



Carbon Capture Storage dan Carbon Capture Utilization Storage (CCS/CCUS) sebagai Solusi Transisi Energi Fosil di Indonesia



Arananda Dwi Putri, Nugroho Adi Sasongko, Donny Yoesgiantoro

Program Studi Magister Manajemen Pertahanan Jurusan Ketahanan Energi, Universitas Pertahanan

*email korespondensi : aranandadwi@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.33369/pendipa.8.2.191-203>

ABSTRACT

This study delves into Indonesia's pursuit of zero-emission clean energy by 2060, focusing on advanced light particle tracking technology and the transition to Clean Coal Technology (CCT) such as Carbon Capture Storage (CCS). Using a qualitative research approach with data from diverse sources, it discusses Indonesia's goals for reducing greenhouse gas emissions by 2030 per the National Determined Contribution (NDC) plan. Emphasizing strategies like Enhanced Oil Recovery (EOR), Enhanced Gas Recovery (EGR), and Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS), the study highlights their role in emission reduction. It also analyzes global and Indonesian advancements in CCS/CCUS technologies, underlining their potential across sectors like oil and gas, power generation, and industries. The study advocates for regional cooperation and infrastructure development to promote CCS/CCUS adoption, stressing technological progress and international collaboration in Indonesia's clean energy journey and emission reduction efforts. The government's commitment to implementing CCS and CCUS is reflected in the Ministry of Energy and Mineral Resources Regulation No. 2 of 2023. Indonesia has a CO₂ storage potential of 8.4 Gt CO₂, and so far, there are 15 CCS and CCUS projects underway.

Keywords: Energy Transition, Fossil Energy Technology, Indonesia, Carbon Capture and Storage (CCS), Carbon Capture Utilization Storage (CCUS).

ABSTRAK

Penelitian ini mengulas komitmen Indonesia mencapai energi bersih nol emisi 2060 dan tantangan serta peluangnya, fokus pada teknologi pelacakan partikel cahaya. Transisi dari penambangan batu bara ke Teknologi Batu Bara Bersih (CCT) seperti Penyimpanan Penangkapan Karbon (CCS) sangat penting. Dengan pendekatan kualitatif dan data dari berbagai sumber, studi ini membahas target pengurangan emisi gas rumah kaca 2030 sesuai rencana Kontribusi Nasional (NDC). Strategi seperti Peningkatan Pemulihan Minyak (EOR), Peningkatan Pemulihan Gas (EGR), dan Penyimpanan dan Pemanfaatan Karbon (CCUS) menjadi fokus utama dalam mengurangi emisi. Kolaborasi regional dan infrastruktur CCS/CCUS penting dalam mencapai tujuan energi bersih Indonesia. Komitmen pemerintah dalam implementasi CCS dan CCUS mengenai hal regulasi telah tertuang dalam Peraturan Menteri ESDM No. 2 Tahun 2023. Indonesia memiliki potensi CO₂ Storage 8.4 Gt CO₂ dan sejauh ini terdapat 15 proyek CCS dan CCUS.

Kata kunci: Transisi Energi, Teknologi Energi Fosil, Indonesia, Penangkapan dan Penyimpanan Karbon (CCS), Penangkapan dan Pemanfaatan Penyimpanan Karbon (CCUS).

PENDAHULUAN

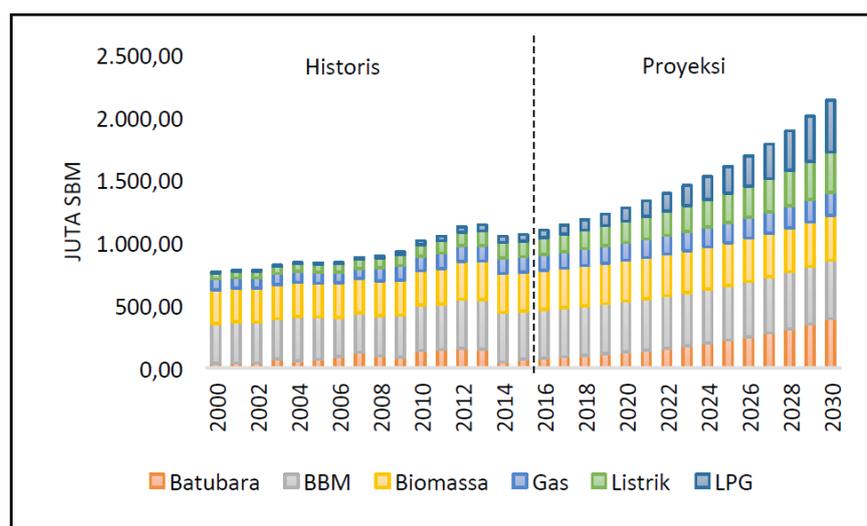
Batu bara telah berkontribusi pada produksi energi mulai dari tahap eksplorasi dan ekstraksi hingga menjadi bahan baku pembangkit listrik tenaga batu bara. Pada tahap eksplorasi dan intensifikasi, tujuannya adalah untuk mengidentifikasi beruang gua yang sering menyebabkan masalah lingkungan dan memicu konflik dengan masyarakat lokal.

Meskipun batu bara adalah sumber energi yang sangat stabil, efek lingkungan dari eksplorasi dapat mengakibatkan sedimentasi penguapan dan lingkungan non-reaktif.

Berdasarkan statistik dari Kementerian ESDM, Indonesia memiliki kapasitas produksi batu bara tahunan sekitar 33,37 juta ton, dengan tingkat produksi sekitar 600 juta ton per tahun (KESDM, 2022). Dengan asumsi ini adalah rintangan yang signifikan, upaya harus dilakukan untuk memberikan kontribusi yang bermanfaat bagi rakyat Indonesia, sambil juga memerlukan perhatian terhadap lingkungan. Berdasarkan data dari Minerba One Data Indonesia (MODI) untuk Desember 2023, telah mencapai 107,58%, atau 746,18 juta ton, dari target produksi untuk tahun 2023, yang

telah mencapai 649,50 juta ton batubara. Pada awal proyek, 176,80 juta ton, atau 70.1% dari total proyek, telah mencapai 322,44 juta ton. Mulai tahun 2023, pemerintah Indonesia bertekad untuk meningkatkan produksi batubara sekitar 460 juta ton. Mengenai realisasi domestik, MODI mencatat bahwa saat ini sekitar 71,06 juta ton, atau 40,19 persen dari rencana target awal sebesar 176,80 juta ton. Dengan hasil produksi mendekati 100%, penting bagi kita untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, terutama batu bara (MODI, 2023). Sementara itu, proyeksi kebutuhan energi listrik menunjukkan tren peningkatan seiring dengan

evolusi teknologi Tingkat konsumsi energi listrik juga berkorelasi dengan kemajuan teknologi yang terjadi. Pada tahun 2022, rata-rata kebutuhan listrik per individu di Indonesia mencapai 1.172 kilowatt-jam, dan estimasi menunjukkan peningkatan sejalan dengan pertumbuhan ekonomi yang diantisipasi mencapai 5,3% pada tahun 2023 (EBTKE, 2023). Dalam rangka memenuhi kebutuhan tersebut, perlu dilakukan peningkatan kapasitas pembangkit listrik. Mayoritas negara menggunakan pembangkit listrik berbasis tenaga uap (PLTU), termasuk Indonesia (Syabilla, dkk., 2023).



Gambar 1. Proyeksi Konsumsi Energi Final Berdasarkan Jenis Bahan Bakar
Sumber: Pusdatin KESDM, 2016.

Sektor ketenagalistrikan Indonesia berkontribusi emisi sebesar 14 % secara nasional. Emisi di Indonesia telah mencapai 1.002,4 MtCO₂e pada tahun 2021, dan didominasi oleh sektor ketenagalistrikan (electricity/heat) yang menyumbang 258.2 MtCO₂e atau sebesar 0.54% dari emisi gas rumah kaca secara global dan diproyeksikan akan terus bertambah volumenya jika tidak dilakukan mitigasi serius dari berbagai pihak (Fredrich dan Vigna, 2020).

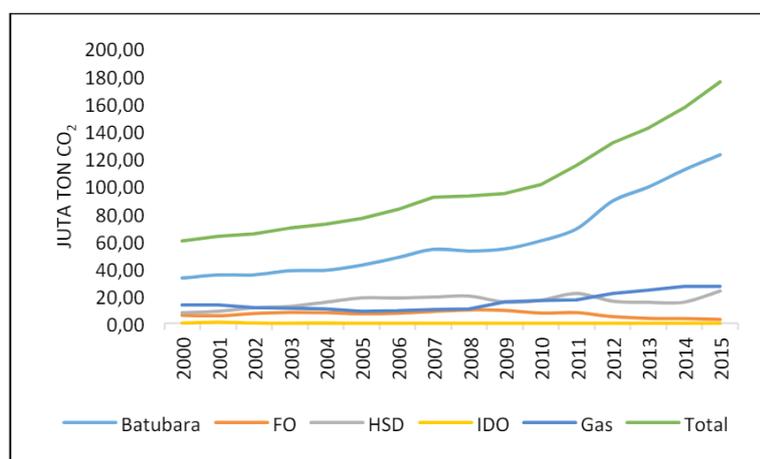
Peningkatan emisi karbon dari bahan bakar fosil telah mendorong pemerintah Indonesia untuk mengadopsi strategi mitigasi perubahan iklim dengan mengurangi emisi gas karbon dioksida (CO₂). Dewan Energi Nasional (2014) menetapkan dua skenario energi untuk mencapai komitmen ini: skenario "business as usual" dan Kebijakan Energi Nasional. Menurut Pusdatin KESDM yang

tercantum dalam data inventori emisi GRK 2016, menunjukkan bahwa emisi dari batubara menunjukkan tren peningkatan yang cukup signifikan, dari sekitar 40 juta ton CO₂ pada tahun 2000 hingga hampir 100 juta ton CO₂ pada tahun 2015. Peningkatan ini mengindikasikan ketergantungan yang tinggi pada batubara sebagai sumber energi, meskipun diketahui memiliki dampak besar terhadap emisi GRK (Pusdatin KESDM, 2016).

Menurut persetujuan yang tercantum dalam Paris Agreement 2016, Indonesia memiliki tujuan untuk menurunkan emisi CO₂ sebanyak 26% dengan meningkatkan penggunaan sumber EBT serta mengurangi ketergantungan pada bahan bakar berbasis karbon hingga tahun 2050 (Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019). Indonesia adalah negara yang terlibat dalam

roadmap transisi energi menuju Net Zero Emission (NZE). Hal ini menunjukkan Indonesia harus berkomitmen mendukung konservasi energi melalui implementasi energi yang lebih bersih. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral telah merumuskan peta jalan transisi energi menuju Net Zero Emission (NZE) pada tahun 2060. Upaya ini mencakup pengembangan Energi Baru dan Terbarukan (EBT), penghapusan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), pemanfaatan hidrogen, baterai, kendaraan listrik, gas kota, bahan bakar gas (BBG), serta teknologi rendah karbon seperti penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS/CCUS) (Pribadi, 2021). Langkah signifikan dalam proses transisi teknologi PLTU dan optimalisasi lifting migas adalah

transisi penggunaan teknologi energi yang lebih bersih, sehingga pemerintah mulai menerapkan teknologi Carbon Capture and Storage (CCS) (Adisaputro & Saputra, 2017); (Anggraini, Kuntjoro, dan Sasongko, 2018); (Junaidy, 2023). Meskipun implementasi CCS belum terlaksana sepenuhnya di Indonesia, beberapa penelitian telah dilakukan untuk menganalisis potensi, hambatan, dampak lingkungan, dan kontribusi CCS dalam industri energi berkelanjutan di Indonesia. Teknologi CCS bertujuan menyerap hingga 85% emisi CO₂ dari sektor pembangkit listrik dan industri sebelum disimpan di bawah tanah hingga kedalaman 700 meter (Prasetyo dan Windarta, 2022).



Gambar 2. Emisi GRK dari Sektor Pembangkit Listrik
Sumber: Pusdatin KESDM, 2016

METODOLOGI

Metode penelitian yang diterapkan dalam studi ini adalah pendekatan kualitatif. Pendekatan kualitatif dikenal sebagai metodologi penelitian di mana data-data yang diperoleh sebagian besar dijelaskan secara deskriptif. Dalam penelitian ini, digunakan data primer dan sekunder yang didukung oleh sumber-sumber data dari jurnal-jurnal, buku-buku, penelitian terdahulu, artikel ilmiah, dan berita dari situs resmi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengurangan Penggunaan Batubara pada Teknologi Energi Fosil

Pentingnya teknologi pembangkit listrik tenaga batu bara yang konvensional disesuaikan dengan kondisi di Indonesia. Dari

total 1.262 giga ton CO₂ yang dihasilkan di Indonesia, pembangkit listrik batubara memberikan kontribusi sebesar 35%. Dua tantangan utama dalam transisi energi adalah kemajuan teknologi dan pertumbuhan ekonomi.

Selain itu, tujuan strategi ini adalah untuk memaksimalkan tingkat kelulusan yang diinginkan dengan mengoptimalkan penggunaan sumber daya yang tersedia, terutama energi yang baru ditemukan. Hal ini juga sejalan dengan tujuan pencapaian minimum 23% EBT pada tahun 2025. Mengingat kelimpahan dan keterjangkauan batu bara di Indonesia, batu bara berkontribusi terhadap stabilitas pasokan energi. Namun demikian, hal ini menimbulkan konflik karena gas dari atap bocor dan polutan udara

dilepaskan, yang berdampak negatif terhadap kualitas udara dan mengubah iklimnya. Upaya internasional untuk mengurangi emisi karbon terhambat oleh konversi energi terbarukan dari biomassa.

Kemajuan dalam teknologi baterai (BCT) mungkin dapat mengurangi dampak lingkungan dari penggantian baterai karena baterai adalah sumber energi utama, terutama dalam baterai operasional penuh (pada PLTU) yang memerlukan investasi signifikan dan perubahan struktural. Dampak pada batu bara menyediakan pasokan energi yang cukup. Namun di sisi lain, situasi ini mungkin membuat negara-negara lebih tangguh terhadap perubahan dalam harga energi global dan kecepatan transisi energi.

Karbon dioksida yang dilepaskan ke atmosfer akan menyebabkan gas rumah kaca, yang merusak ekosistem dan menyebabkan

pemanasan global. Dengan menerapkan dekarbonisasi dalam beberapa kegiatan industri atau emisi nol—yaitu, emisi netral karbon—pada akhir tahun ini, Kesepakatan Paris dapat mengimbangi pemanasan global sebesar 1,5 hingga 2 derajat Celsius. Emisi rumah kaca akan menyerap energi dari Bumi dan akibatnya menyebabkan pemanasan global. Setelah itu, terjadi peningkatan permukaan laut dan penurunan salinitas laut, yang dikenal sebagai perubahan iklim. Berbagai masalah di Bumi, kesehatan yang buruk, dan perubahan dalam ekosistem dapat diatributkan pada perubahan iklim ini. Selain emisi CO₂ primer, gas lain yang mungkin berkontribusi terhadap pemanasan global termasuk metana, N₂O, udara atas, SO₂, CFC (klorofluorokarbon), dan ozon (O₃) (Sugihardjo, 2012).

Tabel 2. Target NDC 2030

No.	Sektor	Emisi GRK 2010 (Juta Ton CO ₂ e)	Emisi GRK 2030			Penurunan Emisi	
			BaU	CM1	CM2	CM1	CM2
1.	Energi	453,2	1.669	1.311	1.223	358	446
2.	Limbah	88	296	256	253	40	45,3
3	IPPU	36	70	63	61	7	9
4.	Pertanian	111	120	110	108	10	12
5.	Kehutanan	647	714	217	-15	500	729
	TOTAL	1.334	2.869	1.953	1.632	915	1.240

Keterangan :

CM : Counter Measure; CM1: usaha sendiri, CM2: Bantuan Internasional; IPPU : industrial process and production use (Sumber : Laporan Kinerja KESDM, 2022)

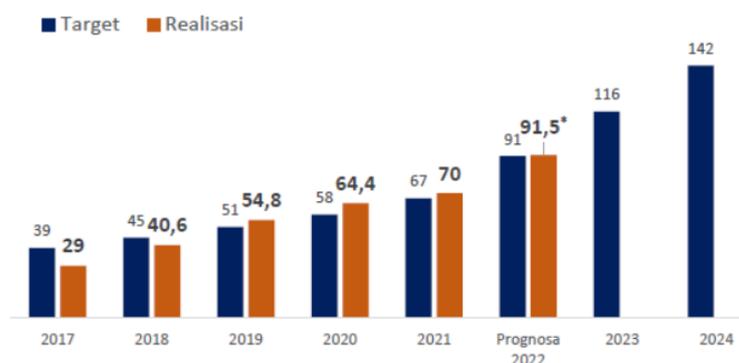
Pada 2030, konten CO₂ dalam atmosfer diproyeksikan sekitar 1.669 juta TonCO₂e dengan skenario *Business as Usual* (BaU) seperti yang terlihat pada **tabel 2**. Jika ini dibiarkan terus menerus tanpa mitigasi apapun, ini akan terus meningkat dan menyebabkan pemanasan global yang semakin serius. Salah satu tujuan Kesepakatan Iklim Paris (Paris Agreement) adalah mengurangi pemanasan global menjadi 1,5°C. Sebagai hasilnya, inisiatif Perang Lawan Perubahan Iklim menjadi kurang prioritas. Mengurangi jumlah emisi gas rumah kaca, membuat regulasi yang membatasi emisi CO₂ ke atmosfer, dan menerapkan CCS/CCUS adalah program-program penting untuk secara signifikan mengurangi emisi CO₂. Dalam upaya melindungi negara dari perubahan iklim yang disebabkan oleh emisi gas rumah kaca (GRK) dari bangunan-bangunan residensial, Indonesia telah berkomitmen pada Konferensi

Kopenhagen 2022 (COP-28) untuk mengurangi emisi sekitar 31,89 persen melalui kegiatan bisnis internal dan sekitar 41 persen melalui kolaborasi bisnis internasional, dibandingkan dengan skenario *Business as Usual* (BAU) (Paris Agreement, 2022).

Implementasi penurunan emisi gas rumah kaca, terlihat dari capaian penurunan emisi CO₂ yang tervisualisasi pada **grafik 1**. Dari grafik capaian penurunan emisi CO₂, terlihat bahwa realisasi penurunan emisi CO₂ telah berfluktuasi dan tidak selalu mencapai target yang ditetapkan dari tahun 2017 hingga 2022. Meskipun realisasi emisi CO₂ mengalami kenaikan signifikan pada tahun 2020 dan 2021, proyeksi untuk tahun 2022 menunjukkan penurunan yang tetap sesuai dengan target. Pada tahun 2023 dan 2024, target penurunan emisi ditetapkan sangat tinggi, mencapai 116 dan 142 MtCO₂e, menunjukkan sebuah ambisi kuat untuk

mempercepat upaya pengurangan emisi. Kegagalan dalam mencapai target ini menimbulkan pertanyaan penting tentang efektivitas kebijakan lingkungan yang diterapkan dan potensi penyesuaian strategi yang mungkin diperlukan untuk mencapai tujuan jangka panjang dalam pengurangan emisi karbon dioksida. Adapun intensitas penurunan emisi CO₂ pada 2022 yakni sebesar 0,335 MtCO₂e (jumlah penduduk 273 juta jiwa). Oleh karena itu, diperlukan aksi mitigasi sektor energi, berupa implementasi EBT,

aplikasi efisiensi energi, dan penerapan bahan bakar rendah karbon (gas alam), penggunaan teknologi energi bersih dan kegiatan lainnya. Sebagai bagian dari tanggung jawabnya dalam mengelola sektor energi Indonesia, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) telah menggagas serangkaian kebijakan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) dari perspektif permintaan energi. Kebijakan tersebut diuraikan dalam laporan terbarunya pada tahun 2022.



Grafik 1. Capaian Penurunan Emisi CO₂

Sumber : Laporan Kinerja Kementerian ESDM, 2022

Pertama, dalam sektor industri, rencana jangka pendek hingga menengah meliputi program pengalihan bahan bakar, peningkatan efisiensi energi, penggunaan listrik, dan pemanfaatan biomassa. Sementara itu, untuk jangka panjang, rencananya adalah menerapkan teknologi Penangkapan dan Penyimpanan Karbon (CCS) dan penggunaan hidrogen sebagai pengganti gas. Kedua, dalam sektor transportasi, rencana jangka pendek hingga menengah mencakup berbagai program seperti menghentikan impor bahan bakar minyak, meningkatkan penggunaan biofuel, dan memperbanyak kendaraan listrik. Adapun untuk jangka panjang, rencananya adalah melalui penggunaan bahan bakar e-fuel, hidrogen, dan amonia. Ketiga, untuk sektor rumah tangga dan komersial, langkah-langkah jangka pendek hingga menengah mencakup menghentikan impor gas LPG, mempromosikan penggunaan kompor listrik, memperluas jaringan gas, dan meningkatkan efisiensi energi.

Salah satu tantangan utama dalam upaya mengurangi emisi karbon dari sisi pasokan dan permintaan energi adalah mempertahankan ketahanan energi. Oleh karena itu, pemanfaatan energi bersih dan teknologi yang

ramah lingkungan menjadi sangat penting. Dalam konteks ini, pemerintah Indonesia telah mengambil langkah dengan mengembangkan dan menerapkan teknologi Penangkapan dan Penyimpanan Karbon (CCS) serta Penangkapan dan Pemanfaatan Karbon (CCUS) sebagai bagian dari solusi untuk mengatasi tantangan ini.

Perkembangan Teknologi Carbon Capture Storage (CCS) dan Carbon Capture Storage (CCUS) di Indonesia dan Dunia

Teknologi CCS/CCUS adalah metode yang mampu menangkap dan menyimpan karbon dioksida (CO₂) dalam jumlah besar dan secara signifikan. Implementasi teknologi ini menjadi sangat penting dalam usaha mereduksi emisi CO₂, baik dalam skala nasional maupun internasional. Secara global, hingga tahun 2021, penggunaan teknologi CCUS telah luas diterapkan di wilayah Amerika Utara, Eropa, dan Asia Pasifik sebagai langkah nyata dalam menghadapi tantangan perubahan iklim. Ada total 24 proyek yang telah mulai beroperasi saat ini. Selanjutnya, terdapat 16 proyek yang sedang dalam tahap awal pengembangan, dan 27

proyek lainnya sudah masuk dalam tahap pengembangan yang lebih lanjut. Di samping itu, terdapat 15 proyek yang sedang menjalani studi kelayakan, sementara 6 proyek lainnya masih berada dalam tahap percobaan. (PEI, 2022).

Di ranah nasional, sektor migas di Indonesia memiliki kandungan CO₂ yang cukup tinggi. Oleh karena itu, implementasi CCS/CCUS diharapkan dapat menjadi solusi teknologi yang efektif untuk mengembangkan sektor ini, terutama pada rantai nilai gas alam dimana lapangan gas dengan konsentrasi CO₂ yang tinggi memerlukan pemisahan CO₂ agar dapat memenuhi standar pasar gas alam atau LNG.

Peran teknologi CCS/CCUS dalam sektor energi adalah sebagai berikut (IEA, 2020):

1. Mengurangi emisi dari infrastruktur energi yang ada. CCS/CCUS dapat diimplementasikan sebagai fitur baru dalam infrastruktur seperti pabrik atau jalur perakitan berbasis daftar;
2. Sebagai solusi untuk beberapa area yang sangat terpengaruh oleh emisinya. Sekitar 20% emisi karbon global disebabkan oleh industri makanan dan minuman. Saat ini, ada 20 implementasi teknologi CCS/CCUS yang beroperasi secara global dalam kapasitas komersial, dan lebih dari tiga puluh fasilitas CCS/CCUS baru telah diumumkan dalam beberapa tahun terakhir (IEA, 2020). Selain itu, CCS/CCUS adalah salah satu teknologi yang sedikit tersedia saat ini yang dapat digunakan sebagai solusi untuk implementasi di masa mendatang. Beberapa proyek telah mencapai

keputusan investasi akhir (FID) dengan investasi sekitar 27 juta dolar AS;

3. Mengurangi jumlah emisi sulit dihilangkan dalam beberapa industri kimia, seperti produksi karet sintetis untuk kebutuhan industri transportasi, terutama di penerbangan. Saat ini tidak ada alternatif untuk mengurangi emisi, dan fasilitas CCUS di industri-industri sulit dihilangkan sedang dibangun;
4. Pemanfaatan teknologi CCS dapat mempercepat pengembangan dan adopsi teknologi energi terbarukan berbasis hidrogen. CCS memiliki kemampuan untuk memperlambat proses produksi hidrogen berbasis energi bahan bakar fosil dengan mengurangi dan menyimpan emisi karbon yang dihasilkan dari proses tersebut;
5. Mengurangi emisi karbon atmosfer, khususnya di area-area di mana emisi tidak dapat dikurangi atau dihindari. Pemanfaatan teknologi CCS/CCUS dapat mengurangi emisi karbon dari atmosfer.

Dalam sektor energi saat ini, CCS/CCUS masih sangat bergantung pada teknologi dan sumber daya manusia. Menurut IEA (2020), beberapa faktor yang dapat membantu meningkatkan aplikasi CCS/CCUS selama periode transisi adalah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi kondisi iklim yang mendukung untuk investasi dalam energi terbarukan dan offset karbon;
2. Mengembangkan titik CCS yang dapat memanfaatkan infrastruktur yang ada melalui mekanisme akses terbuka atau tertutup untuk meningkatkan skala ekonomi dan ekologis; dan;
3. Menentukan dan mempromosikan pengembangan penyimpanan CO₂ di wilayah-wilayah yang relevan.

Tabel 1. Proyek CCUS Skala Besar yang Akan Mulai Beroperasi Komersial pada Tahun 2020

<i>Country</i>	<i>Project</i>	<i>Operati on Year</i>	<i>CO₂ Source</i>	<i>Absorb Capacity CO₂ (Mt/Year)</i>	<i>Type of Storage</i>
US	Terrel Natural Gas Plants (before: Val Verde)	1972	NG <i>processing</i>	0,5	EOR
US	Enid Fertiliser	1982	<i>Fertilizer Production</i>	0,7	EOR
US	Processing Gas Shute Creek Facility	1986	NG <i>processing</i>	7,0	EOR
Norwegia	Sleipner CO ₂ Storage	1996	NG <i>processing</i>	1,0	<i>Dedicated</i>

US/Canada	Great Plains Synfuels (Weyburn/ Midale)	2000	<i>Synthesis Gas</i>	3,0	EOR
-----------	--	------	--------------------------	-----	-----

Sumber: World Energy Outlook International Energy Agency (IEA), 2022

Untuk mencapai tujuan iklim, teknologi penangkapan dan pemanfaatan karbon serta teknologi pemetaan (CCS/CCUS) sangat penting. Diantisipasi bahwa kemajuan teknologi ini tidak hanya dapat mengurangi emisi secara diam-diam di wilayah saat ini, tetapi juga dapat menghilangkan CO₂ dari atmosfer melalui penggunaan dua metode: penangkapan karbon secara diam-diam (direct air capture) dan kombinasi CCS/CCUS dengan bioenergi (BECCS) untuk tujuan berorientasi masa depan. Saat ini, ada dua puluh implementasi teknologi CCS/CCUS yang beroperasi secara global dalam kapasitas komersial, dan beberapa tahun kemudian, tiga puluh fasilitas CCS/CCUS baru diperkenalkan. Beberapa proyek telah mencapai keputusan investasi akhir (FID) dengan pengeluaran sekitar 27 juta dolar AS (IEA, 2022).

Implementasi CCS/CCUS dimodifikasi oleh Peraturan Menteri ESDM Nomor 2 Tahun tentang Penetapan Emisi dan Penyimpanan Karbon, serta Penetapan, Penyimpanan, dan Pemanfaatan Karbon dalam Proses Produksi Hidrokarbon dan Gas. Menurut informasi yang diberikan oleh Kementerian ESDM, saat ini ada 15 proyek CCS dan CCUS di Indonesia yang sedang diteliti atau diselidiki, dan diantisipasi bahwa beberapa di antaranya akan selesai pada tahun 2030. Pada tahun 2030 dan 2035, potensi gabungan CCS dan CCUS akan mencapai 25,5 juta ton hingga 68,2 juta ton CO₂. Saat ini, ada beberapa proyek CCS/CCUS yang sedang berlangsung, seperti yang dilakukan oleh Pertamina di Gundih dan Sukowati, serta proyek *Enhanced Gas Recovery* (EGR) CO₂ yang sedang berlangsung di Lapangan Tangguh, yang dikelola oleh BP Tangguh. Proyek potensial lainnya termasuk yang dilakukan oleh Panca Amara Utama, JOGMEC, Mitsubishi, dan ITB; penelitian CCS di Sakakemang oleh Repsol; proyek CCS/CCUS di Lapangan Abadi oleh Inpex; dan produksi amonia biru menggunakan penyimpanan CO₂ oleh Toyo Engineering Corporation, Pupuk Kalimantan Timur, dan Pertamina Hulu Indonesia.

Penggunaan teknologi CCS/CCUS dalam sektor hulu migas diharapkan dapat

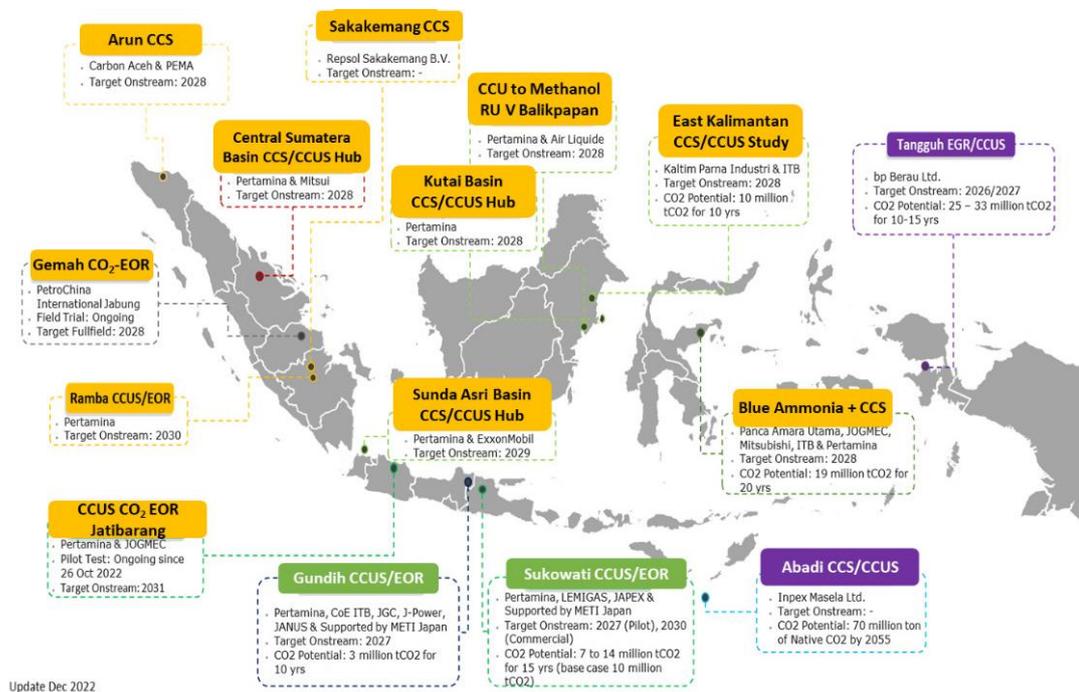
mendukung peningkatan produksi migas melalui metode *Enhanced Oil Recovery* (EOR) atau *Enhanced Gas Recovery* (EGR). EOR adalah teknik untuk meningkatkan produksi minyak bumi dengan menyuntikkan sumber energi eksternal, sedangkan EGR merupakan praktik menyuntikkan gas CO₂ ke dalam lapangan untuk meningkatkan produksi migas di lapangan yang reservoirnya mulai berkurang. Sebagai contoh, implementasi CCS/CCUS di Lapangan Ubadari dan Vorwata memiliki potensi untuk meningkatkan produksi gas hingga 1,3 TCF saat *on-stream* pada tahun 2026 atau 2027 mendatang (SKK Migas, 2023).

Selain itu, terdapat potensi peningkatan produksi dari uji coba injeksi CO₂ di Lapangan Jatibarang oleh PT Pertamina EP menggunakan metode *huff and puff*. Metode ini melibatkan injeksi CO₂ ke dalam sumur selama beberapa hari, ditutup untuk beberapa waktu, kemudian dibuka kembali untuk meningkatkan produksi minyak atau gas, yang diperkirakan dapat meningkatkan produksi hingga 30-40%. Selain dari sektor migas, Indonesia juga memiliki sejumlah sumber CO₂ dari industri seperti pemrosesan gas bumi, kilang minyak bumi, pabrik kimia, dan PLTU batubara yang memiliki potensi untuk dikembangkan ke depannya. Menurut studi Ditjen Migas Kementerian ESDM, terdapat tiga potensi kerja sama pengembangan CCS/CCUS di Indonesia. Pertama, melalui pengembangan CCS/CCUS dengan pengelolaan CO₂ regional yang terhubung, kedua adalah pengembangan penggunaan CO₂ untuk produksi metanol, dan ketiga adalah pengembangan blue hydrogen dan blue ammonia terintegrasi dengan CCS (Ditjen Migas, 2022).

Di Indonesia, teknologi batu bara bersih telah digunakan untuk sistem listrik Jawa-Bali dengan memanfaatkan teknologi pembangkit listrik tenaga batu bara hingga ultra-supercritical 1.000 MW untuk mencapai efisiensi yang lebih tinggi dan emisi CO₂ yang lebih rendah. Selain itu, penggunaan ukuran unit besar ini dimungkinkan oleh skala ekonomi dan waktu yang singkat untuk

membangun bangunan skala besar di Pulau Jawa. Selain itu, Asia Tenggara mulai mengadopsi pembangkit listrik tenaga batu bara menggunakan teknologi batu bara bersih, yang memiliki kapasitas pembangkitan listrik 300–600 MW (*ultra-supercritical*). Sistem

listrik Kalimantan dan Sulawesi juga telah memulai pengenalan pembangkit listrik tenaga batu bara dengan kapasitas 200 MW untuk mencapai efisiensi yang lebih tinggi daripada kapasitas saat ini.



Gambar 1. Lokasi Proyek CCS/CCUS di Indonesia
Sumber: Kementerian ESDM, 2023

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Lemigas Kementerian ESDM, Indonesia memiliki potensi penyimpanan CO₂ yang signifikan. Terdapat sekitar 2,5 gigaton CO₂ yang dapat disimpan di reservoir migas yang tersebar di berbagai wilayah di Sumatra, Jawa, Kalimantan, dan Papua. Selain itu, terdapat potensi penyimpanan sekitar 9,7 gigaton CO₂ pada saline aquifer yang terletak di wilayah Jawa bagian barat dan Sumatra bagian selatan. *Saline aquifer*, yang merupakan reservoir air dengan tingkat salinitas tinggi, dianggap sebagai tempat penyimpanan yang aman karena gas CO₂ yang terlarut dalam air garam akan mengalami mineralisasi dan pengendapan seiring berjalannya waktu. Selain studi yang dilakukan oleh Lemigas, penelitian dari ExxonMobil memperkirakan potensi penyimpanan yang lebih besar, yakni sekitar 80 gigaton CO₂ pada saline aquifer. Hasil kajian dari Rystad Energy bahkan memperkirakan bahwa Indonesia memiliki potensi lokasi penyimpanan karbon hingga

400 gigaton CO₂ pada reservoir lapangan migas dan *saline aquifer* (Ditjen Migas, 2022).

Selain mengembangkan solusi penyimpanan lokal CO₂ untuk keperluan dalam negeri, alternatif lain yang dapat dijelajahi dalam pengembangan infrastruktur transportasi dan penyimpanan CO₂ adalah dengan mengadopsi pendekatan regional atau kawasan, yang dikenal sebagai CCS hub. Pendekatan ini bertujuan untuk mempercepat pengembangan proyek dan meningkatkan adopsi pasar CCUS, terutama di kawasan Asia Tenggara. Dengan pengembangan infrastruktur penyimpanan CO₂ yang memiliki kapasitas besar, negara-negara ASEAN dapat memanfaatkannya secara bersama-sama, terutama bagi negara-negara yang memiliki kapasitas terbatas dalam CCUS atau mengalami keterlambatan dalam mengimplementasikan proyek CCUS mereka sendiri.

Menurut studi IEA (2021), sebagian besar potensi penyimpanan CO₂ di ASEAN terletak pada lapisan saline aquifer. Namun,

terdapat juga peluang penyimpanan lainnya yang berasal dari lapangan minyak dan gas yang sudah mulai menurun produksinya. Pengembangan bisnis CCS hub memiliki potensi yang menjanjikan di kawasan Asia

Tenggara, mengingat sumber CO₂ tidak hanya berasal dari sektor migas, tetapi juga dari sektor lain seperti pembangkit listrik, industri berat, petrokimia, semen, dan sektor-sektor lainnya.

Tabel 2. Estimasi CO₂ Storage untuk Negara-Negara ASEAN

Negara	Tipe Storage	Estimasi Volume	Total Volume
Brunei	<i>Oil and gas fields</i>	0.6 Gt CO ₂	0.6 Gt CO ₂
Indonesia	Cekungan Sumatera Selatan	7.65 Gt CO ₂	8.4 Gt CO ₂
	Cekungan Jawa (Lapisan <i>saline</i> yang dalam)	386 Mt CO ₂	
	Cekungan Tarakan	130 Mt CO ₂	
	Cekungan Sumatera Bagian Tengah	229 Mt CO ₂	
Malaysia	Cekungan Melayu	80 Gt CO ₂	80 Gt CO ₂
Filipina	<i>Saline Aquifers</i>	22 Gt CO ₂	22.3 Gt CO ₂
	<i>Gas Fields</i>	0.3 Gt CO ₂	
Thailand	Formasi <i>saline</i> di dalam	8.9 Gt CO ₂	10.3 Gt CO ₂
	Cekungan Besar Thai dan Cekungan Pattani		
	<i>Gas and oil fields</i>		
Vietnam	Reservoir <i>saline</i> yang dalam	10.4 Gt CO ₂	11.8 Gt CO ₂
	<i>Deoleated oil and gas fields</i>	1.4 Gt CO ₂	

Sumber: IEA, 2021

Secara keseluruhan, terdapat beberapa faktor yang menjadi pendorong dalam pengembangan bisnis CCS/CCUS, termasuk skema penangkapan, metode transportasi, kesiapan penyimpanan, dan dukungan regulasi (ERCE, 2022). Pada bidang penangkapan, faktor-faktor yang mempengaruhi termasuk pemilihan skema hub atau single emitter. Pilihan skema hub memberikan keuntungan dengan adanya sumber karbon dari berbagai industri (bukan hanya dari sektor migas). Namun, hal ini juga berimplikasi pada risiko variasi spesifikasi CO₂ yang berbeda, termasuk kontaminan yang mungkin ada.

Dalam hal metode transportasi, seperti halnya transportasi gas alam, faktor volume dan jarak menjadi penentu dalam memilih dan mengkalkulasikan ekonomi skema transportasi karbon menuju lokasi penyimpanan, apakah melalui pipa atau pengiriman (shipping). Selain itu, faktor kompresi dan asuransi aliran juga perlu dipertimbangkan untuk skema transportasi dalam jarak yang lebih jauh.

Tantangan dan Masa Depan *Carbon Capture Storage (CCS)* dan *Carbon Capture*

Utilization Storage (CCUS) untuk Teknologi Energi Fosil di Indonesia

Mengenai penggunaan *Carbon Capture Storage (CCS)* dan *Carbon Capture Utilization Storage (CCUS)* dalam kemajuan teknologi bahan bakar fosil di Indonesia, terdapat beberapa isu yang perlu diperhatikan, namun juga terdapat potensi signifikan untuk mengurangi emisi karbon.

Tantangan CCS/CCUS

1. Investasi Besar

Implementasi CCS memerlukan investasi besar dalam teknologi dan infrastruktur. Biaya tinggi berpotensi menjadi hambatan besar. Meskipun CCS memiliki potensi untuk mengurangi emisi di sektor energi, selain dari penggunaan energi nuklir, biaya operasional di sektor energi akan meningkat karena implementasi CCS. Perlu adanya kemajuan teknologi CCS yang lebih lanjut dan mencapai tingkat yang signifikan dalam beberapa tahun mendatang, mengingat biaya penurunan emisi CCS saat ini berkisar antara 100 dan 130 USD per ton.

Sebagai hasilnya, jika sistem ekonomi disesuaikan untuk meningkatkan

perbedaan antara biaya penghapusan karbon menggunakan CCS dan konsumsi energi bersih, akan terjadi skenario penggunaan CCS di industri pertambangan. Oleh karena itu, penelitian CCS membutuhkan dukungan pemerintah, baik secara finansial maupun non-finansial, serta kemajuan teknologi yang dapat menurunkan biaya CCS.

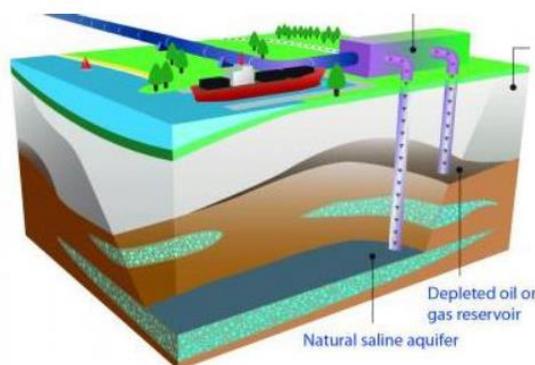
2. Ketersediaan Teknologi Lanjutan

Teknologi CCS masih dalam tahap awal pengembangan dan belum mencapai potensi penuhnya, yang menimbulkan kekhawatiran tentang keselamatan dan produktivitas pekerja di medan yang kasar. Indonesia perlu meningkatkan output teknologi, ilmiah, dan intelektualnya. Hal ini harus dicapai dengan memperkuat teknologi yang menua, atau teknologi menua, yang diperlukan untuk mendegradasi sistem energi, termasuk baterai. Contohnya, masalah penangkapan dan penyimpanan karbon. Ada teknologi penangkapan yang dapat mengurangi biaya

CCS hingga 80%. Memecahkan masalah ini dapat mendorong pertumbuhan ekonomi dan mendorong pengembangan teknologi CCS, yang dapat mengurangi emisi di sektor konstruksi dan area lain yang saat ini masih menjadi perdebatan di Indonesia.

3. Kesesuaian dengan Geologi dan Geofisika

Keberhasilan CCS dikaitkan dengan kemampuan bangsa dalam mengelola karbon secara etis. Tidak setiap tempat memiliki fitur yang sesuai. Dalam konteks pemilihan skema penyimpanan, baik pemanfaatan reservoir yang telah habis (depleted reservoir) maupun saline aquifer memiliki karakteristik dan tantangan yang berbeda. Reservoir yang telah habis memiliki keuntungan karena sudah memiliki infrastruktur yang ada, yang dapat mengurangi biaya investasi awal. Namun, penggunaan infrastruktur yang sudah ada ini juga membawa potensi risiko, terutama jika material yang digunakan rentan terhadap korosi oleh CO₂.



Gambar 2. Perbandingan Ilustrasi Penampang Saline Aquifer dan Reservoir Migas

Sumber: ERCE, 2022

Sebaliknya, penggunaan *saline aquifer* menghadirkan tantangan berupa biaya investasi yang lebih tinggi untuk eksplorasi dan appraisal, serta ketersediaan data subsurface yang lebih terbatas dibandingkan dengan reservoir migas yang telah habis. Menurut studi ERCE (2022), skala global dari suatu proyek akan mempengaruhi pilihan lokasi penyimpanan. Proyek-proyek skala besar cenderung menggunakan saline aquifer, seperti yang terlihat pada proyek Sleipner dan Northern Lights, sedangkan proyek-proyek skala lebih kecil biasanya menggunakan depleted fields, contohnya di lapangan Kasawari.

Untuk mendukung pengembangan CCS/CCUS di Indonesia, Pemerintah telah mengimplementasikan berbagai kebijakan, termasuk pembentukan CCS/CCUS *National*

Centre of Excellence bersama lembaga penelitian dan universitas; memperkuat kerja sama internasional di bidang CCS/CCUS; menyusun rancangan regulasi dan kebijakan turunan; serta mendorong perdagangan karbon. Implementasi kebijakan ini termasuk penerbitan Permen ESDM No. 2 Tahun 2023 tentang Penyelenggaraan Penangkapan dan Penyimpanan Karbon, serta Penangkapan, Pemanfaatan, dan Penyimpanan Karbon pada Kegiatan Usaha Hulu Migas.

4. Regulasi

Keberhasilan CCS membutuhkan kepemimpinan kuat dari pemerintah. Penting untuk mengikuti regulasi fiskal yang jelas dan insentif untuk mencapai tingkat keberhasilan ini. Perlu untuk meninjau UU tentang Minyak dan Gas terkait proses dekarbonisasi

menggunakan regulasi CCS/CCUS di sektor gas hilir.

5. Penanganan Limbah dan Risiko Keamanan Hasil dari proses CCS dan pengurangan risiko kebocoran karbon adalah pertimbangan penting yang harus dipertimbangkan dengan hati-hati.

Masa Depan CCS/CCUS

1. Diversifikasi Energi Bersih

Salah satu alat penting untuk mengurangi emisi karbon dari pembangkit listrik tenaga batubara adalah CCS. Hal ini akan memungkinkan diversifikasi portofolio energi untuk mencakup sumber energi yang lebih seimbang.

2. Pengakuan Hukum Lingkungan Global

Indonesia dapat meningkatkan posisinya dalam mencapai target emisi karbon global dengan memperbesar upaya global dalam mengatasi perubahan iklim.

3. Ketahanan Energi

Dengan memperluas pembangkit listrik tenaga batubara yang sudah ada, CCS dapat mempertahankan posisi pentingnya dalam memantau perkembangan sektor energi terbarukan di Indonesia.

4. Inovasi dan Analisis

Untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya implementasi CCS, diperlukan inovasi teknologi dan penelitian yang terus menerus.

5. Peningkatan Sumber Daya Manusia

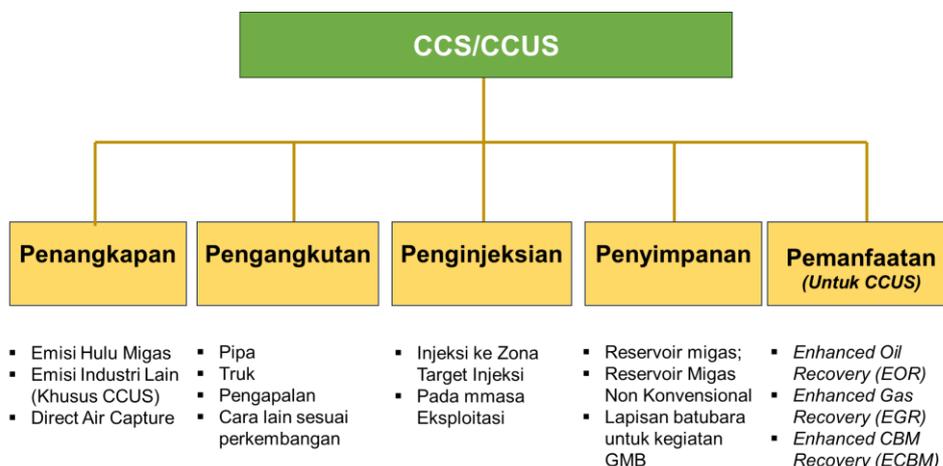
Untuk menangani masalah teknis dan manajerial di sektor CCS, perlu meningkatkan kualitas dan kuantitas sumber daya manusia. Sebelum adanya CCS, teknologi bahan bakar fosil di Indonesia memiliki peran

kritis dalam menghasilkan energi yang lebih konsisten dan dapat diperbaharui.

Dengan menerapkan pendekatan holistik yang melibatkan pemerintah, bisnis, dan organisasi penelitian, CCS di Indonesia memiliki potensi untuk memberikan kontribusi positif terhadap upaya global untuk mengurangi laju perubahan iklim. Berkat formasi geologis Indonesia, emisi karbon permanen dapat dicapai dengan menggunakan teknologi dalam kegiatan penangkapan dan pelepasan karbon serta penangkapan, pelepasan, dan daur ulang karbon (CCS/CCUS).

6. Perkembangan Regulasi

Peraturan Menteri ESDM No. 2 Tahun 2023 mengenai Penangkapan dan Penyimpanan Karbon, serta Penangkapan, Injeksi, Penyimpanan, dan Pemanfaatan Karbon dalam Industri Hidrokarbon dan Gas Alam, menyoroti empat area kunci yang difokuskan untuk implementasi CCS/CCUS di lingkungan kerja jarak jauh: teknis, bisnis, hukum, dan ekonomi. Sebagai hasilnya, sesuai dengan tujuan Kesepakatan Paris untuk mencapai Konvensi Tenaga Kerja, undang-undang ini akan membantu Indonesia memenuhi komitmennya dalam mitigasi perubahan iklim global. Dua elemen teknis penting adalah penerimaan, transportasi, injeksi, dan penyimpanan, serta pelaporan dan verifikasi. Kedua, pilih protokol teknis yang sesuai dengan setiap lokasi. Dalam konteks skenario bisnis, ada kemungkinan bahwa CO₂ dapat berasal dari industri lain (terutama CCUS) dan industri gas melalui kontrak B-to-B dengan perusahaan kontraktor gas.



Gambar 3. Ruang Lingkup Kebijakan Permen ESDM No.2 Tahun 2023

Sumber: *KESDM, 2023*

Secara hukum, program CCS/CCUS yang dijalankan oleh KKKS harus disampaikan ke Rencana Pembangunan (PoD), dan pemantauan harus berlanjut hingga dua tahun setelah program selesai. Selain itu, regulasi mengenai transfer modal ke pemerintah harus ada, antara lain. Elemen ekonomi ketiga yang memengaruhi pihak lain meliputi kemampuan untuk menggunakan kredit karbon sesuai dengan Keputusan Presiden Nomor 98 tahun 2021 mengenai Target yang Ditentukan Secara Nasional untuk Kontribusi dan Emisi Gas Rumah Tangga dalam Pembangunan Nasional, serta potensi hasil monetisasi CCS/CCUS.

Selain aspek regulasi, sejalan dengan kebutuhan untuk mempercepat pengembangan CCS/CCUS demi mendukung pencapaian target Net Zero Emission (NZE), Kementerian Koordinator Bidang Kemaritiman dan Investasi Indonesia membentuk Indonesia Carbon Capture and Storage Center (ICCS) pada bulan Mei 2023. ICCS merupakan kumpulan pakar dari berbagai disiplin ilmu, termasuk teknik, sains, kebijakan, dan bisnis, yang bertujuan menghadapi tantangan yang timbul akibat karbon dioksida. Melalui kegiatan penelitian, inovasi, dan advokasi, ICCS berupaya mencari solusi untuk masalah tersebut, sehingga teknologi CCS dapat segera diterapkan di Indonesia.

Selama beberapa tahun terakhir, kesadaran masyarakat mengenai *Carbon Capture and Storage* (CCS) di Indonesia masih tergolong rendah, meskipun beberapa praktisi telah memperoleh pemahaman yang solid tentang CCS. Oleh karena itu, dibutuhkan upaya sosialisasi yang lebih luas tentang konsep CCS secara keseluruhan, termasuk aspek keselamatan dan keamanan operasionalnya yang relevan bagi masyarakat umum. Namun, terdapat peningkatan minat terhadap riset CCS di Indonesia, yang tercermin dalam langkah-langkah regulasi baru yang telah dikeluarkan untuk mengatur rencana Penelitian dan Pengembangan (R&D) jangka pendek terkait CCS. Regulasi ini tidak hanya menitikberatkan pada aspek teknis tetapi juga menggarisbawahi pentingnya pengembangan regulasi non-teknis sebagai bagian dari pengembangan CCS di Indonesia (Zaemi, dkk., 2021).

KESIMPULAN

Indonesia, sebagai negara kepulauan dengan jejak karbon yang relatif rendah, telah mengambil langkah-langkah signifikan dalam upaya mengurangi emisi gas rumah kaca. Dengan komitmen untuk mencapai energi bersih nol emisi pada tahun 2060, Indonesia memperkenalkan strategi seperti *Clean Coal Technology* (CCT) dengan penggunaan *Carbon Capture Storage* (CCS). Hal ini sejalan dengan paradigma global yang mendukung konservasi energi dan emisi karbon nol untuk memerangi pemanasan global. Tantangan dan peluang yang dihadapi Indonesia dalam mengejar emisi nol bersih perlu mengadopsi teknologi pelacakan partikel cahaya yang lebih maju dan pengembangan infrastruktur CCS/CCUS menjadi kunci dalam upaya mencapai tujuan ini.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa transisi energi dari batu bara konvensional ke energi bersih merupakan langkah penting. Namun, tantangan dalam mengoptimalkan penggunaan sumber daya yang tersedia, terutama dengan ketergantungan pada batu bara, membutuhkan perhatian khusus terhadap mitigasi emisi karbon. Pengembangan teknologi CCS/CCUS di Indonesia, seperti yang tercermin dalam proyek-proyek yang sedang berlangsung dan potensi penyimpanan CO₂ yang signifikan, menjanjikan solusi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dari sektor energi fosil. Namun, upaya-upaya ini harus disertai dengan dukungan infrastruktur, kebijakan, dan investasi yang tepat untuk memastikan keberhasilan dalam menghadapi tantangan perubahan iklim secara efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- Adisaputro, D., Saputra, B. (2017). Carbon Capture and Storage and Carbon Capture and Utilization: What Do They Offer to Indonesia, *Front. Energy Research* 5:6. www.frontiersin.org.
- Anggraini, Rr., Citra Permata Kususma, Kuntjoro, Yanif Dwi, Sasongko, Nugroho Adi. 2018. Potensi Pemanfaatan Mikroalga untuk Mitigasi Emisi CO₂ (Studi Kasus Di PLTU Cilacap). *Jurnal Ketahanan Energi*, Vol. 4 (1).

- Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi. (2022). Potensi Kerja Sama CCS/CCUS Terus Dikembangkan. Diakses dari <https://migas.esdm.go.id/post/read/potensi-kerja-sama-ccs-ccus-terusdikembangkan>.
- ERC Equipoise. (2022). ERCE Introduction Indonesian CCS/CCUS Cross Border.
- Indonesia Petroleum Association, Wood Mackenzie. (2023). Achieving Resilience in the Energy Transition to Safeguard Indonesia's Economic Growth & Sustainable Development. Jakarta.
- International Energy Agency (IEA). (2021). Carbon Capture, Utilisation and Storage: The Opportunity in Southeast Asia.
- International Energy Agency (IEA). (2022). World Energy Outlook.
- KESDM. (2023). 16 Proyek CCS/CCUS Ditargetkan Beroperasi Sebelum 2030. Diakses dari <https://www.esdm.go.id/id/mediacenter/arsip-berita/16-proyek-ccs-ccusditargetkan-beroperasi-sebelum-2030>. Jakarta.
- KESDM (2023). Capaian Kinerja Sektor ESDM Tahun 2022 & Target Tahun 2023. Jakarta.
- KESDM. (2023). Sosialisasi Permen ESDM Nomor 2 Tahun 2023. Jakarta.
- KESDM. (2022). Indonesia Transition Outlook. Jakarta
- KESDM. (2022). Laporan Kinerja KESDM. Jakarta
- KESDM. (2023). <https://modi.esdm.go.id/> diakses pada 23 Desember 2023.
- Pertamina Energy Institute. (2022). Pertamina Energy Outlook 2022. Jakarta.
- Prasetyo, Ahmad Wisnu dan Windarta, Jaka. (2022). Pemanfaatan Teknologi Carbon Capture Storage (CCS) dalam Upaya Mendukung Produksi Energi yang Berkelanjutan. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan (JEBT)*. Vol. 3, No. 3, pp 231 – 238, p-ISSN: 2809-5456 and eISSN: 2722-6719.
- PT PLN .(2021).Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030.
- Sugihardjo. (2012). Preliminary Carbon Utilization and Storage Screening of Oil Fields in South Sumatra Basin. *Scientific Contributions Oil & Gas*, 35(2).
- Sugihardjo.(2021). Penyarianan dan Peringkat Cekungan Kalimantan Timur serta Potensinya untuk Implementasi CCUS. Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi (LEMIGAS). Vol. 55 No.3, 171-185, ISSN : 2089-3396 e-ISSN : 2598-0300.
- Sugihardjo. (2022). CCUS-Aksi Mitigasi Gas Rumah Kaca dan Peningkatan Pengurusan Minyak CO₂-EOR. Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi (LEMIGAS). Vol. 56 (1), April 2022: 11 – 25. ISSN: 2089-3396 e-ISSN: 25980300,DOI:10.29017/LPMGB.44.3.7 09.
- Syabilla, Jihan, dkk. (2023). Analisa efisiensi thermal boiler tipe circulation fluidized beddi PLTU 3x10 MW. *Machinery Jurnal Teknologi Terapan* Vol.4 (3), ISSN : 2723-3359, ISSN : 2776-673X (Online). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10122406>.
- Zaemi, F., Rohmana,R. (2021). Carbon Capture Utilization and Storage untuk Pembangunan Berkelanjutan: Potensi dan Tantangan di Industri Migas Indonesia, Teknik Perminyakan, Universitas Tanri Abeng.