



Carbon Capture Storage dalam Pengelolaan Barang Milik Negara

Jerri Falson¹, Andri Setia Budi*².

Kementerian Keuangan^{1,2}.

jerri.falson@kemenkeu.go.id¹, andri.budi@kemenkeu.go.id².

*penulis korespondensi

Keywords: *Climate Change, Carbon Storage, State Asset*

ABSTRACT

Climate change has gained increased attention since the 2015 Paris Agreement, which aims to limit global warming to below 2 degrees Celsius, with an ideal target of 1.5 degrees. This agreement emphasizes the critical need for collective action to lower greenhouse gas emissions and strengthen resilience against climate impacts. By June 2023, the global average surface temperature reached a historic high, with following months also breaking records. Combatting the harmful effects of global warming, like rising temperatures and extreme weather events, necessitates substantial reductions in greenhouse gas emissions. In the energy sector, actions have reduced CO₂ emissions significantly, from 40.6 million tons in 2018 to 127.67 million tons by 2023, through enhanced energy efficiency, a shift to renewable energy, and the adoption of carbon capture and storage (CCS) technology. In Indonesia, CCS is governed by the Ministry of Energy and Mineral Resources Regulation No. 2 of 2023, involving carbon capture, transport, injection, and permanent storage. Related state-owned asset management is regulated by Ministry of Finance Regulation No. 140/PMK.06/2020, which oversees the transfer, utilization, and valuation of upstream oil and gas assets. This paper explores the role of asset management in CCS implementation in Indonesia, including regulatory challenges and future prospects.

Kata Kunci: *Perubahan Iklim, Penyimpanan Karbon, Aset Negara*

ABSTRAK

Perubahan iklim mendapat perhatian lebih sejak Perjanjian Paris 2015, yang bertujuan untuk membatasi pemanasan global di bawah 2 derajat Celsius, dengan target ideal 1,5 derajat. Perjanjian ini menekankan pentingnya aksi kolektif untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan memperkuat ketahanan terhadap dampak iklim. Pada Juni 2023, suhu permukaan rata-rata global mencapai titik tertinggi dalam sejarah, dan bulan-bulan berikutnya juga mencatatkan rekor panas. Mengatasi dampak merugikan pemanasan global, seperti peningkatan suhu dan perubahan cuaca ekstrem,

memerlukan pengurangan signifikan emisi gas rumah kaca. Di sektor energi, upaya telah mengurangi emisi CO₂ secara signifikan, dari 40,6 juta ton pada 2018 menjadi 127,67 juta ton pada 2023, melalui peningkatan efisiensi energi, peralihan ke energi terbarukan, dan penerapan teknologi penangkapan serta penyimpanan karbon (CCS). Di Indonesia, CCS diatur oleh Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 2 tahun 2023, mencakup penangkapan, transportasi, injeksi, dan penyimpanan permanen karbon. Pengelolaan aset negara terkait CCS diatur dalam Peraturan Menteri Keuangan No. 140/PMK.06/2020, yang mengawasi pemindahtanganan, pemanfaatan, dan penilaian aset hulu minyak dan gas. Artikel ini membahas peran pengelolaan aset negara dalam implementasi CCS di Indonesia, termasuk tantangan regulasi dan prospek ke depannya.

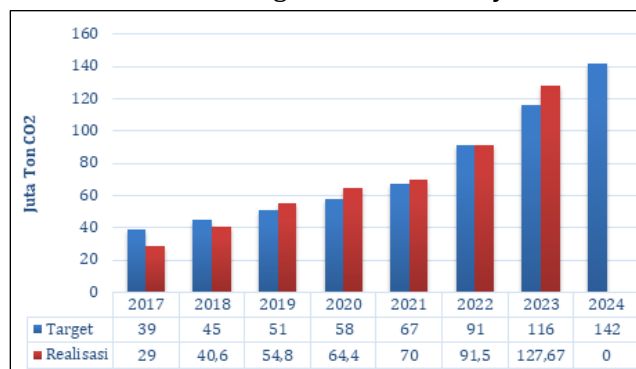
PENDAHULUAN

Isu dalam penyelesaian perubahan iklim menjadi penting setelah pelaksanaan Paris Agreement pada tahun 2015. Paris Agreement, yang disetujui oleh hampir 200 negara, yang diadopsi oleh hampir 200 negara, menetapkan tujuan global untuk menahan kenaikan suhu rata-rata di bawah 2 derajat Celsius dibandingkan dengan tingkat sebelum industri dan berusaha untuk membatasi kenaikan ini hingga 1,5 derajat Celsius. Kesepakatan ini menyoroti perlunya tindakan kolektif untuk menurunkan emisi GRK, memperkuat ketahanan terhadap efek perubahan iklim, dan menyediakan dukungan finansial bagi negara-negara berkembang untuk beralih ke energi bersih dan memperkuat kapasitas ketahanan mereka terhadap perubahan iklim.

Pada bulan Juni 2023, planet ini mencatat suhu rata-rata permukaan global tertinggi dan cakupan es laut global terendah dalam 174 tahun (NOAA, 2023). Panas terus berlanjut sepanjang tahun 2023, dengan setiap bulan dari Juni hingga Desember tercatat sebagai bulan terpanas (NOAA NCEI, 2024). Hal yang menjadi perhatian adalah dalam kaitannya dengan pengurangan emisi dari GRK. Penurunan ini diperlukan untuk mengurangi dampak buruk dari pemanasan global, seperti peningkatan suhu rata-rata global, mencairnya es di kutub, dan perubahan pola cuaca ekstrem yang berpotensi menghasilkan bencana alam yang lebih parah.

Sejalan dengan upaya implementasi SDGs secara efektif, dekarbonisasi adalah bagian dari 6 (enam) pilar transformasi untuk mencapainya (Sachs et, al., 2019). Berbagai upaya untuk menurunkan emisi GRK dilakukan pada berbagai sektor termasuk energi. Tidak hanya diambil dan dilaksanakan oleh pemerintah, tetapi juga melibatkan berbagai unsur masyarakat. Hal ini terlihat dalam grafik 1 berikut, sebagaimana pada 5 tahun belakangan, memperlihatkan pengurangan emisi pada sektor energi yang mengalami peningkatan. Tahun 2018, realisasi pengurangan emisi CO₂ tercatat hingga 40,6 juta ton, sedangkan pada tahun 2023 mengalami peningkatan lebih dari 3 kali lipat hingga mencapai realisasi sebesar 127,67 juta ton. Peningkatan ini mencerminkan kemajuan signifikan dalam usaha mengurangi emisi GRK dan dekarbonisasi serta menunjukkan efektivitas berbagai kebijakan dan inisiatif dalam sektor energi (Sachs et, al., 2019).

Gambar 1 Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca
Sumber: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM)



Upaya untuk menurunkan emisi ini melibatkan berbagai strategi, termasuk peningkatan efisiensi energi, transisi ke sumber energi terbarukan, dan penerapan teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS). Dalam implementasi regulasi, penangkapan dan penyimpanan karbon ini diamanatkan melalui Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 2 Tahun 2023 tentang Penyelenggaraan Penangkapan dan Penyimpanan Karbon, serta Penangkapan, Pemanfaatan dan Penyimpanan Karbon pada Kegiatan Usaha Hulu Minyak dan Gas Bumi. CCS di Indonesia sebagai upaya untuk mengurangi Emisi GRK melibatkan penangkapan Emisi Karbon dan/atau pengangkutannya, serta penyimpanan yang aman dan permanen ke dalam Zona Target Injeksi, mengikuti prinsip-prinsip teknik yang tepat. Sesuai dengan pasal 6 pada regulasi tersebut, penyelenggaraan CCS ini dilakukan melalui penginjeksian serta penyimpanan dari emisi karbon Wilayah Kerja. Sesuai Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 14 Tahun 2024 tentang Penyelenggaraan Kegiatan Penangkapan dan Penyimpanan Karbon, pelaksanaan CCS merupakan bagian dari operasi perminyakan yang dilakukan berdasarkan Kontrak Kerja Sama, yang dapat berupa kontrak bagi hasil dengan mekanisme pengembalian biaya operasi, kontrak bagi hasil gross split, atau jenis kontrak Kerja Sama lainnya. Namun sebelumnya, penyelenggaraan CCS ini didahului dengan kegiatan penangkapan Emisi Karbon dan/atau pengangkutan Emisi Karbon.

Tabel 1 Penyelenggaraan Penangkapan dan Penyimpanan Carbon

Sumber: Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 2 Tahun 2023

| Penyelenggaraan CCS | Penjelasan |
|---------------------|--|
| Penangkapan | merupakan emisi karbon yang berasal dari kegiatan usaha hulu minyak dan gas bumi |
| | penangkapan emisi karbon berupa karbon dioksida dapat berasal dari atmosfer dengan menggunakan teknologi <i>direct air capture</i> |
| Pengangkutan | dilakukan menggunakan pipa, truk, pengapalan, cara lain sesuai perkembangan |
| Penginjeksian | injeksi ke zona target |
| Penyimpanan | reservoir pada lapangan migas |
| | reservoir migas non-konvensional |
| | akuifer asin |
| | lapisan batubara |

Dalam penyelenggaraan CCS, terdapat berbagai barang dan peralatan yang digunakan secara langsung untuk pelaksanaan kegiatan. Barang dan peralatan ini merupakan bagian penting dari kegiatan eksplorasi dan produksi minyak dan gas bumi, yang kemudian menjadi aset milik negara. Selain itu, barang dan peralatan tersebut mencakup teknologi penangkapan karbon, infrastruktur pengangkutan, serta fasilitas penyimpanan yang diperlukan untuk memastikan proses CCS berjalan efektif dan efisien.

Pentingnya pengelolaan barang dan peralatan ini tidak bisa diabaikan, karena mereka berperan dalam mendukung upaya mitigasi perubahan iklim melalui pengurangan emisi karbon. Hal ini selaras dengan regulasi pengelolaan Barang Milik Negara yang diamanatkan dalam Peraturan Menteri Keuangan Nomor 140/PMK.06/2020 Tahun 2020 tentang

Pengelolaan Barang Milik Negara Hulu Minyak dan Gas Bumi. Peraturan ini memberikan pedoman mengenai pengelolaan aset negara yang terkait dengan kegiatan hulu minyak dan gas bumi, termasuk dalam konteks CCS.

Regulasi ini kiranya menjadi pondasi yang memastikan bahwa barang dan peralatan yang berasal dari pengelolaan hulu minyak dan gas bumi dikelola dengan baik, transparan, dan akuntabel, termasuk jika kedepannya akan dimanfaatkan untuk proyek CCS. Dengan demikian, barang dan peralatan tersebut dapat dimanfaatkan secara optimal untuk mendukung tujuan nasional dalam mengurangi emisi gas rumah kaca. Integrasi antara pelaksanaan CCS dan pengelolaan Barang Milik Negara ini juga menunjukkan komitmen pemerintah dalam memastikan bahwa seluruh sumber daya dan aset negara digunakan untuk tujuan yang berkelanjutan dan memberikan manfaat bagi generasi mendatang. Dengan adanya regulasi yang jelas dan pengelolaan yang tepat, diharapkan pelaksanaan CCS di Indonesia dapat berjalan lancar dan memberikan kontribusi signifikan dalam upaya global untuk mengatasi perubahan iklim.

Tulisan ini bertujuan untuk membahas sejauh mana kontribusi pengelolaan Barang Milik Negara yang berkaitan dengan penerapan CCS dan prospek aplikasinya di masa depan dan tantangan dalam aplikasinya. Dalam tulisan ini dijelaskan terlebih dahulu tentang penerapan CCS di berbagai Negara dan bagaimana regulasi eksisting dapat memberikan ruang untuk peningkatan penyelenggaraan CCS tersebut bagi Indonesia.

METODE PENELITIAN

Metode yang diterapkan dalam melaksanakan penelitian ini adalah metode kualitatif. Dalam operasionalisasinya, dilakukan teknik penelitian studi literatur dengan tahapan sebagai berikut :

1. Mengumpulkan Berbagai Studi Kepustakaan

Dilakukan melalui proses pengumpulan atas kebutuhan berbagai studi yang relevan dengan topik penelitian yang disusun. Pencarian literatur secara sistematis menggunakan database akademik dan berbagai regulasi terkait. Populasi yang diambil meliputi semua sumber literatur yang terkait dengan topik yang diteliti, termasuk artikel jurnal, buku, laporan, disertasi, serta berbagai sumber lain. Literatur yang kami kumpulkan meliputi tinjauan tentang teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS) serta potensi penggunaannya di Indonesia dalam kaitannya dengan pengelolaan Barang Milik Negara Hulu Migas. Sumber literatur yang kami jadikan referensi meliputi rentang tahun 2005 hingga 2024. Penelitian yang kami lakukan memiliki fokus utama pada perkembangan dan kebijakan terbaru. Sumber-sumber yang digunakan meliputi peraturan pemerintah, korespondensi data dengan pemangku kepentingan, penelitian akademis, laporan industri, dan berita. Sumber literatur ini merupakan penghubung dalam penyelesaian tujuan penelitian ini.

2. Pemeriksaan Data Pada Studi Kepustakaan

Setelah hasil pengumpulan studi kepustakaan telah diperoleh, dilakukan pemeriksaan data untuk dilakukan validasi, pengecekan kelengkapan, kesesuaian dan keterbaruan

data. Hal ini diselaraskan dengan hasil studi kepustakaan yang telah dilakukan sebagaimana pada tahapan awal.

Selanjutnya, untuk mendukung metode penelitian tersebut, penelitian ini menerapkan kerangka pemikiran sebagaimana berikut:

1. Pengumpulan Data dan Informasi

Pada tulisan ini, data dan informasi yang harus didapatkan dilakukan pereduksian, perangkuman, dan fokus pada kebutuhan penelitian yang dilakukan. Secara teknis, penulis melakukan mengembangkan instrumen pengumpulan data, diantaranya dengan membuat daftar cek atau matriks data yang bertujuan untuk mencatat informasi penting dari setiap sumber.

2. Penyajian Data dan Informasi

Pada tahapan ini, hasil perolehan data dan informasi dari teknik pengumpulan data dan informasi, akan disajikan sebagai acuan untuk menjelaskan tujuan yang akan dicapai pada penelitian ini.

3. Analisis Hasil dan Kesimpulan

Di tahapan akhir ini, hasil yang diperoleh akan dianalisis dan dituangkan dalam sebuah kesimpulan akhir.

Gambar 2 Bagan Kerangka Berpikir



Hasil ini akan memberikan gambaran menyeluruh tentang topik penelitian, serta mengidentifikasi gap penelitian dan area yang memerlukan penelitian lanjutan. Temuan dan kesimpulan ini menjawab tujuan penelitian yang telah ditetapkan oleh penulis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

CCS melibatkan teknologi pemisahan karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan oleh sektor industri dan transportasi, kemudian mengalirkannya ke lokasi yang telah ditentukan untuk penyimpanan (Wilberforce et al., 2021). CCS berkaitan dengan penggunaan teknologi yang dapat dikategorikan atas tiga proses teknologi utama, yaitu penangkapan, transportasi, dan penyimpanan.

Pada teknologi penangkapan, meliputi teknologi penangkapan pasca-pembakaran dan teknologi penangkapan pra-pembakaran (Wilberforce et al., 2019; López et al., 2018) serta teknologi pembakaran oksigen (Wilberforce et al., 2019). Teknologi penangkapan ini dapat terlihat sebagaimana pada Tabel 2.

Tabel 2 Teknologi Penangkapan Pasca-Pembakaran dan Teknologi Penangkapan Pra-Pembakaran

| Teknologi penangkapan | Dilakukan dengan | Keterangan |
|--|---------------------------|---|
| Penangkapan Pasca-Pembakaran (<i>post-combustion approach</i>) | Pelarut Berbasis Amine | Pelarut seperti monoethanolamine (MEA) digunakan untuk menangkap CO ₂ dari gas buang setelah pembakaran (Koorneef, et al., 2008) |
| | Sorben Padat | Material yang dapat menyerap CO ₂ , seperti karbon aktif dan kerangka logam-organik (MOFs) (A.E. Creamer, B. Gao., 2016). |
| Penangkapan Pra-Pembakaran (<i>pre combustion approach</i>) | Gasifikasi | Mengubah bahan bakar fosil menjadi campuran hidrogen dan CO ₂ . Proses ini memisahkan CO ₂ sebelum pembakaran (Wilberforce et al., 2021). |
| | Reaksi Pergeseran Gas Air | Mengubah karbon monoksida (CO) dan air menjadi CO ₂ dan hydrogen (H), yang kemudian ditangkap (Van Selow et al., 2009) |
| Pembakaran Oksigen (<i>Oxy-combustion approach</i>) | Pembakaran Oksigen Murni | Membakar bahan bakar dalam oksigen murni, menghasilkan gas buang yang sebagian besar adalah CO ₂ dan uap air, sehingga lebih mudah untuk menangkap CO ₂ (Kunze, C. Et, al., 2012) |

Pada teknologi transportasi dilakukan dengan berbagai bentuk diantaranya melalui pipa, melalui pengangkutan laut dengan kapal, maupun melalui pengangkutan darat dengan truk. Penggunaan pipa untuk transportasi merupakan metode yang paling umum untuk mengangkut CO₂ yang ditangkap dari lokasi penangkapan ke lokasi penyimpanan. Pada penggunaan pipa ini, CO₂ diangkut sebagai cairan superkritis untuk memaksimalkan efisiensi. Adapun untuk penggunaan kapal maupun truk dalam transpostasi, dilakukan untuk pengangkutan CO₂ dalam jarak yang lebih jauh di mana pipa tidak memungkinkan.

Metode transportasi dengan menggunakan moda transportasi berupa kapal dan truk ini lebih fleksibel, namun relatif lebih mahal dibandingkan pipa.

Untuk teknologi penyimpanan, maka terdapat beberapa aspek yang merupakan hal penting, diantaranya aspek penyimpanan geologis, karbonisasi mineral, pemulihan minyak yang ditingkatkan, dan pemanfaatan industri. Dalam tulisan ini, hal yang berkaitan erat dengan teknologi penyimpanan adalah penyimpanan geologis yang meliputi Ladang Minyak dan Gas yang Telah Habis untuk menyimpan gas CO₂, teknologi penyimpanan akuifer garam dalam, teknologi penyimpanan formasi batuan berpori yang terisi dengan air asin yang dapat menyimpan CO₂ dan teknologi penyimpanan formasi basalt, dimana CO₂ bereaksi dengan basalt untuk membentuk mineral karbonat yang stabil.

Teknologi-teknologi ini terus berkembang, dan penelitian yang sedang berlangsung bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, mengurangi biaya, dan meminimalkan dampak lingkungan. Menggabungkan teknologi-teknologi ini secara efektif sangat penting untuk mencapai pengurangan emisi CO₂ yang signifikan dan memerangi perubahan iklim.

Dalam perkembangannya, telah dilakukan berbagai upaya penelitian dan pengembangan yang signifikan untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi biaya teknologi CCS. Di berbagai Negara, pelaksanaan kegiatan CCS memperlihatkan kemajuan di tingkat global (Martin et al., 2021). Pada tulisan ini, penulis merangkum beberapa implemtnasi pelaksanaan CCS pada Negara Norwegia, China, Australia, Brazil, dan Uni Emirat Arab.

Di Negara Norwegia, terdapat proyek penyimpanan CO₂ Equinor Sleipner, yang dioperasikan oleh Equinor (sebelumnya dikenal sebagai Statoil). Proyek ini merupakan salah satu inisiatif CCS terlama dan paling sukses di dunia. Berlokasi di Laut Utara, proyek ini telah beroperasi sejak tahun 1996. Teknologi dan metode utama yang digunakan di Sleipner diantaranya dengan pemilahan CO₂ dengan teknologi Solven amina untuk menyerap CO₂ dari gas alam (Sharon Sjostrom, Holly Krutka., 2009). Selanjutnya, CO₂ yang diserap tersebut kemudian dipisahkan dari solven menggunakan panas, yang menghasilkan aliran CO₂ terkonsentrasi yang siap untuk disimpan. Kompresi menggunakan kompresor bertekanan tinggi digunakan untuk menekan CO₂ hingga sekitar 100 bar, mengubahnya menjadi cairan padat sehingga memudahkan transportasi dan penyimpanan yang efisien. Transportasi CO₂ yang dikompresi diangkut melalui pipa dari platform lepas pantai ke lokasi injeksi.

Selain proyek penyimpanan CO₂ Equinor Sleipner, di Norwegia juga terdapat Proyek penyimpanan Snøhvit, yang dikelola oleh Statoil, terletak di arah timur-barat di cekungan Hammerfest di Laut Barents, sekitar 150 km di utara pantai Norwegia. Di fasilitas pemrosesan darat (Melkøya), CO₂ dipisahkan dari gas produksi dan kemudian dikirim kembali ke ladang gas lepas pantai melalui pipa sepanjang 150 km untuk disuntikkan ke formasi saline yang berdekatan dengan ladang gas tersebut. Dari April 2008 hingga April 2011, sebanyak 1,09 juta ton CO₂ telah berhasil disuntikkan ke dalam Formasi Tubåen (Buscheck, et al., 2016).

Untuk kawasan Asia, China merupakan salah satu Negara yang telah mengimplementasikan kegiatan CCS. Diantaranya adalah CNOOC Enping yang mulai beroperasi sejak tahun 2023 dan menjadi bagian pendukung dari pengembangan ladang minyak Enping. Lokasi CCS ini terletak di Cekungan Muara Sungai Mutiara, sekitar 190 km barat daya Hong Kong. Proyek ini dapat menyimpan lebih dari 1,5 juta ton karbon dioksida, setara dengan menanam hampir 14 juta pohon (CNOOC Limited, 2023). Pada Tabel 3, juga terdapat beberapa kegiatan CCS lain yang berlokasi di Negara China sebagai berikut.

Tabel 3 Kegiatan CCS di Cina
Sumber: Global CCS Institute (2023)

| Fasilitas | Mulai Beroperasi | Industri | Kapasitas (Mtpa CO ₂) | Facility storage code |
|--|------------------|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| China National Energy Guohua Jinjie | 2021 | Power Generation and Heat | 0.15 | Dedicated Geological Storage |
| Yangchang Yulin CO ₂ -EOR | 2022 | Chemical | 0.3 | Dedicated Geological Storage |
| CNOOC Enping | 2023 | Natural Gas Processing | 0.3 | Dedicated Geological Storage |
| Yanchang Integrated Demonstration | 2012 | Chemical | 0.05 | Enhanced Oil Recovery |
| Xinjiang Dunhua Karamay | 2015 | Chemical | 0.1 | Enhanced Oil Recovery |
| CNPC Jilin Oil Field | 2018 | Natural Gas Processing | 0.6 | Enhanced Oil Recovery |
| Sinopec Nanjing Chemical | 2021 | Chemical | 0.2 | Enhanced Oil Recovery |
| Yangchang Yan'an CO ₂ -EOR | 2021 | Chemical | 0.1 | Enhanced Oil Recovery |
| Sinopec Qilu-Shengli | 2022 | Chemical | 1 | Enhanced Oil Recovery |
| China National Energy Taizhou | 2023 | Power Generation and Heat | 0.5 | Enhanced Oil Recovery |
| Sinopec Jinling Petrochemical (Nanjing Refinery) | 2023 | Oil Refining | 0.3 | Enhanced Oil Recovery |

Di kawasan Australia, penyelenggaraan CCS dilakukan oleh Chevron Australia Pty Ltd (Chevron), sebagai operator atas nama peserta usaha patungan Gorgon. Kegiatan ini dilakukan sejak 2003, dengan persetujuan proyek pada tahun 2009. Setidaknya, sebanyak 17 sumur telah dibor, fasilitas pipa dan kompresi telah dibangun dan dipasang, data pemantauan baseline telah diperoleh, dan operasi injeksi telah dimulai. Sistem Injeksi CO₂ Gorgon diperkirakan memiliki masa pakai lebih dari 40 tahun dan resmi beroperasi pada tahun 2019 (Trupp et al., 2021). Menurut Global CCS Institute (2023), fasilitas ini memiliki kapasitas CO₂ sebesar 4 MTPA.

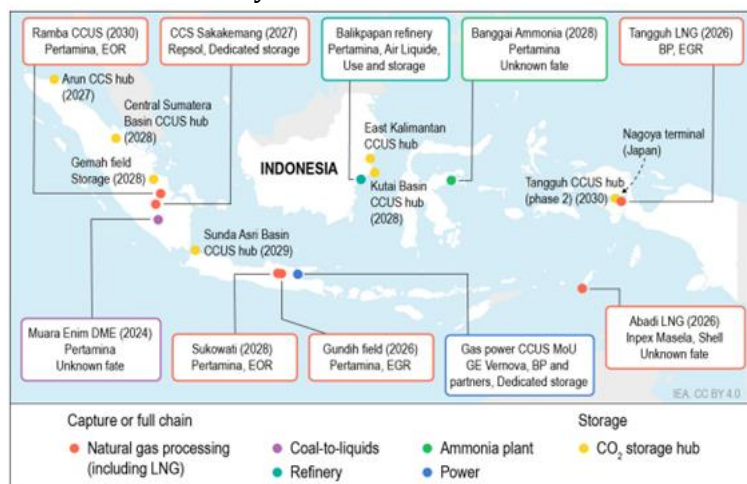
Di Negara Brazil, dengan lokasi di bagian *pre-salt* di Cekungan Santos pada perairan lepas pantai Brasil merupakan salah satu penemuan minyak bumi lepas pantai terbesar di dunia dalam dua puluh tahun terakhir (Carminatti et al., 2008; Beltrao et al., 2009; Chakhmakhchev and Rushworth, 2010; Jones and Chaves, 2011, 2015; Arbouille et al., 2013; Petersohn, 2019; Abelha and Petersohn, 2019; Souza et al., 2022). Meskipun memiliki minyak berkualitas baik, konsentrasi CO₂ di sana lebih tinggi. PETROBRAS memutuskan untuk tidak melepaskan CO₂ yang dihasilkan di lapisan Pre-salt ke atmosfer, sehingga

skenario injeksi CO₂ dianggap sebagai alternatif potensial untuk meningkatkan perolehan minyak (Melo et al., 2011). Ladang-ladang Pre-salt di Cekungan Santos adalah reservoir besar karbonat minyak dan gas alam yang terletak di bawah lapisan garam tebal, yang di beberapa area bisa mencapai ketebalan hingga 2 km, sehingga dianggap sebagai segel yang sempurna. Ladang ini berlokasi sekitar 290 km dari pantai Rio de Janeiro di tenggara Brasil dan berada pada kedalaman antara 5 hingga 7 km di bawah permukaan laut, dengan kedalaman air yang dapat melebihi 2 km (Formigli et al., 2009). Menurut Global CCS Institute (2023), fasilitas ini memiliki kapasitas CO₂ sebesar 10,6 MTPA.

Di Uni Emirat Arab, ADNOC berhasil mengimplementasikan CCUS pada tahun 2016 melalui pengoperasian Al Reyadah, proyek CCUS pertama di dunia dalam industri besi dan baja, sekaligus proyek CCUS komersial pertama di Timur Tengah untuk peningkatan perolehan minyak (CO₂ -EOR) (Sheikh, 2021). Pada tahun 2012, Al Reyadah didirikan untuk mengembangkan fasilitas dan pipa yang kini beroperasi. Ini merupakan langkah awal dari keseluruhan target berbagai sumber CO₂ yang ada di Abu Dhabi yang dihubungkan melalui jaringan pipa untuk memenuhi kebutuhan CO₂ untuk kegiatan EOR, menyimpan CO₂, dan mengurangi jejak karbon di UAE (Sheikh, 2021). Menurut Global CCS Institute (2023), fasilitas ini memiliki kapasitas CO₂ sebesar 0,8 MTPA.

Dikutip dari Adiwardhana (2023), total dari potensi CCS/CCUS di Indonesia pada rentang tahun 2030 - 2035 akan menyentuh sekitar 25,5 – 68,2 juta ton CO₂ dan saat ini terdapat 15 proyek yang sedang dalam tahap studi dan tahap persiapan, dengan perkiraan sebelum tahun 2023 terdapat sebanyak 8 proyek yang akan onstream. Sesuai laporan Global CCS Institute pada November 2023, ada 3 fasilitas CCS yang masuk ke daftar tersebut dengan status pengembangan lanjut dan pengembangan awal adalah PAU Central Sulawesi Clean Ammonia (2 MTPA), Repsol Sakakemang (2 MTPA), BP Tangguh (3 MTPA), Pertamina Sukowati (1.4 MTPA), Carbon Aceh Arun Hub (1.5 MTPA), ExxonMobil Indonesia Regional Storage Hub (Under Evaluation), dan Pertamina Jatibarang (*Under Evaluation*). Semua fasilitas tersebut terafiliasi dengan sektor minyak dan gas.

Gambar 2 Proyek CCUS di Indonesia Tahun 2023



Aspek pengelolaan Barang Milik Negara (BMN) erat kaitannya dengan penyelenggaraan CCS adalah pengelolaan BMN Hulu Migas. Hal ini relevan dengan regulasi pada Peraturan Menteri Keuangan Nomor 140/PMK.06/2020 tentang Pengelolaan BMN Hulu Minyak dan Gas Bumi. Pada regulasi tersebut, secara tekstual menjelaskan objek BMN Hulu Minyak dan Gas Bumi merupakan barang yang berasal dari pelaksanaan Kontrak Kerja Sama antara Kontraktor dengan Pemerintah. Sumber BMN ini juga meliputi barang yang bersumber dari Kontrak Karya/ *Contract of Work* (CoW) dalam menjalankan kegiatan usaha hulu minyak dan gas bumi.

Adapun ruang lingkup yang diatur pada regulasi tersebut termasuk tanah, harta benda modal, harta benda inventaris, material persediaan, limbah sisa produksi dan limbah sisa operasi. Keseluruhan ruang lingkup ini mengikuti siklus pengelolaan BMN hulu minyak dan gas bumi, yang diawali dari perencanaan kebutuhan dan penganggaran hingga penghapusan aset. Dari ruang lingkup tersebut, yang secara spesifik dilakukan pembahasan pada tulisan ini adalah dari sisi pengelolaan BMN hulu minyak dan gas bumi yang dilakukan penyerahan kepada Pemerintah, Pemanfaatan dan Penilaian BMN Hulu Minyak dan Gas Bumi.

1. Penyerahan kepada Pemerintah

Penyerahan BMN Hulu Migas kepada Pemerintah dilakukan karena salah satu dari 4 hal berikut, antara lain jangka waktu Kontrak Kerja Sama berakhir, Kontrak Kerja Sama diakhiri oleh Pemerintah, BMN Hulu Migas diperlukan oleh Pemerintah dalam rangka pelaksanaan Proyek Strategis Nasional dan BMN Hulu Migas tidak digunakan oleh kontraktor. Aset yang telah diserahkan kepada Pemerintah ini dicatat pada Laporan Keuangan Bendahara Umum Negara (LK-BUN). Sebagaimana LK-BUN tahun 2022 yang telah diaudit oleh Badan Pemeriksa Keuangan, asset KKKS per 31 Desember 2022 sebagai berikut

Tabel 4 Aset yang Telah Diserahkan kepada Pemerintah
Sumber : LK BUN Tahun 2022

| No | Aset KKKS | per 31 Desember 2022 |
|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | UAKPA BMN Hulu Migas DJKN | Rp8.148.384.448,- |
| 2 | UAKPA BMN Hulu Migas PPBMN | Rp5.725.853.761,- |
| 3 | UAKPA BMN Hulu Migas SKK Migas | Rp586.653.132.958.891,- |
| 4 | UAKPA BMN Hulu Migas BPMA | Rp13.955.186.333.525,- |
| Saldo Akhir 31 Desember 2022 | | Rp600.622.193.530.625,- |

Pada DJKN, aset sebagaimana pada Tabel 4 merupakan himpunan dari BMN Hulu Migas yang telah diserahkan kepada Menteri Keuangan sebagai Pengelola Barang. Sumber ini berasal dari 3 KKKS Terminasi. Objek pertama berlokasi di Provinsi Sumatera Selatan berdasarkan Berita Acara Serah Terima Barang Milik Negara Berupa Tanah yang Berasal dari Kontraktor Kontrak Kerja Sama Wilayah Kerja Sekayu (Kementerian ESDM kepada Kementerian Keuangan) Nomor 0023.BA/92/SJA.4/2019 dan Nomor BA-4/KN.4/2019 tanggal 17 Mei 2019. Objek kedua diperoleh sebagaimana Berita Acara Serah Terima Barang Milik Negara Berupa Tanah yang Berasal dari Kontraktor Kontrak

Kerja Sama Wilayah Kerja West Belida (Kementerian ESDM kepada Kementerian Keuangan) Nomor 0024.BA/92/SJA.4/2019 dan Nomor BA-5/KN.4/2019 tanggal 17 Mei 2019. Adapun objek ketiga berasal sebagaimana Berita Acara Serah Terima Barang Milik Negara Berupa Tanah yang Berasal dari Kontraktor Kontrak Kerja Sama Wilayah Kerja Citarum (Kementerian ESDM kepada Kementerian Keuangan) Nomor 16.BA/92/SJA.4/2020 dan Nomor BA-1/KN.4/2020 tanggal 29 Juli 2020.

2. Pemanfaatan BMN Hulu Migas

Secara regulasi, pemanfaatan didefinisikan sebagai bentuk pendayagunaan BMN Hulu Migas yang belum atau tidak digunakan secara optimal. Pendayagunaan ini dilakukan dengan tidak mengubah status kepemilikan. Beberapa bentuk pemanfaatan ini dapat dilakukan terhadap objek yang berada pada Kontraktor ataupun pada Pengguna Barang. Pertimbangan pemanfaatan atas objek pada kontraktor adalah untuk optimalisasi dalam penyelenggaraan kegiatan usaha hulu minyak dan gas bumi. Sedangkan beberapa pertimbangan pemanfaatan pada Pengguna Barang diantaranya untuk meningkatkan penerimaan Negara, ataupun sebagai bentuk pencegahan penggunaan BMN Hulu Migas secara tidak sah oleh Pihak Lain.

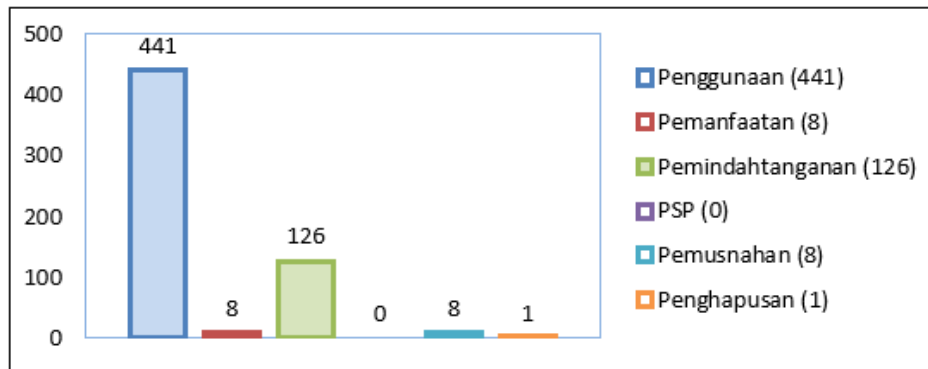
Sebagai catatan, objek yang dimanfaatkan dilakukan atas tanah dan/atau Harta Benda Modal dengan pertimbangan bahwa tanah dan/atau HBM belum atau tidak optimal digunakan dalam penyelenggaraan kegiatan usaha hulu migas. Dan keseluruhan objek yang dimanfaatkan oleh pihak lain ini merupakan objek yang dilarang untuk dipindahtangankan dan/atau digadaikan maupun dijadikan objek jaminan. Jika diilustrasikan dalam bentuk tabel, maka sesuai Peraturan Menteri Keuangan Nomor 140/PMK.06/2020 tentang Pengelolaan BMN Hulu Minyak dan Gas Bumi, pemanfaatan BMN Hulu Minyak dan Gas Bumi dapat disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5 Bentuk Pengelolaan BMN Hulu Minyak dan Gas Bumi

| | Bentuk | Oleh | Jangka Waktu | Persetujuan |
|--------------------------------|--------------|-------------------|---|------------------|
| Yang berada di kontraktor | Sewa | Pihak Lain | 10 (sepuluh) tahun dan dapat diperpanjang | Pengelola Barang |
| | Pinjam Pakai | Pemerintah Daerah | 5 (lima) tahun dan dapat diperpanjang | Pengelola Barang |
| Yang berada di Pengguna Barang | Sewa | Pihak Lainnya | 10 (sepuluh) tahun dan dapat diperpanjang | Pengelola Barang |
| | Pinjam Pakai | Pemerintah Daerah | 5 (lima) tahun dan dapat diperpanjang | Pengelola Barang |

Sepanjang tahun 2022, terdapat berbagai persetujuan yang telah diberikan oleh Kementerian Keuangan. Persetujuan pengelolaan BMN Hulu Migas ini dalam bentuk penggunaan, pemanfaatan, pemindahtanganan, pemusnahan dan penghapusan.

Gambar 3 Frekuensi Kegiatan Pengelolaan BMN Hulu Migas



3. Penilaian BMN Hulu Migas

Salah satu rangkaian pengelolaan BMN Hulu Migas adalah dengan melakukan penilaian. Penilaian BMN Hulu Migas berpedoman pada Peraturan Menteri Keuangan Nomor 173/PMK.06/2020 tentang Penilaian oleh Penilai Pemerintah di Lingkungan DJKN. Dengan memperhatikan Gambar 2, terlihat bahwa kegiatan yang penting untuk dilakukan penilaian adalah untuk siklus pemanfaatan dan pemindahtanganan.

Dari hasil analisis diatas, maka diketahui terdapat hubungan antara penerapan teknologi CCS dengan pengelolaan BMN, secara khusus pada aspek atas KKKS yang berada pada lingkup yang sudah dilakukan penyerahan ke Pengelola Barang, Pemanfaatan BMN dan Penilaian BMN. Adapun objek yang memiliki keterkaitan dengan penyelenggaraan CCS di antaranya berupa tanah yang sudah tidak digunakan, sumur yang sudah tidak digunakan, dan pipa untuk melakukan injeksi ke lokasi yang akan dituju.

Tantangan pada implementasi CCS dengan objek berupa BMN Hulu Migas adalah urgensi pemahaman terhadap potensi BMN Hulu Migas serta perlunya memberikan kemudahan kepada calon mitra dalam penyelenggaraan CCS di Indonesia. Namun, dengan semakin banyaknya penyelenggaraan CCS, baik yang dilakukan di dalam negeri maupun di luar negeri, maka peran penting BMN Hulu Migas akan semakin berdampak sebagai salah satu katalisator dalam penanganan perubahan iklim. Regulasi eksisting yang tersedia dapat menjadi garis dasar awal untuk pengembangan teknis dalam siklus pengelolaan BMN Hulu Migas, baik dari Penyerahan kepada Pemerintah, Pemanfaatan BMN dan Penilaian BMN.

KESIMPULAN

Meskipun terdapat banyak Barang Milik Negara yang berasal dari hulu minyak dan gas bumi, masih belum terlihat secara signifikan kontribusi pengelolaan Barang Milik Negara dalam implementasi CCS, termasuk aplikasi dan tantangan di masa depan. Namun demikian, dengan berbagai proyek global yang sukses, termasuk di Norwegia, China, Australia, Brasil, dan Uni Emirat Arab, memperlihatkan pentingnya kontribusi CCS sebagai sebuah upaya global dalam mengatasi perubahan iklim. Hal ini akan menjadi pertimbangan bagi Pemerintah untuk kemudahan dalam penyelenggaraan implementasi CCS.

Selain itu, perlu integrasi antara regulasi pengelolaan BMN dan implementasi CCS. Penyusunan regulasi agar dilakukan menyeluruh secara lintas sektoral dan meliputi pembahasan teknis untuk penerapan teknologi, termasuk dengan melibatkan akademisi. Aspek ini penting untuk memastikan bahwa BMN yang terkait dengan CCS, seperti infrastruktur dan sumber daya alam, dikelola dengan cara yang mendukung tujuan mitigasi emisi dalam mengurangi CO₂ dari sektor industri dan energi.

Kesimpulan dari penelitian ini menekankan bahwa untuk memajukan bidang ini, diperlukan penguatan kolaborasi antara sektor publik dan swasta, serta dukungan kebijakan yang mendukung pengembangan dan penerapan CCS. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi inovasi dalam teknologi CCS, evaluasi biaya-efektivitas, dan penilaian dampak lingkungan yang lebih mendalam. Saran untuk penelitian di masa depan termasuk:

1. Pengembangan Teknologi Baru

Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengidentifikasi dan mengembangkan teknologi CCS yang lebih efisien dan ekonomis. Ini termasuk inovasi dalam metode penangkapan karbon, penyimpanan, dan transportasi.

2. Studi Kasus Lokal

Penelitian kasus spesifik di berbagai lokasi di Indonesia untuk menilai potensi CCS dan tantangan yang dihadapi. Ini akan membantu dalam perencanaan implementasi yang lebih efektif dan disesuaikan dengan kondisi lokal.

3. Pengelolaan BMN

Penelitian tentang pengelolaan BMN dalam konteks CCS untuk memastikan bahwa aset negara yang terkait dengan teknologi ini dimanfaatkan secara optimal dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bendahara Umum Negara. (2022). Laporan Keuangan Bendahara Umum Negara (LK-BUN) tahun 2022. Diaudit oleh Badan Pemeriksa Keuangan.
- Buscheck, T. A., White, J. A., Carroll, S. A., Bielicki, J. M., & Aines, R. D. (2016). Managing geologic CO₂ storage with pre-injection brine production: A strategy evaluated with a model of CO₂ injection at Snøhvit. *Energy & Environmental Science*, 9(5), 1504–1515. <https://doi.org/10.1039/C6EE00388A>
- CNBC (2022, 12 April) Stripe teams up with major tech companies to commit \$925 million toward carbon capture, Diakses pada 11 Juni 2024, dari (<https://www.cnbc.com/2022/04/12/stripe-alphabet-meta-shopify-mckinsey-spur-carbon-capture-market.html#:~:text=Clean%20Tech-,Stripe%20teams%20up%20with%20major%20tech%20companies,%24925%20million%20toward%20carbon%20capture&text=Stripe%2C%20Alphabet%2C%20Meta%2C%20Shopify%20and%20McKinsey%20are%20trying%20to,the%20market%20for%20carbon%20capture.>)
- CNBC (2022, 28 Juni) Why Big Tech Is Pouring Money Into Carbon Removal, Diakses pada 11 Juni 2024, dari (<https://www.youtube.com/watch?v=dRvkOFdfW7k>)

- CNOOC Limited. (2023, 1 Juni). CNOOC Limited Announces China's First Offshore CCS Demonstration Project Commissioned. Diakses pada 1 Juli 2024, dari (https://www.cnooltd.com/art/2023/6/1/art_55171_15339041.html)
- Creamer, A. E., & Gao, B. (2016). Carbon-based adsorbents for postcombustion CO₂ capture: A critical review. *Environmental Science & Technology*, 50(14), 7276-7289. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00627>
- Ditjen Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi. (2023). Laporan Kinerja Ditjen EBTKE 2023.
- Formigli, J. M., Capeleiro Pinto, A. C., & Almeida, A. S. (2009, May). Santos Basin's pre-salt reservoirs development: The way ahead. In *Offshore Technology Conference* (pp. OTC-19953). OTC.
- Global CCS Institute CCS Talks: All you need to know about CO₂ Storage. (2020, 17 April). ses pada 10 Juni 2024. Dari (https://www.youtube.com/watch?v=nGoeXOUID_U&t=1509s)
- Global CCS Institute. (2023). Global status of CCS 2023: Scaling up through 2030. https://res.cloudinary.com/dbtfcnfij/images/v1700717007/Global-Status-of-CCS-Report-Update-23-Nov/Global-Status-of-CCS-Report-Update-23-Nov.pdf?_i=AA
- Global CCS Institute. (n.d.). What is CCS? <https://www.globalccsinstitute.com/why-ccs/what-is-ccs/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2005). Carbon dioxide capture and storage: IPCC special report. Cambridge University Press.
- International Energy Agency (IEA). (2013). Technology roadmap: Carbon capture and storage. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-carbon-capture-and-storage-2013>
- International Energy Agency (IEA). (2023). Carbon capture, utilisation and storage in Indonesia. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/e4db0b4f-4169-40f7-9cf2-1003bae7a962/CarbonCapture%2CUtilisationandStorageinIndonesia-Policybrief.pdf>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral & Kementerian Keuangan. (2019). Berita Acara Serah Terima Barang Milik Negara Berupa Tanah yang Berasal dari Kontraktor Kontrak Kerja Sama Wilayah Kerja Sekayu (Nomor 0023.BA/92/SJA.4/2019 dan Nomor BA-4/KN.4/2019, 17 Mei 2019).
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral & Kementerian Keuangan. (2019). Berita Acara Serah Terima Barang Milik Negara Berupa Tanah yang Berasal dari Kontraktor Kontrak Kerja Sama Wilayah Kerja West Belida (Nomor 0024.BA/92/SJA.4/2019 dan Nomor BA-5/KN.4/2019, 17 Mei 2019).
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral & Kementerian Keuangan. (2020). Berita Acara Serah Terima Barang Milik Negara Berupa Tanah yang Berasal dari Kontraktor Kontrak Kerja Sama Wilayah Kerja Citarum (Nomor 16.BA/92/SJA.4/2020 dan Nomor BA-1/KN.4/2020, 29 Juli 2020).
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2023). Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 2 Tahun 2023 tentang Penyelenggaraan Penangkapan dan Penyimpanan Karbon, serta Penangkapan, Pemanfaatan dan Penyimpanan Karbon pada Kegiatan Usaha Hulu Minyak dan Gas Bumi.

-
- Kementerian Keuangan. (2020). Peraturan Menteri Keuangan Nomor 140/PMK.06/2020 Tahun 2020 tentang Pengelolaan Barang Milik Negara Hulu Minyak dan Gas Bumi.
- Kementerian Keuangan. (2020). Peraturan Menteri Keuangan Nomor 173/PMK.06/2020 tentang Penilaian oleh Penilai Pemerintah di Lingkungan DJKN.
- Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian Republik Indonesia (2022, 25 Oktober) Akselerasi Net Zero Emissions, Indonesia Deklarasikan Target Terbaru Penurunan Emisi Karbon, Akselerasi Net Zero Emissions, Indonesia Deklarasikan Target Terbaru Penurunan Emisi Karbon, Diakses pada 10 Juni 2024, dari (<https://ekon.go.id/publikasi/detail/4652/akselerasi-net-zero-emissions-indonesia-deklarasikan-target-terbaru-penurunan-emisi-karbon#:~:text=Indonesia%20memiliki%20komitmen%20untuk%20mencapai,ini%20mendeklarasikan%20target%20penurunan%20emisi>)
- Koornneef, J., van Keulen, T., Faaij, A., & Turkenburg, W. (2008). Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO₂. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2(4), 448-467. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.06.008>
- Kunze, C., & Spliethoff, H. (2012). Assessment of oxy-fuel, pre- and post-combustion-based carbon capture for future IGCC plants. *Applied Energy*, 94, 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.013>
- López, R., Díaz, M. J., & González-Pérez, J. A. (2018). Extra CO₂ sequestration following reutilization of biomass ash. *Science of The Total Environment*, 625, 1013-1020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.263>
- Martin-Roberts, E., Scott, V., Flude, S., Johnson, G., Haszeldine, R. S., & Gilfillan, S. (2021). Carbon capture and storage at the end of a lost decade. *One Earth*, 4(12), 1569-1584. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.11.006>
- Melo, C. L., Thedy, E. A., Rocha, P. S., Almeida, A. S., & Musse, A. P. (2011). The challenges on the CCGS monitoring in the development of Santos Basin pre-salt cluster. *Energy Procedia*, 4, 3394-3398. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.286>
- NOAA NCEI. (2024). Monthly Global Climate Report for Annual 2023. Diakses pada 11 Juni 2024, dari (<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthlyreport/global/202313>)
- NOAA. (2023, August 14). Record shattering: Earth had its hottest July in 174 years. Diakses pada 11 Juni 2024, dari (<https://www.noaa.gov/news/record-shattering-earth-had-its-hottest-july-in-174-years>)
- Nussbaumer, P., Schreck, B., Bazilian, M., Monga, P., Ploutakhina, M., De Coninck, H., Mikunda, T., Gielen, D. J., Trudeau, N., Heidug, W., Lipponen, J., Remme, U., Tam, C., & Finkenrath, M. (2011). Carbon capture and storage in industrial applications: Technology roadmap. The Netherlands: International Energy Agency
- Pemerintah Pusat Republik Indonesia. (2023). Laporan Keuangan Pemerintah Pusat (LKPP) Tahun 2023: Audited. Jakarta: Pemerintah Pusat Republik Indonesia. https://djpb.kemenkeu.go.id/portal/images/LKPP/LKPP_Tahun_2023_audited_plu_s_opini.pdf
- Putra, B. P., & Kiono, B. F. T. (2021). Mengenal enhanced oil recovery (EOR) sebagai solusi meningkatkan produksi minyak Indonesia. *Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, 2(2), 84-100.

- Republik Indonesia. (2024). Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 14 Tahun 2024 tentang Penyelenggaraan Kegiatan Penangkapan dan Penyimpanan Karbon.
- Sachs, J. D., Schmidt-Traub, G., Mazzucato, M., Messner, D., Nakicenovic, N., & Rockström, J. (2019). Six transformations to achieve the sustainable development goals. *Nature Sustainability*, 2(9), 805–814. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0352-9>
- Sjostrom, S., & Krutka, H. (2010). Evaluation of solid sorbents as a retrofit technology for CO₂ capture. *Fuel*, 89(6), 1298–1306. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.11.019>
- SKK Migas. (2015). Pedoman Tata Kerja Tentang Peningkatan Recovery Factor Melalui Kegiatan Pilot Tertiary Recovery.
- Souza, I. V. A. F., Ellis, G. S., Ferreira, A. A., Guzzo, J. V. P., Díaz, R. A., Albuquerque, A. L. S., & Amrani, A. (2022). Geochemical characterization of natural gases in the pre-salt section of the Santos Basin (Brazil) focused on hydrocarbons and volatile organic sulfur compounds. *Marine and Petroleum Geology*, 144, 105763. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105763>
- Trupp, M., Ryan, S., Barranco Mendoza, I., Leon, D., & Scoby-Smith, L. (2021). Developing the world's largest CO₂ injection system – A history of the Gorgon carbon dioxide injection system. *Proceedings of the 15th Greenhouse Gas Control Technologies Conference* (pp. 15–18).
- U.S. Department of Energy. (2022). Carbon capture, transport, & storage supply chain deep dive assessment. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/Carbon%20Capture%20Supply%20Chain%20Report%20-%20Final.pdf>
- Van Selow, E. R., Cobden, P. D., Verbraeken, P. A., Hufton, J. R., & Van Den Brink, R. W. (2009). Carbon capture by sorption-enhanced water-gas shift reaction process using hydrotalcite-based material. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(9), 4184–4193. <https://doi.org/10.1021/ie801713a>
- Wilberforce, T., Baroutaji, A., Soudan, B., Al-Alami, A. H., & Olabi, A. G. (2019). Outlook of carbon capture technology and challenges. *Science of The Total Environment*, 657, 56-72. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.424>
- Wilberforce, T., Tabbi, M., Olabi, A. G., Sayed, E. T., Elsaid, K., & Abdelkareem, M. A. (2021). Progress in carbon capture technologies. *Science of The Total Environment*, 761, 143203. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143203>
- Wilberforce, T., Tabbi, M., Olabi, A. G., Sayed, E. T., Elsaid, K., & Abdelkareem, M. A. (2021). Progress in carbon capture technologies. *Science of The Total Environment*, 761, 143203. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143203>