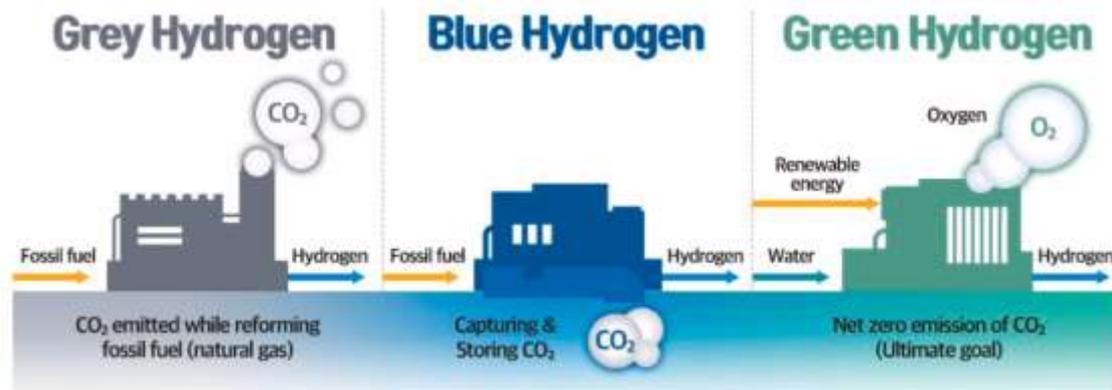
Salah satu studi yang paling banyak diteliti adalah transisi ke ekonomi rendah karbon (Low Carbon Economic) atau dekarbonisasi dengan pasokan energi yang ramah lingkungan. Hidrogen memiliki potensi untuk mengurangi emisi CO₂ secara signifikan ketika diproduksi dari sumber energi yang berkelanjutan, terbarukan dan bersih (Amin et al., 2022).

Hidrogen adalah unsur paling melimpah di bumi dan merupakan sumber energi yang ramah lingkungan atau bebas emisi yang dapat dengan mudah diproduksi melalui beberapa metode. Ketertarikan pada hidrogen sebagai bahan bakar alternatif telah meningkat drastis dalam beberapa waktu ke belakang yang dikarenakan hidrogen sebagai sumber energi memiliki kualitas dalam proses pembakaran yang bersih dan memiliki tingkat efisiensi 2-3 kali lebih tinggi dari bahan bakar fosil (Pareek et al., 2020).

Selain itu, hidrogen juga menjadi sebuah solusi bagi beberapa negara yang mengeksport minyak untuk beralih ke bahan bakar rendah karbon dan mendiversifikasi ekonomi mereka. Pengembangan pembangkit listrik berbasis hidrogen juga meningkat di beberapa

dunia, seperti Jepang, Australia, Chile, Norwegia, dan beberapa negara lainnya (Li et al., 2022).

Hidrogen dapat diproduksi dari beberapa metode berdasarkan sumber energi yang digunakan, seperti gas alam melalui steam reforming, batu bara, biomassa, gasifikasi, nuklir, air, surya, angin, dan panas bumi (Milbrandt & Mann, 2009). Jenis hidrogen sendiri dibagi menjadi tiga jenis berdasarkan sumber energi yang digunakan dalam memproduksinya, yaitu Gray Hydrogen, Blue Hydrogen, dan Green Hydrogen (Li et al., 2022).



Gambar 1. Perbandingan antara berbagai jenis hidrogen (Li et al., 2022)

Gray Hydrogen atau Hidrogen Abu-Abu adalah hidrogen yang diproduksi dari sumber energi berbasis fosil tanpa melakukan penyerapan karbon dioksida. Metode ini merupakan yang paling mudah untuk memproduksi hidrogen, namun tidak berkelanjutan sebagai dampaknya dari proses produksi hidrogen abu-abu menghasilkan emisi GRK sebesar 36,4 gr karbon dioksida per MJ (Li et al., 2022).

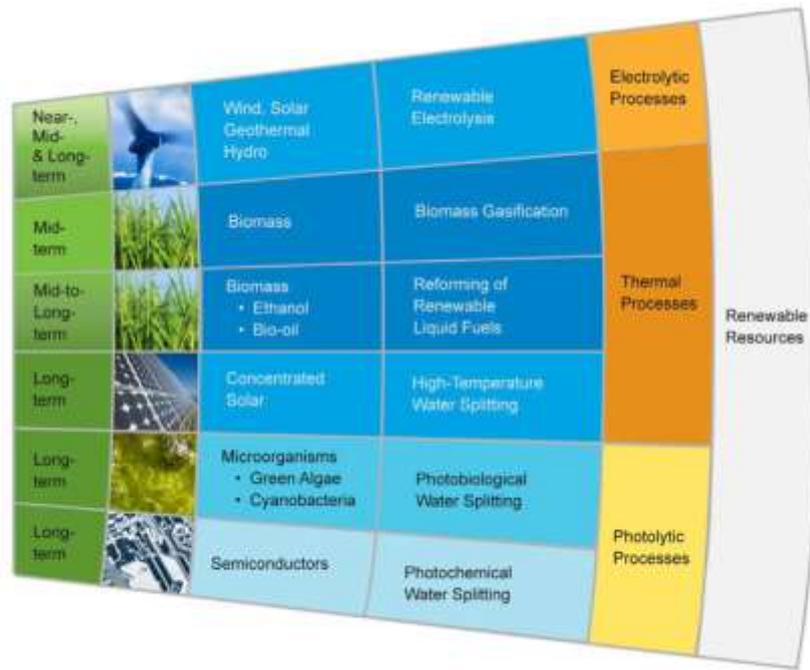
Blue Hydrogen atau Hidrogen Biru diproduksi menggunakan bahan bakar fosil bersama dengan penggunaan, penyimpanan, dan penyerapan karbon. Produksi hidrogen biru umumnya menggunakan gas alam melalui steam reforming dengan melakukan penyerapan atau penyimpanan karbon yang dihasilkan selama proses produksi. Efisiensi penyerapan karbon dioksida diperkirakan mencapai 85–95% yang 5–15% sisanya terlepas akibat terjadinya kebocoran (Li et al., 2022).

Green Hydrogen atau Hidrogen Hijau adalah hidrogen yang diperoleh dari sumber terbarukan, seperti air melalui proses elektrolisis, panas bumi, angin, dll. Hidrogen hijau yang diproduksi dengan menggunakan energi terbarukan diperkirakan akan meningkat dengan cepat (Li et al., 2022).

Banyaknya potensi sumber energi yang dapat digunakan untuk menghasilkan hidrogen ini, maka perlu dipahami di mana sumber daya ini berada dengan melihat potensi kekayaan alam yang ada di Indonesia sehingga rencana pengembangan pemanfaatan dari produksi hidrogen ini dapat dibuat dengan teknologi dan infrastruktur produksi hidrogen yang tepat.

3.2 Peluang dan Tantangan Pengembangan Hidrogen sebagai Sumber Energi Terbarukan di Indonesia

Tantangan utama dalam memanfaatkan hidrogen sebagai bahan bakar adalah emisi gas rumah kaca yang dihasilkan selama proses produksi dan diperlukan peningkatan pemanfaatan metode dan teknologi yang mampu menghasilkan hidrogen bersih tanpa menghasilkan emisi gas rumah kaca selama proses produksinya. Hidrogen bersih dapat diperoleh dalam jumlah besar dari air (H₂O), metana dan bahan organik lainnya. Ada berbagai metode dan teknologi yang digunakan untuk produksi hidrogen bersih, seperti yang ditunjukkan pada (Gambar. 2) (Pareek et al., 2020).



Gambar 2. Perbedaan metode produksi hidrogen dari sumber terbarukan (Pareek et al., 2020)

Saat ini hampir 80-95% metode produksi hidrogen yang umum digunakan di beberapa negara adalah metode steam reforming yang mana metode ini mampu mengekstraksi hidrogen dari sumber energi fosil dan 5-20% hidrogen lainnya dihasilkan dari metode elektrolisis yang mana metode ini mengekstraksi hidrogen dari air yang dipecah menjadi oksigen dan hidrogen menggunakan arus listrik. Beberapa teknik lain juga berkontribusi dalam proses produksi hidrogen, seperti siklus termokimia, angin, gasifikasi biomassa, dan matahari (Milbrandt & Mann, 2009; Pareek et al., 2020).

Beberapa metode yang dapat digunakan dalam memproduksi hidrogen dapat dilihat pada (Tabel 1). Dapat dilihat dari masing-masing metode produksi hidrogen yang dapat digunakan memiliki keunggulan dan kekurangan dari beberapa aspek. Selain itu, dari (Tabel 1) juga dapat menjadi referensi utama untuk melihat potensi metode produksi hidrogen yang dapat diterapkan di Indonesia dengan mempertimbangkan efektivitas proses produksi dan sumber energi yang digunakan.

Hidrogen yang diproduksi dari batu bara melalui proses gasifikasi batubara memiliki peluang untuk diterapkan untuk jangka pendek hingga menengah yang menjanjikan karena sumber daya batu bara yang murah dan tersedia secara luas serta teknologi gasifikasi yang ada. Hidrogen dan listrik dapat diproduksi bersamaan dari batu bara melalui gasifikasi. Akan tetapi, proses ini akan menghasilkan emisi CO₂ yang cukup besar jika proses penyerapan tidak dilakukan secara maksimal (Milbrandt & Mann, 2009).

Tabel 1. Metode produksi hidrogen

Metode Produksi	Steam Methane Reforming	Gasifikasi Batubara	Elektrolisis	Gasifikasi Biomassa	Pemanfaatan Geotermal	Termokimia	Biohidrogen
Proses Produksi	Proses produksi hidrogen melalui proses	Gasifikasi batubara adalah salah satu	Dalam proses elektrolisis, air menjadi hidrogen	Biomassa merupakan salah satu energi potensial	Sistem produksi hidrogen berbasis panas bumi	Proses pemecahan air melalui rangkaian	Proses produksi biohidrogen dilakukan dengan

pemanasan gas alam yang mana gas alam mengandung metana yang dapat digabungkan dengan uap menguapkan proses termal seperti reformasi metana uap oksidasi parsial dengan katalisator untuk menghasilkan CO₂ sebagai pengotor dan akan dihilangkan melalui proses pemanasan yang digunakan untuk menghasilkan hidrogen. Umumnya, dua elektroda (katoda dan anoda) digunakan dalam larutan air yang mengandung elektrolit (H₂), oksigen (O₂) dan uap di bawah tekanan tinggi untuk menentukan campuran karbon monoksida dan hidrogen (Gas sintesis). Karbon monoksida selanjutnya bereaksi dengan uap melalui reaksi pergeseran air-gas untuk membentuk hidrogen dan CO₂. Setelah proses ini

dan oksigen untuk pembangkitan hidrogen yang beresumen dari jagung, jerami gandum, sisa hutan, rumput, dan kotoran manusia dan hewan. Hidrogen diperoleh melalui proses termokimia yang akan mengkonversi biomassa menjadi hidrogen.

menguapkan elektrolisis suhu tinggi (HTE) yang dibantu dengan elektroli ser Proton Exchange Membrane (PEM) untuk dapat menguraikan air menjadi oksigen dan hidrogen.

termokimia, menggunakan suhu tinggi (500 s.d. 20000C) untuk memisahkan air menjadi hidrogen dan oksigen. Sumber panas bisa berupa reaktor nuklir atau konsentrator surya

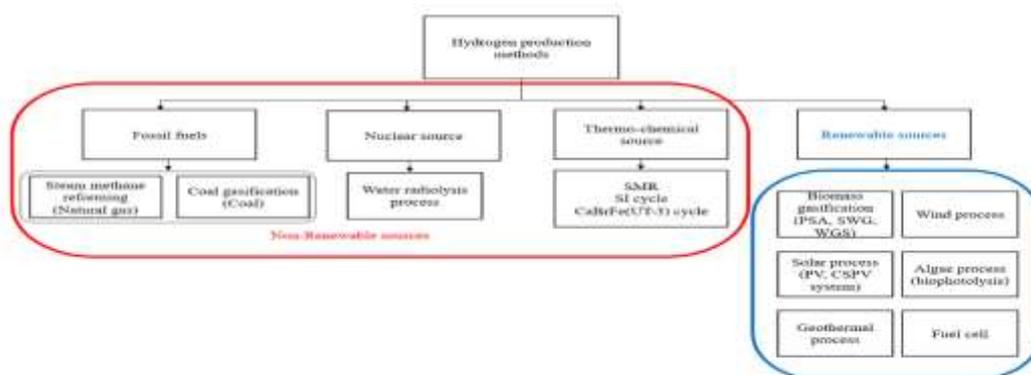
bantuan mikroorganisme sebagai katalisator dalam memecah senyawa air (H₂) pada suhu sekitar 29-330C.

	pressure swing adsorption untuk mendapatkan hidrogen bersih.	hidrogen bersih dipisahkan dari sistem dan CO2 diserap dan dihilangkan.					
	a)						
	Metode ini sangat disukai karena menjanjikan produksi hidrogen yang besar dengan biaya produksi yang rendah.						
Keunggulan	b)	Proses produksi yang efisien dalam menghasilkan hidrogen.	a) Metode produksi hidrogen dari sumber energi terbarukan yang paling memungkinkan diimplementasikan.	a) Impakan Biomassa sebagai sumber energi.	Kelimpahan Biomassa sebagai sumber energi.	Energi panas bumi merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang andal dan stabil karena hampir tidak bergantung pada kondisi sekitar dan selama proses produksi tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca.	Metode ini sangat cocok untuk produksi hidrogen dalam jumlah besar dan mampu menghasilkan hidrogen yang bersih karena tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca dan relatif biaya produksi yang rendah.
	Emisi gas rumah kaca yang dihasilkan jauh lebih rendah dibandingkan metode menggunakan sumber energi berbasis fosil lainnya.		b) Tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca.	b) Emisi gas rumah kaca yang dihasilkan relatif rendah.	Emisi gas rumah kaca yang dihasilkan relatif rendah.		
Kelemahan	Sangat bergantung pada ketersediaan	Memiliki tingkat pencemaran lingkungan	Memerlukan biaya investasi yang relatif tinggi dalam	Proses produksi yang kompleks dan	Akses ke struktur tanah yang	Teknologi ini memiliki tantangan untuk	Proses produksi yang masih kompleks

iaan gas alam. an yang tinggi akibat emisi gas rumah kaca yang dihasilkan selama proses produksi. menyediakan perangkat pendukung untuk proses produksi gas rumah kaca yang dihasilkan. memerlukan proses tambahan dalam meminimalisir emisi gas rumah kaca yang dihasilkan. cukup sulit sehingga memerlukan biaya yang mahal, keterbatasan perangkat teknologi pemanaan panas bumi juga memerlukan media pemanasan yang cukup mahal. mengurangi biaya konsentrasi surya dan media perpendahan panas pengembangan teknologi reaktor nuklir untuk menyediakan panas yang dibutuhkan pada suhu rendah. proses reforming membutuhkan suhu tinggi dan memakan waktu yang relatif lama dalam memproduksi hidrogen.

(Amin et al., 2022; Pareek et al., 2020).

Hampir semua hidrogen dihasilkan dari gas alam yang mana merupakan bahan bakar fosil gas yang sebagian besar terdiri dari metana (CH₄). Hidrogen diproduksi dari gas alam melalui Steam Methane Reforming (SMR) yang merupakan proses yang banyak digunakan di industri saat ini. Namun, beberapa tantangan yang ada dengan menggunakan metode ini adalah terkait penyerapan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan selama proses produksi, ketersediaan teknologi penyimpanan hidrogen yang layak, peningkatan efisiensi reforming, katalis reforming yang lebih tahan lama, dan biaya investasi dalam menyediakan teknologi penyerapan karbon (Milbrandt & Mann, 2009).



Gambar 3. Metode produksi hidrogen berdasarkan sumber energi yang digunakan (Amin et al., 2022)

Selain itu, saat ini mulai dikembangkan produksi hidrogen yang dihasilkan dari sumber terbarukan, beberapa proses produksi hidrogen yang menggunakan sumber terbarukan yang dapat dilihat pada (Gambar 3) adalah gasifikasi biomassa, pemanfaatan panas bumi, elektrolisis, dll.

Proses produksi hidrogen melalui sumber terbarukan sebagai solusi dalam menjawab tantangan yang ada dalam menghasilkan hidrogen yang bersih tanpa emisi gas rumah kaca yang dihasilkan selama proses produksi dan hal ini juga sekaligus mendukung penurunan emisi gas rumah kaca suatu negara termasuk Indonesia. Oleh karena itu, metode produksi hidrogen yang perlu diadaptasi oleh Indonesia dalam menghasilkan hidrogen sebagai sumber energi terbarukan dan juga sekaligus sebagai langkah mitigasi perubahan iklim adalah metode produksi hidrogen dari sumber terbarukan, namun dengan mempertimbangkan beberapa hal, seperti biaya investasi, teknologi dan sumber daya alam yang Indonesia miliki yang mendukung dalam menghasilkan hidrogen. Beberapa metode produksi hidrogen yang berpotensi untuk dikembangkan di Indonesia, di antaranya elektrolisis dan pemanfaatan panas bumi.

Produksi hidrogen melalui metode elektrolisis dilakukan dengan cara menguraikan air menjadi hidrogen dan oksigen dengan mengaliri arus listrik. Umumnya, dua elektroda yang dijadikan sebagai katoda dan anoda digunakan dalam larutan air yang mengandung elektrolit KOH yang dikenal sebagai elektroliser. Keunggulan metode ini terdapat pada proses produksi yang tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca. Selain itu, jika melihat kekayaan sumber daya air di Indonesia yang melimpah, penggunaan metode ini sangat mungkin dilakukan. Namun, tantangan yang perlu dihadapi oleh Indonesia adalah terkait biaya investasi pengadaan perangkat teknologi yang relatif tinggi (Amin et al., 2022; Pareek et al., 2020).

Metode produksi hidrogen berbasis panas bumi dapat juga diterapkan di Indonesia yang mana metode ini memanfaatkan sel elektrolisis pada suhu tinggi dengan dibantu dengan elektroliser berupa Proton Exchange Membrane (PEM) untuk dapat menguraikan air menjadi oksigen dan hidrogen. Akan tetapi, terdapat tantangan dalam penggunaan metode ini, di antaranya akses ke struktur bawah tanah yang cukup sulit sehingga memerlukan biaya pengeboran yang mahal, keterbatasan perangkat teknologi, dan proses pemanenan panas bumi juga memerlukan media penghantar panas yang cukup mahal. Selain itu, suhu air merupakan parameter penting dalam proses elektrolisis karena akan menentukan produksi, daya yang dibutuhkan, dan biaya sistem produksi hidrogen. Suhu tinggi dari proses elektrolisis mampu menurunkan konsumsi listrik dan karenanya biaya sistem produksi hidrogen akan berkurang. Di sisi lain, keunggulan dari metode ini adalah pemanfaatan panas bumi yang merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang andal dan stabil karena hampir tidak bergantung pada kondisi sekitar dan selama proses produksi tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca (Amin et al., 2022; Pareek et al., 2020).

Pemanfaatan panas bumi sebagai sumber terbarukan dalam produksi hidrogen memiliki peluang besar untuk diterapkan di Indonesia. Hal ini dikarenakan berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) pada tahun 2018, potensi panas bumi di Indonesia termasuk yang terbesar di dunia dengan potensi sumber daya panas bumi sebesar 11.073 MW dengan total cadangan sumber daya panas bumi sebesar 17.506 MW. Indonesia memiliki potensi sumber daya panas bumi yang melimpah dengan 331 titik potensi panas bumi yang tersebar dari Sabang sampai Marauke (ESDM, 2018).

3.3 Perbandingan Biaya Produksi Hidrogen

Salah satu metode yang paling umum digunakan untuk memproduksi hidrogen dari gas alam adalah Steam Methane Reforming (SMR), ini juga merupakan satu-satunya teknologi yang dapat digunakan untuk memproduksi hidrogen dalam skala besar dan ekonomis. Steam Methane Reforming (SMR) juga dapat digabungkan dengan teknologi Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) untuk menghasilkan hidrogen tanpa emisi CO₂ yang mana teknologi CCUS digunakan untuk menyerap emisi gas CO₂ yang dihasilkan selama proses

produksi. Biaya yang diperlukan dalam proses produksi hidrogen melalui metode ini bergantung pada beberapa hal termasuk biaya produksi gas alam, yaitu sekitar 0,9 - 3.2 USD/kg.H₂. Dari total biaya produksi hidrogen, konsumsi bahan bakar menyumbang 45-75% dari total biaya produksi, namun hal ini tidak menjadi masalah yang besar bagi negara-negara yang kaya akan gas alam (Amin et al., 2022).

Tabel 2. Perbandingan biaya produksi hidrogen dari sumber tidak terbarukan berdasarkan metode produksi

No	Metode	Biaya (\$/Kg.H ₂)
1.	Steam Methane Reforming	0,9 - 3,2
2.	Gasifikasi Batubara	1,2 - 2,2
3.	Energi Nuklir	3,18 - 3,63

(Amin et al., 2022)

Seperti metode Steam Methane Reforming (SMR), metode gasifikasi batubara juga merupakan salah satu teknologi yang paling umum digunakan untuk menghasilkan hidrogen, banyak industri yang menggunakan metode ini untuk menghasilkan hidrogen yang akan digunakan untuk memproduksi amonia dan penggunaan pupuk lainnya. Jika harga dan ketersediaan batubara konsisten, maka metode gasifikasi batubara ini dapat dianggap sebagai salah satu metode termurah dalam memproduksi hidrogen, yaitu 1,2 - 2,2 USD/kg.H₂. Akan tetapi, hal yang menjadi kekhawatiran adalah emisi gas CO₂ yang dihasilkan sebagai produk sampingan dalam memproduksi hidrogen (Amin et al., 2022).

Oleh karena itu, opsi penggunaan teknologi lain, seperti gasifikasi batubara dengan Capture Utilization and Storage (CCUS) dapat digunakan untuk menyerap emisi gas CO₂ yang dihasilkan selama proses produksi. Akan tetapi, penggunaan teknologi CCUS ini mengakibatkan biaya investasi dan operasional yang diperlukan semakin besar sehingga menyebabkan biaya produksi hidrogen secara keseluruhan menjadi mahal (Amin et al., 2022).

Salah satu sumber lain yang menarik untuk memproduksi hidrogen dengan biaya produksi yang relatif rendah adalah Energi Nuklir, yang menghasilkan hidrogen melalui proses elektrolisis dan siklus termokimia. Fasilitas nuklir yang ada dapat menghasilkan uap suhu tinggi yang dapat dielektrolisis dan terurai menjadi hidrogen dan oksigen. Temuan mengungkapkan biaya produksi hidrogen dalam bentuk gas berkisar 3,18 - 3,34 USD/kg.H₂, sedangkan total biaya produksi hidrogen dalam bentuk cair berkisar 3,44 - 3,63 USD/kg.H₂. Selain itu, dapat dilihat pada (Tabel 2) adalah analisis perkiraan biaya diperlukan untuk memproduksi hidrogen dari berbagai sumber energi tidak terbarukan (Amin et al., 2022).

Tabel 3. Perbandingan biaya produksi hidrogen dari sumber terbarukan berdasarkan metode produksi

No	Metode	Biaya (\$/Kg.H ₂)
1.	Sistem Solar PV	8,96 - 12,6
2.	Hydropower	1,4 - 3,88
3.	Energi Panas Bumi	2,05
4.	Elektrolisis Panas Bumi	1,9
5.	Pembangkit Listrik Bertenaga Panas Bumi	1,08
6.	Biohidrogen	2,8

(Amin et al., 2022)

Selain dari sumber tidak terbarukan dan sebagai bentuk jawaban atas tantangan global dalam menciptakan energi yang bersih dan ramah lingkungan, terdapat beberapa metode produksi hidrogen dari sumber alternatif yang berpotensi menggantikan bahan bakar fosil sebagai sumber utama. Sumber-sumber ini meliputi matahari, angin, panas bumi, sel bahan

bakar, biohidrogen, dll. Pada (Tabel 3) dapat dilihat berbagai analisis perkiraan biaya untuk memproduksi hidrogen dari berbagai sumber energi terbarukan (Amin et al., 2022).

Biaya produksi hidrogen dari energi matahari memiliki kisaran yang luas tergantung pada pemilihan metode konversi energi. Produksi hidrogen dari sumber energi matahari memiliki kisaran biaya produksi sebesar 8,9 – 12,6 USD/kg.H₂ yang mana hidrogen dapat diproduksi dari pembangkit listrik tenaga surya yang memiliki sistem Solar Photovoltaic (PV). Penggunaan sistem PV relatif lebih efisien dari segi proses produksinya meskipun memiliki biaya yang relatif mahal. Selain itu, adapula sistem Solar Parabolic Troughs (SPT) yang dapat digunakan untuk memproduksi hidrogen meskipun tingkat efisiensi lebih rendah daripada sistem PV, namun mampu menghasilkan hidrogen dengan biaya lebih rendah, yaitu berkisar 6,4 – 9,86 USD/kg.H₂, namun metode ini memiliki keterbatasan dalam aplikasinya karena memerlukan suhu yang lebih tinggi dan kapasitas produksi yang lebih rendah (Amin et al., 2022).

Selanjutnya, biaya produksi hidrogen dari turbin angin bergantung pada jumlah hidrogen yang dihasilkan dari turbin angin, serta jenis turbin angin yang digunakan untuk produksi hidrogen. Umumnya turbin angin yang lebih besar cenderung menghasilkan hidrogen dengan biaya lebih rendah dibandingkan dengan turbin angin yang lebih kecil. Pada umumnya, biaya produksi hidrogen dari turbin angin berukuran besar berkisar 1,4 – 3,88 USD/kg.H₂. Perbedaan biaya produksi hidrogen menggunakan turbin angin ini diakibatkan kecepatan angin yang diterima oleh turbin serta biaya investasi yang dikeluarkan dalam menyediakan turbin itu sendiri (Amin et al., 2022).

Salah satu sumber terbarukan lainnya yang memiliki nilai ekonomis dalam proses produksi hidrogen adalah pemanfaatan panas bumi, umumnya biaya produksi hidrogen dari panas bumi berkisar 1,08 – 2,05 USD/kg.H₂ yang mana hal ini tergantung dari metode pemanfaatan panas bumi yang digunakan. Jika memanfaatkan energi bumi secara langsung untuk menghasilkan hidrogen, biaya yang diperlukan kurang lebih sebesar 2,05 USD/kg.H₂. Sedangkan, dengan menggunakan proses elektrolisis panas bumi mampu menghasilkan hidrogen dengan biaya berkisar 1,9 USD/kg.H₂. Selain itu, hidrogen juga dapat diproduksi melalui pembangkit listrik panas bumi yang relatif lebih efisien dan lebih murah dalam proses produksinya, yaitu sebesar 1,08 USD/kg.H₂, namun metode ini dapat digunakan untuk produksi hidrogen dalam skala kecil (Amin et al., 2022).

Selain pemanfaatan turbin angin dan panas bumi, hidrogen juga dapat diperoleh dari proses yang melibatkan mikroorganisme, yaitu metode bio-hidrogen yang merupakan sumber alternatif lain yang dapat digunakan untuk memproduksi hidrogen. Prosesnya melibatkan konversi biomassa alga, namun metode ini masih dalam tahap pengembangan dan cenderung memerlukan biaya cukup bersaing jika dibandingkan biaya produksi hidrogen dari sumber panas bumi dan turbin angin, yaitu diperkirakan kurang lebih 2,8 USD/kg.H₂ dan angka ini dipengaruhi oleh kapasitas fotosintesis alga dan jumlah alga yang digunakan (Amin et al., 2022).

Berbagai sumber daya tersedia untuk memproduksi hidrogen, di antara semua sumber daya sudah diinformasikan sebelumnya. Saat ini, Steam Methane Reforming (SMR) merupakan proses yang paling murah dengan aspek teknis dan ekonomis yang telah terbukti, diikuti oleh gasifikasi batubara. Namun, mengingat meningkatnya emisi gas rumah kaca di lingkungan akibat pembakaran bahan bakar fosil sebagai ancaman utama terhadap perubahan iklim sehingga muncul kebutuhan akan teknologi alternatif lain yang dapat dikembangkan untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

Dengan menipisnya sumber daya bahan bakar fosil dan meningkatnya jumlah populasi masyarakat, mendorong meningkatnya permintaan akan energi sehingga diperlukannya sumber daya yang mampu menghasilkan hidrogen bersih dalam skala besar (Amin et al., 2022). Jika melihat dari segi keunggulan dan biaya produksi yang diperlukan dalam menghasilkan hidrogen tanpa menghasilkan emisi gas rumah kaca, maka metode produksi hidrogen berbasis panas bumi dan elektrolisis dapat menjadi pilihan.

Hal ini telah dibahas pada bagian sebelumnya yang mana produksi hidrogen berbasis panas bumi dan elektrolisis memiliki potensi yang besar untuk diimplementasikan di

Indonesia, di mana Indonesia kaya akan sumber daya air dan panas bumi yang merupakan bahan utama yang diperlukan untuk memproduksi hidrogen. Selain itu, dari segi biaya produksi seperti yang ditunjukkan pada (Tabel 3), metode produksi hidrogen berbasis panas bumi dan elektrolisis memiliki biaya yang relatif lebih murah dibandingkan metode produksi hidrogen dari sumber terbarukan lainnya.

Oleh karena itu, potensi penerapan, pemahaman terkait pemanfaatan hidrogen harus disampaikan kepada masyarakat yang bertujuan untuk menjelaskan potensi hidrogen sebagai bahan bakar generasi mendatang sehingga lebih banyak orang mampu menghasilkan hidrogen dari berbagai sumber (Amin et al., 2022).

3.4 Penerapan Skema CDM dalam Pengembangan Teknologi Berbasis Hidrogen

Cukup banyak studi penelitian yang menunjukkan bahwa potensi peningkatan efisiensi energi baik di negara maju maupun di negara berkembang cukup besar. Meskipun negara-negara maju membuat langkah perbaikan yang signifikan dalam efisiensi energi mereka sebagai bentuk jawaban atas tantangan terhadap kenaikan harga energi dan ketidakpastian pasokan energi global pada era tahun 1970an, hal ini sulit dilakukan bagi beberapa negara berkembang, mengingat permintaan energi di negara-negara berkembang akan meningkat signifikan akibat pertumbuhan penduduk yang besar, namun terkendala keterbatasan dana dalam pengembangan proyek yang memerlukan biaya yang relatif besar dalam pengadaan fasilitas dan teknologi yang diperlukan yang bertujuan memproduksi energi terutama energi bersih dan ramah lingkungan (UNEP, 1997).

Di antara berbagai hambatan yang dihadapi dalam pengembangan proyek pengadaan energi, mekanisme pendanaan proyek yang kurang tepat merupakan hambatan yang sangat penting. Keberhasilan pengembangan proyek pengadaan energi dalam skala besar hanya mungkin terjadi jika mekanisme pendanaan berkelanjutan dirancang secara jelas dan terstruktur, serta adanya akses akan teknologi yang mendukung dalam memproduksi energi dan hal ini yang menjadi hambatan besar bagi negara-negara berkembang dalam pengembangan proyek pengadaan energi di negaranya. Selain itu, banyak bank di negara-negara berkembang yang belum terbiasa dan memiliki skema investasi atau pendanaan proyek pengadaan energi terutama untuk proyek pengadaan energi bersih dan ramah lingkungan (UNEP, 1997).

Oleh karena itu, solusi dalam penanganan hal ini muncul dengan hadirnya mekanisme Clean Development Mechanism (CDM), sebuah mekanisme kerja sama yang dibentuk berdasarkan Kyoto Protocol yang bertujuan untuk membantu negara berkembang dalam mencapai pembangunan berkelanjutan dengan mempromosikan investasi ramah lingkungan dari pemerintah dan industri. Clean Development Mechanism (CDM) yang terkandung dalam Pasal 12 Kyoto Protocol, memungkinkan pemerintah atau entitas swasta dari berbagai negara untuk mengembangkan proyek pengurangan emisi di negara berkembang dan menerima kredit dalam bentuk "sertifikat pengurangan emisi," atau Certificate of Emission Reduction (CER) yang dapat mereka perdagangkan atau sebagai bentuk langkah mitigasi terhadap perubahan iklim yang sekaligus juga dapat dijadikan bukti kontribusi pemerintah atau entitas swasta yang mengembangkan proyek dalam pemenuhan target Nationally Determined Contribution (NDC) mereka dalam mencapai target penurunan emisi gas rumah kaca yang telah mereka tetapkan. CDM berusaha untuk mempromosikan pembangunan berkelanjutan di negara-negara berkembang sembari memungkinkan negara-negara maju untuk berkontribusi pada tujuan mengurangi konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer (UNEP, 1997).

Berdasarkan Kyoto Protocol, telah ditetapkan tiga mekanisme kerja sama yang dirancang untuk membantu negara-negara maju untuk memenuhi target emisi nasional mereka dengan membantu pendanaan proyek pengurangan emisi gas rumah kaca di negara lain (UNEP, 1997), di antaranya: [a] International Emission Trading atau Perdagangan Emisi Internasional mengizinkan negara untuk mentransfer bagian dari 'emisi yang diizinkan' atau 'ambang batas atas emisi yang diperbolehkan' melalui skema Cap and

Trade. [b] Joint Implementation (JI) atau Implementasi secara Bersama memungkinkan negara untuk mengklaim kredit untuk pengurangan emisi yang dihasilkan dari investasi yang telah diberikan dalam proyek pengurangan emisi gas rumah kaca di negara lain, yang menghasilkan transfer setara "unit pengurangan emisi" antar negara. [c] Clean Development Mechanism (CDM) memungkinkan proyek pengurangan emisi yang mendukung pembangunan berkelanjutan di negara berkembang untuk menghasilkan "sertifikat pengurangan emisi," atau Certificate of Emission Reduction (CER) untuk digunakan oleh negara atau entitas swasta yang memberikan bantuan dana atau investasi.

CDM memberikan kesempatan kepada negara dan sektor swasta untuk mengurangi emisi di mana pun di dunia dan mereka kemudian dapat menghitung pengurangan ini sebagai bentuk kontribusi mereka dalam mencapai target penurunan emisi nasional mereka (Painuly et al., 2003; UNEP, 1997).

Saat ini, sebagai bentuk akibat dari kenaikan harga energi dan kelangkaan pasokan energi di masa lalu dan juga sebagai bentuk tanggapan atas kesepakatan Kyoto Protocol, banyak pemerintah di negara-negara berkembang telah meluncurkan inisiatif mereka dalam mempromosikan proyek-proyek pengadaan energi terutama energi bersih dan ramah lingkungan. Hal ini menjadi upaya mereka dalam menarik dukungan melalui kebijakan fiskal, hibah, kerjasama internasional, pembentukan dana khusus dan sebagainya dalam pengembangan proyek pengadaan energi. Hal ini dilakukan tidak hanya oleh pemerintah, tetapi juga oleh sektor swasta yang memiliki inisiatif dalam mendukung pencapaian target penurunan emisi nasional negara mereka (Painuly et al., 2003; UNEP, 1997).

Selain melalui mekanisme pendanaan atau investasi, bantuan pembiayaan juga dapat diberikan dalam bentuk transfer teknologi atau peralatan pendukung yang berguna bagi proyek pengadaan energi terutama untuk proyek pengadaan energi dari sumber terbarukan yang masih sulit diperoleh meskipun memiliki sumber daya alam yang mendukung, namun terbatas akan teknologi, salah satunya adalah proyek pengadaan energi hidrogen (Painuly et al., 2003; UNEP, 1997).

Oleh karena itu, hadirnya Clean Development Mechanism (CDM) telah membuka peluang bagi Indonesia dalam mengembangkan proyek pengadaan energi hidrogen melalui skema investasi atau transfer teknologi yang sangat diperlukan dalam menjamin pasokan energi bersih bagi masyarakat dan di sisi lain melalui produksi hidrogen bersih yang bersumber dari sumber terbarukan juga akan mendukung penurunan emisi gas rumah kaca yang sekaligus mendukung pencapaian target penurunan emisi nasional atau Nationally Determined Contribution (NDC).

4. Kesimpulan

Pengembangan proyek pengadaan energi bersih dan ramah lingkungan sangat diperlukan dalam menjamin kebutuhan energi nasional yang sekaligus mendukung penurunan emisi gas CO₂ yang memiliki dampak negatif terhadap kehidupan manusia dan sistem ekologi. Hidrogen adalah unsur paling melimpah di bumi dan merupakan sumber energi yang ramah lingkungan atau bebas emisi yang dapat dengan mudah diproduksi melalui beberapa metode. Ketertarikan pada hidrogen sebagai bahan bakar alternatif telah meningkat drastis dalam beberapa waktu ke belakang yang dikarenakan hidrogen sebagai sumber energi memiliki kualitas dalam proses pembakaran yang bersih dan memiliki tingkat efisiensi 2-3 kali lebih tinggi dari bahan bakar fosil.

Indonesia memiliki potensi yang besar dalam memproduksi hidrogen sebagai sumber energi terbarukan. Hal ini terlihat dari beberapa metode produksi hidrogen yang dapat diterapkan, yaitu metode elektrolisis dan metode pemanfaatan panas bumi. Produksi hidrogen melalui metode elektrolisis dilakukan dengan cara menguraikan air menjadi hidrogen dan oksigen dengan mengalirinya arus listrik. Keunggulan metode ini terdapat proses produksi tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca dan Indonesia memiliki kekayaan

sumber daya air yang melimpah. Di sisi lain, biaya produksi yang diperlukan dengan menggunakan metode ini relatif murah.

Selain itu, Indonesia sebagai salah satu negara dengan potensi panas bumi terbesar di dunia sangat memungkinkan untuk menghasilkan produksi hidrogen dengan menggunakan metode pemanfaatan panas bumi, yang mana metode ini memanfaatkan sel elektrolisis pada suhu tinggi dengan dibantu dengan elektroliser berupa Proton Exchange Membrane (PEM) untuk dapat menguraikan air menjadi oksigen dan hidrogen. Metode ini memiliki tantangan terkait biaya pengadaan teknologi dan sistem produksinya.

Namun, hadirnya Clean Development Mechanism (CDM) membuka peluang bagi Indonesia dalam mengembangkan proyek pengadaan energi hidrogen ini, yang mana selain menjamin rantai pasokan energi bersih yang diperlukan, di sisi lain juga akan mendukung pencapaian target penurunan emisi nasional atau Nationally Determined Contribution (NDC) melalui hidrogen bersih yang dihasilkan dari sumber terbarukan dan tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca selama proses produksinya.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim IASSSF karena telah mendukung penulisan penelitian ini.

Kontribusi Penulis

Semua penulis berkontribusi penuh atas penulisan artikel ini.

Pendanaan

Penelitian ini tidak mendapat sumber dana dari manapun.

Pernyataan Dewan Peninjau Etis

Tidak berlaku.

Pernyataan Persetujuan yang Diinformasikan

Tidak berlaku.

Pernyataan Ketersediaan Data

Tidak berlaku.

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

Akses Terbuka

©2024. Artikel ini dilisensikan di bawah Lisensi International Creative Commons Attribution 4.0, yang mengizinkan penggunaan, berbagi, adaptasi, distribusi, dan reproduksi dalam media dalam format apapun. Selama Anda memberikan kredit yang sesuai kepada penulis asli dan sumbernya, berikan tautan ke Lisensi Creative Commons, dan tunjukkan jika ada perubahan. Gambar atau materi pihak ketiga lainnya dalam artikel ini termasuk dalam Lisensi Creative Commons artikel tersebut, kecuali dinyatakan dalam batas kredit materi tersebut. Jika materi tidak termasuk dalam Lisensi Creative Commons artikel dan tujuan

penggunaan Anda tidak diizinkan oleh peraturan perundang-undangan atau melebihi penggunaan yang diizinkan, Anda harus mendapatkan izin untuk langsung dari pemegang hak cipta. Untuk melihat lisensi ini kunjungi: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Referensi

- Aldrian, E., Pengkajian, B., & Teknologi, P. (2011). Adaptasi dan Mitigasi Perubahan Iklim di Indonesia Cloud Seeding Materials Processing View project kampret belang View project. <http://www.bmkg.go.id>
- Amin, M., Shah, H. H., Fareed, A. G., Khan, W. U., Chung, E., Zia, A., Rahman Farooqi, Z. U., & Lee, C. (2022). Hydrogen production through renewable and non-renewable energy processes and their impact on climate change. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 47, Issue 77, pp. 33112–33134). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.172>
- ESDM. (2018, April 28). Kini Indonesia Menjadi Produsen Listrik Panas Bumi Terbesar Kedua Dunia. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/kini-indonesia-menjadi-produsen-listrik-panas-bumi-terbesar-kedua-dunia>
- IPCC. (2020). An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems Climate Change and Land Summary for Policymakers WG I WG II WG III. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2022). Enhanced Nationally Determined Contribution Republic of Indonesia 2022. <https://ppid.menlhk.go.id/berita/siaran-pers/6836/enhanced-ndc-komitmen-indonesia-untuk-makin-berkontribusi-dalam-menjaga-suhu-global>
- Li, X., Raorane, C. J., Xia, C., Wu, Y., Tran, T. K. N., & Khademi, T. (2022). Latest approaches on green hydrogen as a potential source of renewable energy towards sustainable energy: Spotlighting of recent innovations, challenges, and future insights. *Fuel*, 334, 126684. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126684>
- Mengist, W., Soromessa, T., & Legese, G. (2020). Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. *MethodsX*, 7(100777), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134581>
- Milbrandt, A., & Mann, M. (2009). Hydrogen Resource Assessment: Hydrogen Potential from Coal, Natural Gas, Nuclear, and Hydro Power. <http://www.osti.gov/bridge>
- Painuly, J. P., Park, H., Lee, M. K., & Noh, J. (2003). Promoting energy efficiency financing and ESCOs in developing countries: Mechanisms and barriers. *Journal of Cleaner Production*, 11(6), 659–665. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(02\)00111-7](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00111-7)
- Pareek, A., Dom, R., Gupta, J., Chandran, J., Adepur, V., & Borse, P. H. (2020). Insights into renewable hydrogen energy: Recent advances and prospects. *Materials Science for Energy Technologies*, 3, 319–327. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.12.002>
- UNEP. (1997). Clean Development Mechanism. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/mechanisms-under-the-kyoto-protocol/the-clean-development-mechanism>

Biografi Penulis

ASTRID WIANGGA DEWI, Program Studi Ilmu Lingkungan, Sekolah Ilmu Lingkungan, Universitas Indonesia.

- Email: astridwiangga@gmail.com
- ORCID:
- Web of Science ResearcherID:
- Scopus Author ID:
- Homepage:

MUHARAM KEMAL ADAM, Program Studi Ilmu Lingkungan, Sekolah Ilmu Lingkungan, Universitas Indonesia.

- Email:
- ORCID:
- Web of Science ResearcherID:
- Scopus Author ID:
- Homepage:

AYU PIPIT, Program Studi Ilmu Lingkungan, Sekolah Ilmu Lingkungan, Universitas Indonesia.

- Email:
- ORCID:
- Web of Science ResearcherID:
- Scopus Author ID:
- Homepage:

LATIFA ANDJANI YUSUF, Program Studi Ilmu Lingkungan, Sekolah Ilmu Lingkungan, Universitas Indonesia.

- Email:
- ORCID:
- Web of Science ResearcherID:
- Scopus Author ID:
- Homepage: