



PEMETAAN POTENSI CARBON CAPTURE AND STORAGE PADA INDUSTRI PETROKIMIA DI INDONESIA

Penulis:

Brian Tony

Firdaus AL Hakim

Steven Chandra

Suranto

Damar Nandiwardhana

Puji Hartoyo

Dessy Apriyanti

Kesuma Ardhana Oerika

LPPM UPN "VETERAN" YOGYAKARTA

2024

Pemetaan Potensi *Carbon Capture and Storage* Pada Industri Petrokimia Di Indonesia

Penulis :

Brian Tony

Firdaus Al Hakim

Steven Chandra

Suranto

Damar Nandiwardhana

Puji Hartoyo

Dessy Apriyanti

Kesuma Ardhana Oerika

Hak cipta dilindungi oleh undang-undang

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam, atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis

Desain Sampul dan Editing:

Penerbit LPPM UPN Veteran Yogyakarta

Cetakan Pertama, 2024

ISBN: 978 623 389 312 1

ISBN 978-623-389-312-1



Diterbitkan oleh:

Penerbit LPPM UPN Veteran Yogyakarta

Jl. Padjajaran 104 (Lingkar Utara), Condongcatur,

Yogyakarta, 55283

Telp. (0274) 486188,486733, Fax. (0274) 486400

Dicetak Oleh:

Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat,

UPN Veteran Yogyakarta

Jl. Padjajaran 104 (Lingkar Utara), Condongcatur,

Yogyakarta, 55283

Telp. (0274) 486188,486733, Fax. (0274) 486400

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga kegiatan dengan buku **Pemetaan Potensi *Carbon Capture and Storage* Pada Industri Petrokimia di Indonesia** telah selesai dilaksanakan.

Buku ini ini disusun dalam rangka membantu kalangan akademik dan dunia industri dalam memahami dan mencakup informasi tentang Potensi Carbon Capture and Storage Pada Industri Petrokimia di Indonesia.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan buku ini. Kekurangan yang ada akan menjadi cambuk untuk melaksanakan perbaikan dalam penulisan buku kegiatan yang lebih baik di masa yang akan datang. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat bagi sivitsas akademika, dosen, mahasiswa dan masyarakat di masa sekarang maupun yang akan datang.

Hormat Kami

Tim Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
BAB I PENDAHULUAN	1
BAB II CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS)	6
BAB III CO ₂ SOURCE SECTOR MAP INDONESIA	27
BAB IV POTENSIAL SINKS OF CO ₂	52
DAFTAR PUSTAKA	61

BAB I PENDAHULUAN

Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) merupakan komponen penting dalam mengurangi emisi karbon dioksida (CO₂) di atmosfer. Proses ini melibatkan tiga langkah pokok, yaitu menangkap, mengangkut, dan menyimpan CO₂. Formasi geologis, seperti saline aquifer, salt formation, cekungan shale, reservoir minyak dan gas, atau lapisan batu bara, dapat bertindak sebagai penyimpanan bawah tanah untuk CO₂ yang ditangkap melalui skema Carbon Capture and Storage (CCS). Alternatifnya, CO₂ yang ditangkap dapat dimanfaatkan untuk membuat produk yang memberikan manfaat lingkungan, ekonomi, dan sosial sebelum disimpan melalui Carbon Capture and Utilization (CCU) (Chauvy et al., 2022).

Implementasi CCS dan CCUS memberikan cara untuk meredam dampak perubahan iklim dengan mengurangi jumlah pelepasan CO₂ ke atmosfer dari industri (Zhang et al., 2020). Menurut temuan terbaru Global CCS Institute (2021), pembentukan klaster Hub dari bisnis CCS/CCUS di mana banyak pemangku kepentingan baik di

sektor storage maupun source terlibat, dapat menghasilkan penghematan biaya yang substansial.

Secara khusus, klaster semacam itu menawarkan optimalisasi ekonomi, terutama dalam hal pengeluaran modal untuk fasilitas permukaan seperti alat kompresi, serta dalam pembangunan pipa untuk mengangkut aliran CO₂ dari sumber ke tempat penyimpanan terdekat. Pendekatan berbasis klaster ini menyoroti pentingnya jarak antara sumber dan penyimpanan untuk mencapai implementasi CCUS yang efisien dan berbiaya efektif.

Untuk menerapkan pendekatan ini, diperlukan lokasi geografis dan hubungan antara sumber CO₂ dan penyimpanan CO₂. Keselarasan optimal antara keduanya harus dicapai dengan memahami lebih baik hubungan spasial antara sumber CO₂ dan penyimpanan CO₂, serta infrastruktur yang menghubungkan pusat tersebut. Dengan memanfaatkan pendekatan ini, para investor dapat memahami lebih baik aspek lokasi jika mereka ingin menyuntikkan emisi CO₂ tinggi mereka ke penyimpanan.

Skala lapangan pencocokan sumber-sink untuk pengembangan CCUS di Sumatera Selatan telah dilakukan dalam konsep serupa oleh Usman et al. (2021). Beberapa studi Pencocokan Sumber-Sink CO₂ telah dilakukan dalam beberapa tahun terakhir untuk mempromosikan pengembangan CCS dan CCUS. Zhu et al. (2019) melakukan studi yang berfokus pada mengidentifikasi kesesuaian spasial optimal dengan penekanan khusus pada pertimbangan biaya transportasi dari sumber CO₂ signifikan dan kandidat potensial situs penyimpanan geologis CO₂ di Provinsi Jiangsu, China. Model pengurangan karbon dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap berbahan bakar batu bara juga diusulkan di China berdasarkan pencocokan Sumber-Sink CO₂ (Fan et al., 2021).

Hubungan geografis antara sumber CO₂ dan penyimpanan juga dipelajari di Taiwan (Chauvy et al., 2022), dengan mempertimbangkan magnitudo sumber CO₂ dan kapasitas penyimpanan serta karakteristik permukaan lainnya. Sun et al., (2021) melakukan studi kasus di Spanyol yang menerapkan analisis multi-kriteria dalam pendekatan kluster untuk mengidentifikasi situs CCS yang menarik

secara ekonomi dan tersebar, sehingga mengurangi biaya pengembangan. Saat ini terdapat keterbatasan studi Sumber-Sink secara global karena tidak ada data terperinci, sehingga hanya studi skala lokal dan regional yang tersedia meskipun tata letak skema global CCS telah diusulkan oleh Wei et al., (2021).

Saat ini database produksi migas milik pemerintah Indonesia dapat dijadikan dasar pengembangan gagasan tersebut. Klasifikasi sumber CO₂ dan CO₂-penyerap serta produksi inkremental minyak dan gas dapat ditentukan dan diestimasi dengan menggunakan beberapa pendekatan yang telah dipublikasikan di beberapa makalah bereputasi baik, seperti Taber et. Al (1997), Al-Adasani & Bai (2011), dan masih banyak lagi. Dalam penelitian ini, sumber CO₂ yang akan diteliti adalah berupa Industri Petrokimia seperti pabrik pupuk dan pabrik ammonia.

Setiap data akan diintegrasikan ke sistem yang sudah ada. Kami berencana untuk menggunakan perangkat lunak Geographical Information System (GIS) untuk membangun sistem ini. Dari waktu ke waktu, data akan ditambah, dan sistem akan dimodifikasi berdasarkan

ketersediaan data. Data seperti right of ways (ROW) untuk menggambarkan jalur pipa yang ada juga akan diintegrasikan ke dalam sistem. Pada akhirnya, sistem dapat menunjukkan gambaran pengelolaan hub-clustering CO₂ di Indonesia dan peluang bisnis yang dapat dibangun berdasarkan situasi saat ini di masing-masing wilayah.

BAB II CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS)

Komponen teknologi carbon capture and storage (CCS) sudah terbukti dan digunakan di berbagai industri dan aplikasi. Sementara ini paling jelas terjadi pada gas alam pemrosesan, teknologi CCS juga telah berhasil diterapkan pada proyek termasuk produksi hidrogen, pembuatan pupuk, dan produksi gas alam sintetis.

Dalam beberapa kasus, fasilitas industri individu dapat menangkap jutaan ton karbon dioksida (CO_2) setiap tahun. CCS sudah menjadi solusi yang berharga dan terbukti untuk mengurangi emisi pada jenis sumber berskala besar. Namun, banyak pabrik industri beroperasi pada skala yang jauh lebih kecil, dan sebagai hasilnya emisi keseluruhan yang lebih rendah. Sedangkan gabungan tingkat emisi dari sejumlah skala tersebut lebih kecil fasilitas dapat menjadi signifikan, mungkin tidak ekonomis untuk setiap fasilitas untuk mempertimbangkan penerapannya rantai CCS penuh yang mencakup penangkapan, kompresi, pengangkutan, dan penyimpanan permanen CO_2 .

Salah satu solusi untuk masalah ini adalah pengelompokan, di mana beberapa fasilitas industri berbagi infrastruktur CCS dan pengetahuan, dan dengan demikian mengurangi biaya mereka dibandingkan dengan masing-masing fasilitas berusaha untuk secara individual mengurangi emisi. Pengelompokan akan membuat jaringan penghasil emisi yang lebih kecil, dan memusatkan bagian-bagiannya dari infrastruktur CCS yang digunakan bersama oleh semua kontributor individu.

Secara singkat CCS (Carbon Capture and Storage) adalah teknologi yang digunakan untuk menangkap dan menyimpan karbon dioksida (CO₂) dari sumber emisi besar, seperti pabrik pembangkit listrik dan fasilitas industri, sehingga tidak dilepaskan ke atmosfer. Teknologi ini dianggap sebagai salah satu cara utama untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan mengatasi perubahan iklim. Berikut adalah penjelasan lengkap mengenai CCS:

Konsep klaster industri sangat penting di bidang pembangunan ekonomi dan geografi ekonomi. Klaster industri adalah konsentrasi geografis dari bisnis, pemasok,

dan lembaga terkait yang saling berhubungan dalam bidang tertentu. Klaster dapat muncul karena berbagai kepentingan, termasuk kedekatan dengan bahan baku, opsi transportasi seperti pelabuhan, pasokan tenaga kerja, dan pasar. Untuk CCS, gagasan klaster memanfaatkan fakta bahwa di seluruh dunia, banyak fasilitas intensif emisi (baik industri maupun listrik) terletak di lokasi geografis. Cluster ini bisa berada di sekitar pasokan energi, fasilitas pembangkit listrik, atau pelabuhan. Hal ini memberikan peluang bagi penghasil emisi CO₂ yang terletak relatif dekat satu sama lain untuk bergabung bersama membentuk 'capture cluster', yang terhubung ke situs penyimpanan CO₂ skala besar menggunakan infrastruktur bersama yang berukuran strategis (besar). Dalam konteks ini, infrastruktur disebut 'kebesaran' jika terlalu besar untuk kebutuhan satu pengguna, tetapi cocok untuk kebutuhan banyak pengguna. Biaya saluran pipa, kemungkinan fasilitas kompresi, dan aktivitas terkait seperti konsultasi masyarakat, persetujuan pemerintah, negosiasi dengan pemilik properti. Untuk perusahaan kecil, keuntungan dari menemukan di kluster termasuk mengakses skala ekonomi biasanya saja tersedia untuk perusahaan besar,

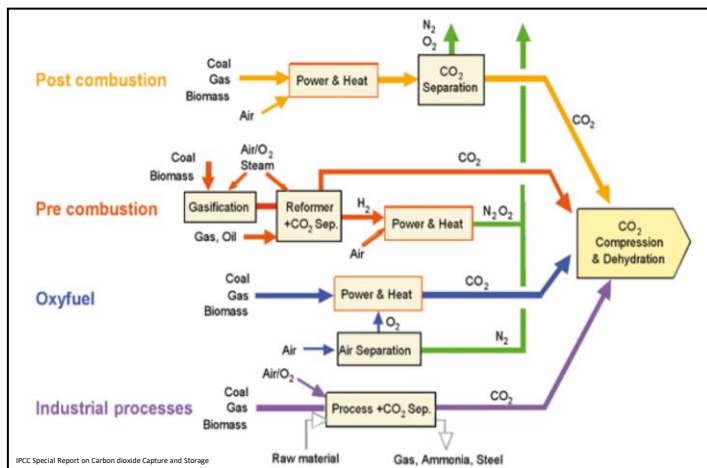
setelah siap akses ke kumpulan tenaga kerja terampil, dekat dengan pemasok dan/atau pelanggan, dan mampu dengan mudah mengakses jaringan informasi dan seterusnya, dapat dikurangi berdasarkan per pengguna jika biayanya dibagi atau hanya dibelanjakan satu kali daripada beberapa kali.

Ada juga 'cluster penyimpanan', di mana CO₂ didistribusikan di antara kelompok yang berbeda, tetapi cukup dekat, lokasi penyimpanan geologis dan/atau ladang minyak yang cocok untuk peningkatan perolehan minyak (EOR). Kluster penghasil emisi industri juga sering ditempatkan bersama dengan fasilitas pembangkit listrik yang dapat merupakan sumber emisi yang besar.

Hub CCS adalah titik pengumpulan atau distribusi sentral untuk CO₂. Satu hub akan melayani pengumpulan CO₂ dari klaster penangkapan atau distribusi CO₂ ke klaster penyimpanan. Hub dapat ditempatkan di ujung tangkapan atau ujung penyimpanan pipa multi-pengguna (forming capture/collection or storage hubs), atau keduanya. Hub sangat umum di industri distribusi gas alam, di mana jaringan pipa saling terhubung untuk menyatukan gas dari berbagai

bidang produksi, atau untuk mendistribusikan gas ke pasar yang tersebar. Di Amerika Utara, misalnya, terdapat hub gas alam yang menyediakan interkoneksi hingga 16 jalur pipa utama dan hub gas alam juga tersebar luas di Eropa. Ada juga hub yang ada di industri distribusi pipa CO₂, terutama Denver City dan McCamey Hubs di Texas, AS. Sebagian besar CO₂ yang diangkut melalui sistem jalur pipa AS digunakan dalam operasi enhanced oil recovery (EOR).

Penangkapan CO₂



Gambar 1. Penangkapan CO₂

Tahap pertama dalam proses CCS adalah penangkapan CO₂ dari sumber emisi. Ada beberapa metode yang digunakan untuk menangkap CO₂, antara lain:

a. ***Post-Combustion Capture:***

CO₂ ditangkap setelah bahan bakar dibakar. Biasanya, gas buang dari pembakaran diolah dengan pelarut kimia yang dapat menyerap CO₂. Metode ini menangkap CO₂ setelah proses pembakaran bahan bakar. Gas buang yang dihasilkan dari pembakaran biasanya mengandung CO₂ yang harus dipisahkan dari gas lainnya seperti nitrogen, uap air, dan beberapa senyawa lainnya.

1. Proses

○ Absorpsi Kimia

CO₂ dalam gas buang dihubungkan dengan pelarut kimia, biasanya amina seperti monoethanolamine (MEA), yang memiliki kemampuan untuk menyerap CO₂. Gas buang dialirkan melalui kolom absorpsi di mana pelarut menyerap CO₂.

- Desorpsi

Setelah CO_2 terserap, larutan yang kaya CO_2 dipanaskan dalam kolom desorpsi untuk melepaskan CO_2 dari pelarut. CO_2 yang terlepas kemudian dikumpulkan dan dimurnikan.

- Regenerasi Pelarut

Pelarut yang telah melepas CO_2 kemudian didinginkan dan dikembalikan ke kolom absorpsi untuk digunakan kembali.

2. Keuntungan

- Dapat diterapkan pada pembangkit listrik dan fasilitas industri yang sudah ada tanpa memerlukan perubahan besar pada proses pembakaran.
- Teknologi ini sudah cukup berkembang dan banyak digunakan di berbagai industri.

3. Kekurangan

- Prosesnya memerlukan energi tambahan, yang dapat mengurangi efisiensi keseluruhan dari pembangkit listrik.
- Pelarut kimia dapat terdegradasi seiring waktu dan memerlukan penggantian.

b. Pre-Combustion Capture

Bahan bakar diubah menjadi campuran gas sebelum dibakar, biasanya melalui gasifikasi. CO₂ kemudian dipisahkan dari gas campuran ini sebelum pembakaran terjadi.

1. Proses

- Gasifikasi
Bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak, atau gas alam diubah menjadi gas sintesis (syngas) yang terdiri dari hidrogen (H₂) dan karbon monoksida (CO) melalui reaksi dengan oksigen atau uap.

- Shift Reaction

Gas sintesis kemudian diolah dalam reaktor shift di mana CO bereaksi dengan uap air untuk menghasilkan CO_2 dan H_2 (reaksi shift gas-air).

- Pemurnian

CO_2 dipisahkan dari H_2 menggunakan teknologi seperti absorpsi fisik atau kimia, atau membran pemisahan. H_2 yang dihasilkan dapat digunakan sebagai bahan bakar bersih.

2. Keuntungan

- Memungkinkan pemisahan CO_2 dalam bentuk yang lebih terkonsentrasi dan tekanan yang lebih tinggi, yang dapat mengurangi biaya transportasi dan penyimpanan.
- Dapat menghasilkan hidrogen, yang dapat digunakan sebagai bahan bakar bersih.

3. Kekurangan

- Memerlukan perubahan signifikan pada proses pembangkit listrik atau fasilitas industri yang ada.
- Biaya investasi awal yang tinggi.

c. *Oxy-Fuel Combustion*

Bahan bakar dibakar dalam oksigen murni, menghasilkan gas buang yang sebagian besar terdiri dari CO₂ dan uap air, yang kemudian dapat dengan mudah dipisahkan.

1. Proses

- Pembakaran

Bahan bakar dibakar dalam oksigen murni. Karena oksigen murni digunakan, nitrogen (yang biasanya ada dalam udara) tidak ada dalam gas buang, sehingga menghasilkan gas buang yang terdiri dari CO₂ dan uap air.

- Pemurnian

Uap air dalam gas buang mudah dikondensasi dengan pendinginan, meninggalkan CO₂

murni yang kemudian dapat dikompresi dan disimpan.

2. Keuntungan

- Gas buang yang dihasilkan sangat kaya CO₂, sehingga proses pemisahan menjadi lebih sederhana dan lebih murah.
- Dapat diterapkan pada berbagai jenis bahan bakar.

3. Kekurangan

- Produksi oksigen murni memerlukan banyak energi (biasanya melalui proses kriogenik), yang dapat meningkatkan biaya operasional.
- Teknologi ini masih dalam tahap pengembangan dan belum banyak diimplementasikan secara komersial.

Tabel I. Perbedaan Metode

Metode	Proses Utama	Keuntungan	Kekurangan
<i>Post-Combustion Capture</i>	Absorpsi dan desorpsi menggunakan pelarut kimia	Mudah diterapkan pada fasilitas yang ada	Memerlukan energi tambahan, pelarut bisa terdegradasi
<i>Pre-Combustion Capture</i>	Gasifikasi, reaksi shift, pemurnian CO ₂ dari gas sintesis	Konsentrasi CO ₂ tinggi, menghasilkan hidrogen	Biaya investasi awal tinggi, perubahan signifikan diperlukan
<i>Oxy-Fuel Combustion</i>	Pembakaran dalam oksigen murni, kondensasi uap air dari gas buang	Pemisahan CO ₂ lebih sederhana dan murah	Produksi oksigen murni mahal, teknologi masih dalam pengembangan

Tipe Teknologi Penangkapan CO₂

Pada sistem penangkapan CO₂ menggunakan banyak teknologi untuk pemisahan gas. Berikut prinsip dasar atau teknologi yang umumnya digunakan dalam pemisahan CO₂:

- **Pemisahan Dengan Sorbent/Solvent**

Pemisahan dilakukan dengan melewati gas yang mengandung CO₂ dalam suatu sistem yang mengandung liquid absorbent atau solid sorbent sehingga terjadi kontak dan terjadi proses penyerapan CO₂. Absorbent yang sudah jenuh dengan CO₂ akan dialirkan ke vessel yang berbeda dan akan dipanaskan hingga mencapai kondisi tekanan tertentu yang mengakibatkan terjadinya proses regenerasi (pelepasan CO₂). Absorbent yang sudah tidak jenuh lagi dengan CO₂ digunakan kembali untuk menangkap lebih banyak CO₂ pada proses Cylic.

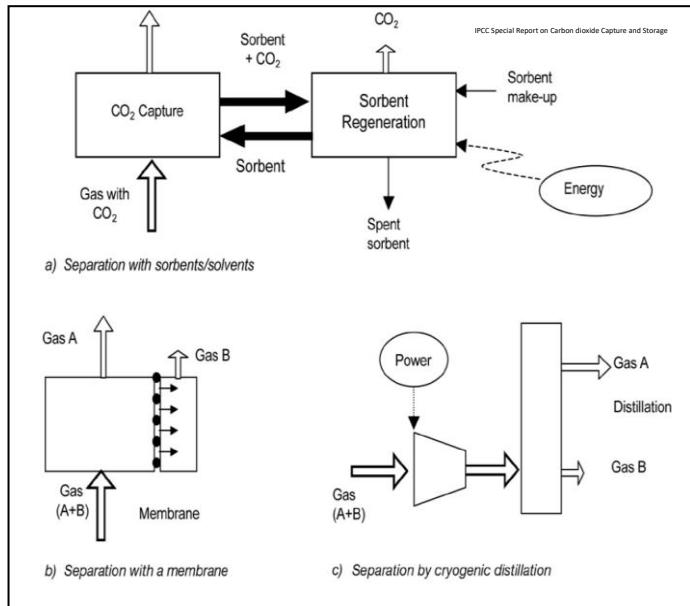
- **Pemisahan Dengan Membran**

Membran adalah bahan yang dibuat secara khusus yang memungkinkan gas-gas tertentu dapat melewatinya. Selektivitas membran pada setiap gas berbeda dan sangat bergantung dengan material alami penyusun gas tersebut namun aliran gas melalui membran dipengaruhi juga oleh perbedaan tekanan diantara dua sisinya. Oleh karena itu, aliran yang bertekanan tinggi sangat cocok untuk proses pemisahan membran. Terdapat beberapa tipe material membran yang digunakan (polymeric, metallic, ceramic) yang umumnya digunakan dalam sistem penangkapan CO₂ untuk memisahkan H₂ dari aliran bahan bakar gas, CO₂ dari jangkauan process stream atau O₂ dari udara dengan O₂ yang dipisahkan kemudian membantu menghasilkan aliran CO₂ yang sangat murni.

Saat ini di industri, proses pemisahan CO₂ dari gas alam belum diterapkan dalam skala besar karena membutuhkan kondisi yang kompleks namun harus menahan pengeluaran sekecil mungkin. Upaya R&D di seluruh dunia sedang berlangsung yang ditujukan untuk pembuatan bahan membran yang lebih cocok untuk penangkapan CO₂ agar bisa diaplikasikan pada skala yang lebih besar.

- **Pemisahan dengan *Cyrogenic Distillation***

Gas dapat dibuat menjadi liquid dengan serangkaian langkah kompresi, pendinginan, dan langkah-langkah ekspansi. Setelah dalam bentuk liquid, komponen-komponen gas dapat dipisahkan dalam kolom distilasi. Saat ini proses pemisahan ini seringkali digunakan pada skala besar.



Gambar 2. Proses Pemisahan dengan *Cryogenic Distillation*

Teknologi penangkapan CO₂ ini terus berkembang seiring dengan penelitian dan inovasi yang dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya, sehingga dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam mengurangi emisi gas rumah kaca.

Transportasi CO₂

Setelah CO₂ ditangkap, CO₂ tersebut harus diangkut ke lokasi penyimpanan. CO₂ diangkut dalam tiga keadaan yaitu gas, liquid, dan padatan. Metode transportasi yang paling umum adalah melalui jaringan pipa. Namun, CO₂ juga bisa diangkut menggunakan kapal atau truk untuk jarak yang lebih pendek atau lokasi yang lebih terpencil.

Gas yang diangkut mendekati tekanan atmosfer menempati volume yang sangat besar sehingga dibutuhkan juga fasilitas yang sangat besar. Gas menempati volume yang lebih kecil jika dikompresi dan gas terkompresi diangkut dengan jaringan pipa. Volume gas dapat dikecilkan lebih lanjut dengan cara liquefaction, solidification atau hydration.

Liquefaction adalah teknologi yang diciptakan untuk transportasi gas melalui kapal sebagai LPG (liquified petroleum gas) dan LNG (liquified natural gas). Teknologi dan ilmu yang sudah ada ini dapat ditransfer dan digunakan dalam proses pengangkutan CO₂ cair.

Solidification membutuhkan lebih banyak usaha dibandingkan dengan opsi lain dan kurang baik bila ditinjau dari sisi ekonomi dan energi.

Masing-masing teknologi ini layak digunakan secara komersial dan saat ini digunakan untuk mengangkut karbon dioksida.

Penelitian dan pengembangan sistem pengangkutan natural gas hydrate yang dimaksudkan untuk menggantikan sistem LNG sering dipakai saat ini dan hasilnya diharapkan dapat digunakan pada kapal pengangkut CO₂ di masa depan

Penyimpanan CO₂

Tahap akhir dalam proses CCS adalah penyimpanan CO₂. CO₂ yang ditangkap biasanya disimpan di bawah tanah di formasi geologi yang cocok. Ada beberapa jenis lokasi penyimpanan yang digunakan, antara lain:

- Reservoir Minyak dan Gas yang Sudah Habis
CO₂ disuntikkan ke dalam reservoir minyak dan gas yang sudah tidak lagi menghasilkan minyak atau gas,

yang membantu mendorong sisa minyak atau gas keluar (Enhanced Oil Recovery - EOR).

- **Akuifer Salin Dalam**
Formasi batuan berpori yang berisi air asin, terletak pada kedalaman yang cukup dalam sehingga CO₂ dapat disimpan dengan aman.
- **Lapisan Batubara yang Tidak Dapat Ditambang**
CO₂ dapat disimpan dalam lapisan batubara yang tidak dapat ditambang, di mana CO₂ akan terserap oleh batubara dan terperangkap secara fisik.

Keamanan dan Pemantauan

Keamanan penyimpanan CO₂ adalah hal yang sangat penting. Pemantauan dan verifikasi terus menerus dilakukan untuk memastikan CO₂ tetap tersimpan dengan aman dan tidak bocor ke permukaan. Teknologi pemantauan yang digunakan meliputi:

- **Pemantauan Seismik**
Menggunakan gelombang seismik untuk mendeteksi pergerakan atau kebocoran CO₂ di bawah tanah.

- **Pemantauan Geokimia**
Mengukur perubahan kimia di air tanah untuk mendeteksi kebocoran CO₂.
- **Pemantauan Tekanan**
Mengukur tekanan di dalam formasi penyimpanan untuk memastikan CO₂ tetap stabil.

Manfaat CCS

- **Mengurangi Emisi CO₂**
CCS dapat mengurangi emisi CO₂ dari sumber besar, membantu mencapai target pengurangan emisi global.
- **Mendukung Transisi Energi**
CCS memungkinkan penggunaan bahan bakar fosil yang lebih bersih sementara transisi ke sumber energi terbarukan berlangsung.
- **Enhanced Oil Recovery (EOR)**
Penyuntikan CO₂ ke dalam reservoir minyak yang sudah habis dapat meningkatkan produksi minyak.

Tantangan CCS

- **Biaya Tinggi**

Teknologi CCS memerlukan investasi awal yang besar dan biaya operasional yang tinggi.

- **Keamanan Penyimpanan**

Memastikan CO₂ tetap tersimpan dengan aman dalam jangka panjang memerlukan teknologi pemantauan yang canggih.

- **Penerimaan Publik**

Ada kekhawatiran tentang keamanan penyimpanan CO₂ dan dampaknya terhadap lingkungan, yang memerlukan edukasi dan transparansi.

CCS adalah salah satu solusi penting untuk mengurangi emisi CO₂ dan mengatasi perubahan iklim, namun implementasinya memerlukan kolaborasi antara pemerintah, industri, dan masyarakat untuk mencapai keberhasilan jangka panjang.

BAB III CO₂ SOURCE SECTOR MAP INDONESIA

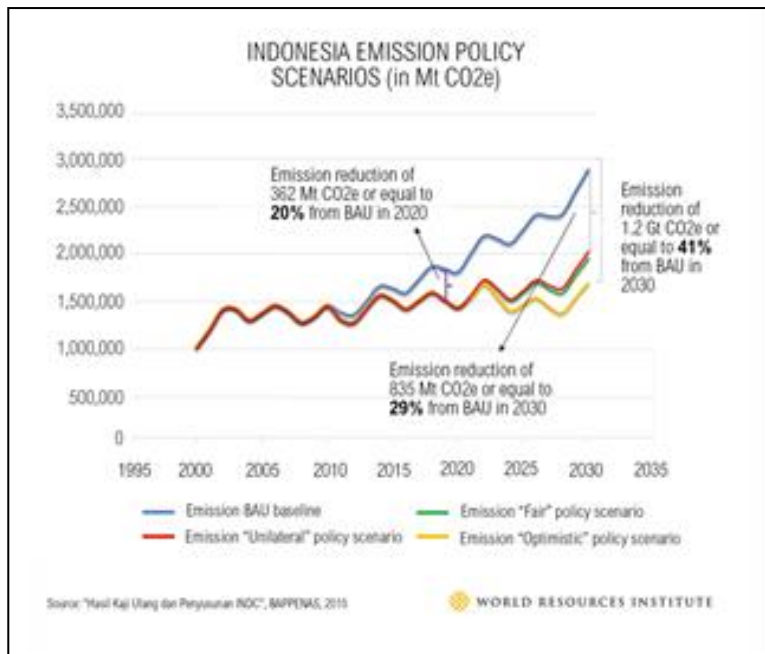
Gambaran Umum Emisi CO₂ di Indonesia

- **Statistik Emisi CO₂ Nasional**

Data statistik emisi CO₂ di Indonesia yang dikumpulkan dari berbagai sumber resmi seperti Badan Pusat Statistik (BPS) dan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). Data ini mencakup jumlah emisi CO₂ dari berbagai sektor seperti energi, transportasi, industri, pertanian, dan perumahan.

Grafik Emisi CO₂ Nasional

Grafik di bawah ini menunjukkan jumlah emisi CO₂ tahunan di Indonesia, dengan satuan metrik ton CO₂.



Grafik 1. Skenario Emisi Indonesia

- Tren Emisi CO₂ Selama Dekade Terakhir

Tren emisi karbon di Indonesia dari produksi energi sejak tahun 1965 hingga 2021. Berikut adalah penjelasan rinci mengenai tren yang terlihat pada grafik:



Grafik 2. Perubahan Emisi Karbon yang Dihasilkan
dari Produksi Energi Indonesia

Penjelasan Tren Emisi CO₂ dari Produksi Energi di Indonesia

✓ Periode 1965-1980:

Emisi karbon relatif stabil dengan sedikit peningkatan. Ini menunjukkan bahwa selama periode ini, penggunaan energi di Indonesia masih terbatas dan industri belum berkembang pesat.

✓ Periode 1980-2000:

Terjadi peningkatan signifikan dalam emisi karbon. Peningkatan ini seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan industrialisasi yang mulai meningkat di Indonesia. Pada periode ini, banyak pembangkit listrik dan industri yang mulai beroperasi dengan menggunakan bahan bakar fosil, terutama batu bara dan minyak.

✓ Periode 2000-2015:

Peningkatan emisi karbon terus berlanjut dengan laju yang lebih cepat. Hal ini disebabkan oleh peningkatan konsumsi energi akibat pertumbuhan populasi, urbanisasi, dan industrialisasi yang lebih intensif. Pembangunan infrastruktur besar-besaran dan peningkatan penggunaan kendaraan bermotor juga berkontribusi pada peningkatan emisi.

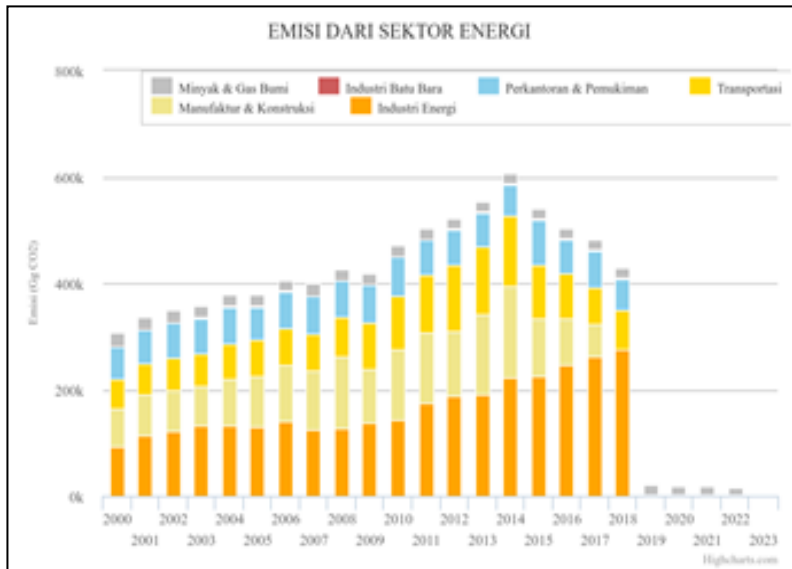
✓ Periode 2015-2019:

Puncak emisi karbon terlihat pada periode ini, dengan emisi mencapai lebih dari 600 juta ton CO₂ per tahun. Peningkatan pesat ini bisa dikaitkan dengan ekspansi industri energi, terutama pembangkit listrik berbasis batu bara, yang merupakan salah satu sumber utama emisi CO₂.

✓ Periode 2019-2021:

Terjadi sedikit penurunan atau stabilisasi emisi karbon. Penurunan ini mungkin disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk upaya pemerintah dalam mengurangi emisi melalui kebijakan energi terbarukan dan efisiensi energi, serta dampak pandemi COVID-19 yang mengurangi aktivitas industri dan transportasi.

Sektor Energi



Gambar 3. Emisi dari Sektor Energi

https://signsmart.menlhk.go.id/v2.1/app/chart/emisi_energy_p

- Emisi CO₂ dari Pembangkit Listrik

Pembangkit listrik adalah salah satu kontributor utama emisi CO₂ di Indonesia. Mayoritas pembangkit listrik di Indonesia masih menggunakan bahan bakar fosil, seperti batu bara, minyak, dan gas alam, yang menghasilkan emisi CO₂ dalam jumlah besar.

- Penggunaan Bahan Bakar Fosil

Bahan bakar fosil, seperti batu bara, minyak, dan gas alam, masih mendominasi sumber energi di Indonesia. Penggunaan bahan bakar ini berkontribusi besar terhadap emisi CO₂. Penggunaan batu bara, khususnya, memiliki intensitas karbon yang sangat tinggi dibandingkan dengan gas alam atau minyak.

- Potensi Energi Terbarukan

Indonesia memiliki potensi besar dalam pengembangan energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, hidro, dan bioenergi. Pemanfaatan sumber energi terbarukan dapat secara signifikan mengurangi emisi CO₂ dari sektor energi.

- Studi Kasus: PLTU vs. PLTA
 - a. PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap)
 - Emisi

PLTU menggunakan batu bara sebagai bahan bakar utama, yang menghasilkan emisi CO₂ sangat tinggi. Emisi dari PLTU mencakup tidak hanya CO₂, tetapi juga polutan lain seperti SO₂, NO_x, dan partikel.
 - Biaya

PLTU memiliki biaya operasional yang relatif rendah dibandingkan dengan beberapa jenis pembangkit lainnya. Namun, biaya lingkungan dan kesehatan akibat polusi udara juga tinggi.
 - Dampak Lingkungan

Selain emisi CO₂, PLTU berkontribusi terhadap polusi udara dan air serta menghasilkan limbah abu batu bara yang berbahaya.

b. PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air)

○ Emisi

PLTA hampir tidak menghasilkan emisi CO₂ selama operasi. Namun, emisi bisa terjadi selama konstruksi bendungan dan infrastruktur terkait.

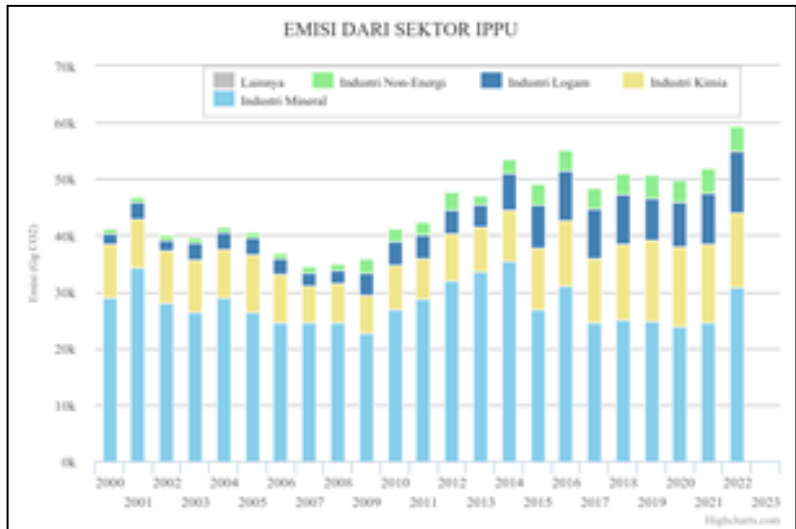
○ Biaya

PLTA memiliki biaya awal yang tinggi untuk pembangunan bendungan dan infrastruktur, tetapi biaya operasionalnya rendah dan cenderung stabil dalam jangka panjang.

○ Dampak Lingkungan

Meskipun PLTA tidak menghasilkan polusi udara, pembangunan bendungan dapat mengubah ekosistem lokal, mempengaruhi kehidupan akuatik, dan menyebabkan perpindahan penduduk.

Sektor Industri



Gambar 4. Emisi dari Sektor IPPU

https://signsmart.menlhk.go.id/v2.1/app/chart/emisi_ippu_p

- Industri Manufaktur

Sektor manufaktur adalah salah satu kontributor terbesar emisi CO₂ di Indonesia. Emisi ini berasal dari berbagai proses produksi yang menggunakan bahan bakar fosil untuk energi, serta dari reaksi kimia yang terjadi selama produksi.

- Industri Semen dan Baja

Produksi semen dan baja merupakan dua sub-sektor industri yang sangat intensif energi dan menghasilkan emisi CO₂ dalam jumlah besar. Proses produksi semen melibatkan pembakaran batu kapur, sementara produksi baja melibatkan penggunaan kokas dalam tungku tinggi.

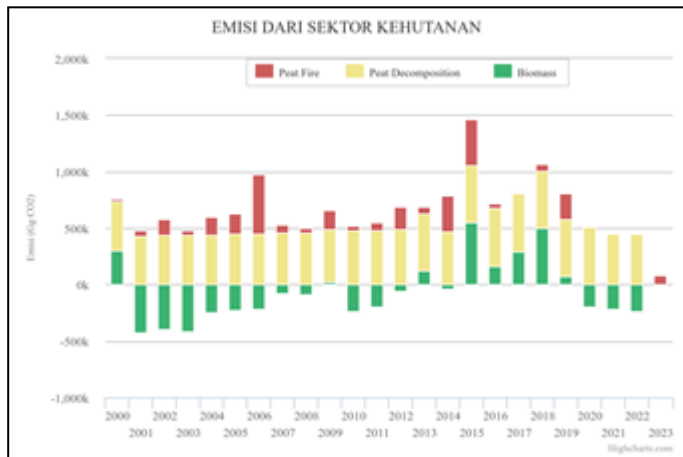
- Industri Petrokimia

Industri petrokimia menghasilkan emisi CO₂ dari berbagai proses, termasuk pemisahan dan pemurnian bahan kimia, serta produksi plastik, karet, dan bahan kimia lainnya.

- Inovasi dan Teknologi Hijau dalam Industri

Banyak industri di Indonesia mulai menerapkan teknologi hijau dan inovasi untuk mengurangi emisi CO₂. Teknologi ini mencakup penggunaan energi terbarukan, peningkatan efisiensi energi, dan penerapan praktik produksi bersih.

Sektor Pertanian dan Kehutanan



Gambar 5. Emisi dari Sektor Kehutanan

https://signsmart.menlhk.go.id/v2.1/app/chart/emisi_forestry_p

- Pembukaan Lahan dan Deforestasi

Deforestasi dan pembukaan lahan adalah penyebab utama emisi CO₂ di sektor kehutanan dan pertanian. Di Indonesia, aktivitas ini sering kali dilakukan untuk kepentingan perkebunan sawit, pertanian, dan pembangunan infrastruktur. Pembakaran hutan dan lahan gambut juga menyumbang emisi CO₂ yang signifikan.

- Emisi dari Aktivitas Pertanian

Aktivitas pertanian juga menghasilkan emisi CO₂, terutama dari penggunaan pupuk sintetis, pembakaran sisa tanaman, dan pengelolaan limbah ternak. Proses fotosintesis dan respirasi tanaman serta mikroorganisme tanah juga berkontribusi pada emisi gas rumah kaca.

- Praktik Pertanian Berkelanjutan

Untuk mengurangi emisi CO₂ dari sektor pertanian, berbagai praktik pertanian berkelanjutan telah diadopsi. Ini termasuk:

- Pertanian Organik

Mengurangi penggunaan pupuk kimia dan pestisida.

- Pertanian Konservasi

Mengurangi gangguan tanah dan meningkatkan kesehatan tanah.

- Rotasi Tanaman dan Agroforestri
Menanam berbagai jenis tanaman dan mengintegrasikan pohon ke dalam lahan pertanian untuk meningkatkan serapan karbon.
- Reforestasi dan Agroforestry
Reforestasi adalah proses penanaman kembali hutan di lahan yang telah ditebang atau rusak, sementara agroforestri adalah sistem penggunaan lahan yang mengintegrasikan pohon dengan tanaman atau ternak. Kedua praktik ini dapat membantu menyerap CO₂ dari atmosfer dan meningkatkan keanekaragaman hayati.

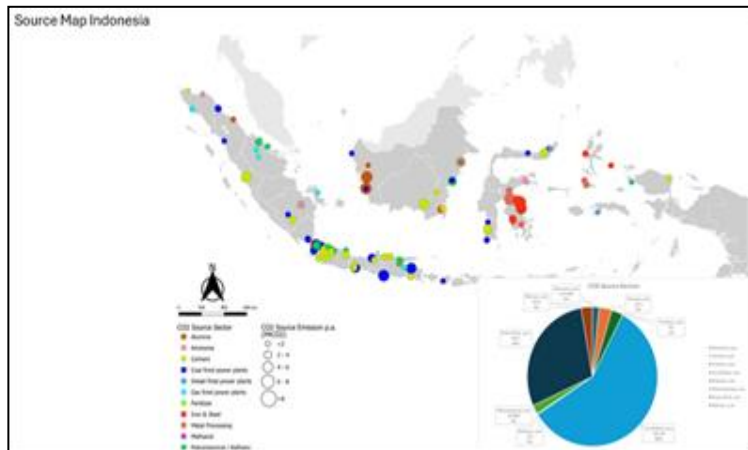
CO₂ SOURCE SECTOR MAP INDONESIA

Kegiatan industri yang beragam di Indonesia berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca, sehingga memerlukan strategi efektif untuk pengurangan emisi. Studi ini berfokus pada potensi teknologi CCS di sektor petrokimia, yang merupakan kontributor utama emisi CO₂. Peta dibawah ini mengilustrasikan distribusi geografis sumber emisi CO₂ di seluruh Indonesia, yang dikategorikan berdasarkan sektor dan volume emisi. Diagram pai yang menyertainya memberikan rincian kontribusi dari setiap sektor terhadap total emisi CO₂. Visualisasi ini berfungsi sebagai dasar untuk mengidentifikasi situs potensial untuk inisiatif penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS) di industri petrokimia.

Data diperoleh dari berbagai sektor industri termasuk alumina, amonia, semen, pembangkit listrik tenaga batu bara, pembangkit listrik tenaga diesel, pembangkit listrik tenaga gas, pupuk, besi & baja, pemrosesan logam, metanol, dan operasi

petrokimia/penyulingan. Volume emisi dikategorikan dalam lima rentang: kurang dari 2 MtCO₂, 2-4 MtCO₂, 4-6 MtCO₂, 6-8 MtCO₂, dan lebih dari 8 MtCO₂ per tahun.

Peta menunjukkan distribusi luas sumber emisi CO₂ di seluruh Indonesia, dengan klaster signifikan di bagian barat dan timur negara tersebut. Diagram pai menyoroti sektor pembangkit listrik sebagai penyumbang terbesar, yaitu 29% dari total emisi. Sektor besi dan baja mengikuti dengan 58%, sementara sektor petrokimia dan penyulingan berkontribusi sebesar 6,5%.



Gambar 6. CO₂ Source Sector and Emmision p.a.
(MtCO₂)

Pada Gambar 6 yaitu peta distribusi sumber emisi CO₂ dari sektor petrokimia di Indonesia. Warna hijau pada peta mewakili sektor petrokimia, dengan ukuran lingkaran yang menunjukkan volume emisi CO₂ per tahun (MtCO₂).

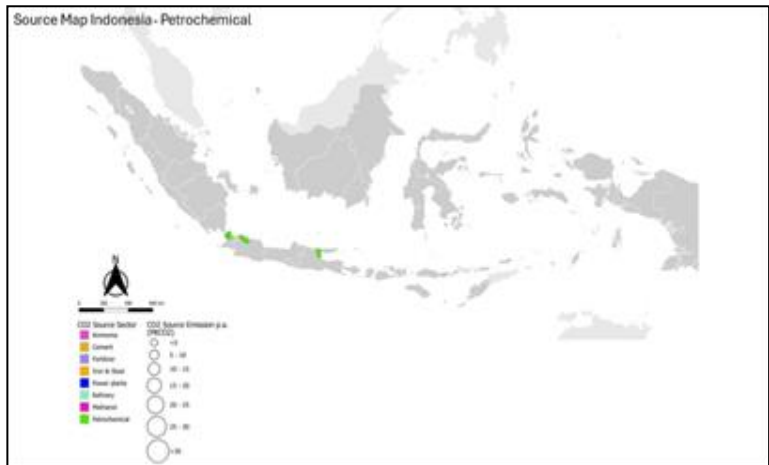
Sumber Emisi CO₂ per Tahun lingkaran-lingkaran pada peta menunjukkan berbagai tingkatan emisi CO₂ yang dihasilkan dari sektor petrokimia. Ukuran lingkaran mencerminkan volume emisi:

- Lingkaran kecil menunjukkan emisi kurang dari 5 MtCO₂ per tahun.
- Lingkaran sedang menunjukkan emisi antara 5 hingga 10 MtCO₂ per tahun.
- Lingkaran besar menunjukkan emisi antara 10 hingga 15 MtCO₂ per tahun, dan seterusnya.

Sumber-sumber emisi petrokimia terlihat terkonsentrasi di wilayah Jawa Barat dan Banten. Ini menandakan bahwa aktivitas petrokimia yang signifikan, yang menghasilkan emisi CO₂, berlokasi di daerah ini.

Hanya sektor petrokimia yang diwakili dalam peta ini, yang ditandai dengan warna hijau. Sektor ini merupakan salah satu kontributor utama emisi CO₂ di Indonesia. Peta ini berguna untuk mengidentifikasi lokasi-lokasi utama di Indonesia yang memiliki potensi tinggi untuk implementasi teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS). Dengan mengetahui konsentrasi emisi di sektor

petrokimia, pihak berwenang dan industri dapat merencanakan strategi mitigasi emisi yang lebih efektif.



Gambar 7. Source Map Indonesia – Petrochemical

Gambar 7 menunjukkan peta distribusi sumber emisi CO₂ dari sektor amonia dan pupuk di Indonesia. Warna ungu pada peta mewakili sektor amonia, sementara warna biru muda mewakili sektor pupuk, dengan ukuran lingkaran yang menunjukkan volume emisi CO₂ per tahun (MtCO₂). Sumber

Emisi CO₂ per Tahun:

Lingkaran-lingkaran pada peta menunjukkan berbagai tingkatan emisi CO₂ yang dihasilkan dari sektor amonia dan pupuk. Ukuran lingkaran mencerminkan volume emisi:

- Lingkaran kecil menunjukkan emisi kurang dari 5 MtCO₂ per tahun.
- Lingkaran sedang menunjukkan emisi antara 5 hingga 10 MtCO₂ per tahun.
- Lingkaran besar menunjukkan emisi antara 10 hingga 15 MtCO₂ per tahun, dan seterusnya.

Sumber-sumber emisi amonia dan pupuk tersebar di beberapa wilayah Indonesia, termasuk Sumatra, Jawa, Kalimantan, dan Sulawesi. Ini menandakan bahwa aktivitas produksi amonia dan pupuk yang signifikan, yang menghasilkan emisi CO₂, berlokasi di daerah-daerah ini.

Sektor amonia ditandai dengan warna ungu, sementara sektor pupuk ditandai dengan warna biru muda. Kedua sektor ini merupakan kontributor penting emisi CO₂ di Indonesia.

Peta ini berguna untuk mengidentifikasi lokasi-lokasi utama di Indonesia yang memiliki potensi tinggi untuk implementasi teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS). Dengan mengetahui konsentrasi emisi di sektor amonia dan pupuk, pihak berwenang dan industri dapat merencanakan strategi mitigasi emisi yang lebih efektif.



Gambar 8. Source Map Indonesia – Ammonia and Fertilizer

Gambar 8 menunjukkan peta potensi penyimpanan di reservoir minyak dan gas yang sudah habis di Indonesia. Warna merah pada peta mewakili potensi penyimpanan CO₂ dalam juta metrik ton (MMT), dengan ukuran lingkaran yang menunjukkan kapasitas penyimpanan. Potensi Penyimpanan (MMT) Lingkaran-lingkaran pada peta menunjukkan berbagai tingkatan kapasitas penyimpanan CO₂ di reservoir

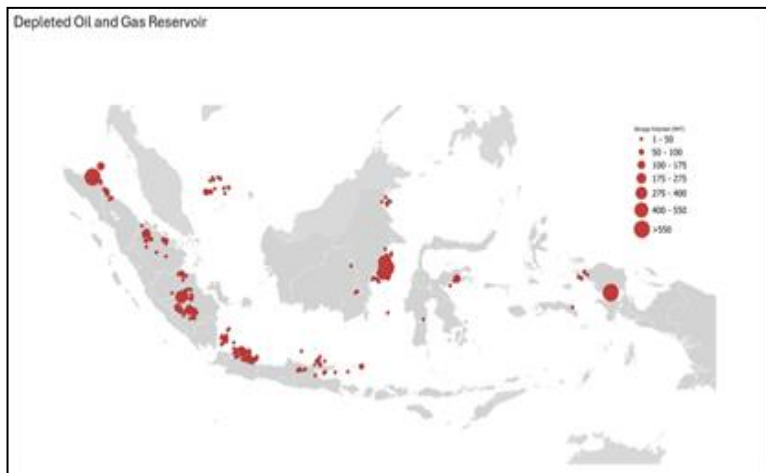
minyak dan gas yang sudah habis. Ukuran lingkaran mencerminkan potensi penyimpanan:

- Lingkaran kecil menunjukkan kapasitas penyimpanan antara 1 hingga 50 MMT.
- Lingkaran sedang menunjukkan kapasitas penyimpanan antara 50 hingga 100 MMT.
- Lingkaran besar menunjukkan kapasitas penyimpanan lebih dari 550 MMT, dan seterusnya.

Reservoir yang memiliki potensi penyimpanan tinggi tersebar di beberapa wilayah Indonesia, termasuk Sumatra, Kalimantan, Jawa, dan Papua. Ini menandakan bahwa wilayah-wilayah ini memiliki banyak reservoir minyak dan gas yang sudah habis dan dapat digunakan untuk penyimpanan CO₂.

Peta ini berguna untuk mengidentifikasi lokasi-lokasi utama di Indonesia yang memiliki potensi tinggi untuk penyimpanan CO₂ di reservoir minyak dan gas yang sudah habis. Dengan mengetahui kapasitas penyimpanan di setiap lokasi,

pihak berwenang dan industri dapat merencanakan strategi penyimpanan CO₂ yang lebih efektif untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan memanfaatkan infrastruktur yang ada.



Gambar 9. Depleted Oil and Gas Reservoir Map

BAB IV POTENSIAL SINKS OF CO₂

Potensial Sinks of CO₂ mengacu pada berbagai metode dan lokasi yang dapat digunakan untuk menyerap dan menyimpan karbon dioksida (CO₂) dari atmosfer. Dalam konteks mitigasi perubahan iklim, "*sinks*" atau "penyerap" adalah mekanisme yang berfungsi untuk mengurangi konsentrasi CO₂ di atmosfer, membantu mengatasi efek rumah kaca dan perubahan iklim.

Penyerapan karbon secara alami dapat dilakukan melalui :

a. Hutan Tropis Dan Subtropis

Hutan hujan tropis dan subtropis dapat menyerap jumlah CO₂ yang signifikan melalui fotosintesis, di mana pohon-pohon menyerap CO₂ untuk pertumbuhan dan menyimpannya dalam biomassa (batang, daun, dan akar).

b. Hutan Boreal dan Sub-Alpine

Hutan-hutan ini juga berfungsi sebagai penyerap CO₂, meskipun kapasitasnya mungkin berbeda tergantung pada iklim dan jenis vegetasi.

c. Penyerapan Tanah Pertanian

Teknik pertanian seperti penanaman tanaman penutup, rotasi tanaman, dan pengelolaan tanah yang baik dapat meningkatkan kapasitas tanah untuk menyerap CO₂.

d. Ekosistem Laut

Fitoplankton di lautan menyerap CO₂ melalui fotosintesis. Alga besar seperti lamun dan alga coklat juga berperan dalam penyerapan karbon. Kemudian, mangrove dan terumbu karang memiliki kemampuan menyerap dan menyimpan CO₂ di ekosistem laut dan pesisir.

Selain itu, dalam penyimpanan potensi karbon buatan dapat dilakukan melalui beberapa cara :

a. Teknologi *Carbon Capture and Storage* (CCS)

Menyimpan CO₂ di formasi geologi bawah tanah seperti akuifer asin, lapisan batuan minyak dan gas yang telah habis, atau formasi batuan yang sesuai. Jebakan formasi ini dapat digunakan untuk penyimpanan karbon jangka panjang.

b. Mineralisasi Karbon

Proses di mana CO₂ diubah menjadi mineral karbonat melalui reaksi kimia dengan mineral alami. Ini dapat dilakukan di laboratorium atau secara alami dalam formasi geologi.

c. Penangkapan Karbon dari Udara (*Direct Air Capture*)

Penangkapan sumber karbon yang berasal dari atmosfer menggunakan teknologi yang menyaring udara. CO₂ yang tertangkap kemudian dapat disimpan secara geologis atau dimanfaatkan.

d. Bioenergi dengan Penangkapan dan Penyimpanan Karbon (BECCS)

Pemanfaatan biomassa untuk menghasilkan energi dan kemudian menggunakan hasil pembakaran proses

produk energi tersebut untuk menjadi sumber CO₂. Efek yang akan diberikan berupa kemungkinan pengurangan emisi.

Peta potensi lokasi sink CO₂ di Sumatera Selatan, Gambar VI menunjukkan peta potensi lokasi sink CO₂ di Sumatera Utara, Gambar VII menunjukkan peta potensi lokasi sink CO₂ di Central Sumatera, dengan berbagai kategori sumber emisi termasuk ladang gas, PLTU, dan industri petrokimia. Peta ini juga menunjukkan jaringan pipa gas dan cairan yang terhubung dengan berbagai lokasi sink.

Kategori Sumber Emisi CO₂:

- Ladang Gas (Gas Field)
Ditandai dengan lingkaran merah besar, menunjukkan lokasi ladang gas yang berpotensi menjadi sumber utama CO₂.
- PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap)
Ditandai dengan persegi biru, menunjukkan lokasi PLTU yang menghasilkan CO₂.

- Industri Petrokimia (*Petrochemical Industry*)
Ditandai dengan segitiga kuning, menunjukkan lokasi industri petrokimia yang berkontribusi terhadap emisi CO₂.
- Pabrik Pengolahan Gas (*Gas Processing Plant*)
Ditandai dengan persegi kuning, menunjukkan lokasi pabrik pengolahan gas.

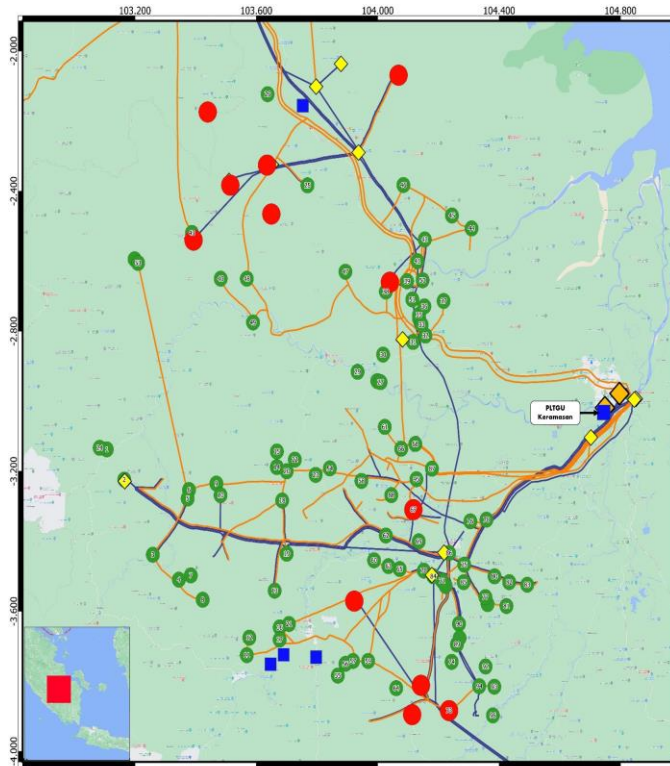
Jaringan Pipa:

- Pipa Cairan (*Liquid Pipelines*)
Diwakili oleh garis cokelat, menunjukkan jalur pipa untuk cairan yang dapat digunakan untuk transportasi CO₂.
- Pipa Gas (*Gas Pipelines*)
Diwakili oleh garis oranye, menunjukkan jalur pipa gas yang terhubung dengan berbagai lokasi sumber dan sink CO₂.

Sink Ladang Minyak (*Oil Field Sink*) merupakan penggunaan ladang minyak tua atau tidak aktif untuk menyimpan CO₂ yang ditangkap dari sumber-sumber emisi.

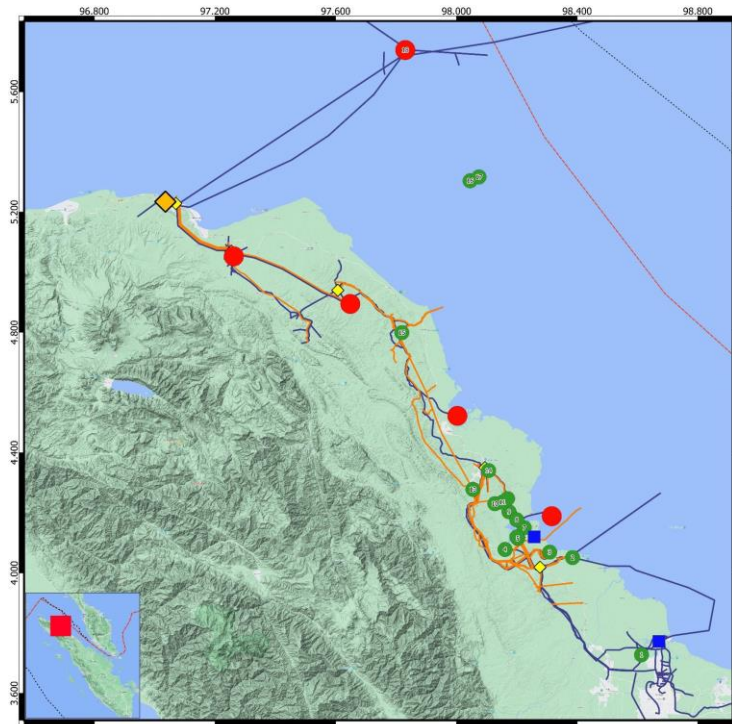
Proses ini melibatkan injeksi CO₂ ke dalam formasi geologi yang sebelumnya telah digunakan untuk produksi minyak. Ladang minyak ini memiliki potensi untuk menyimpan CO₂ karena mereka seringkali memiliki struktur geologi yang dapat menahan gas secara stabil dalam jangka panjang.

Ditandai dengan simbol hijau, menunjukkan lokasi ladang minyak yang dapat digunakan sebagai sink untuk menyimpan CO₂. Peta ini memberikan gambaran komprehensif tentang lokasi potensial untuk penangkapan dan penyimpanan CO₂ di Sumatera Selatan. Dengan menunjukkan konektivitas antara sumber emisi CO₂ dan jaringan pipa yang ada, peta ini membantu dalam perencanaan strategis untuk implementasi teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon. Dengan demikian, ini dapat mendukung upaya pengurangan emisi CO₂ dan berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim.



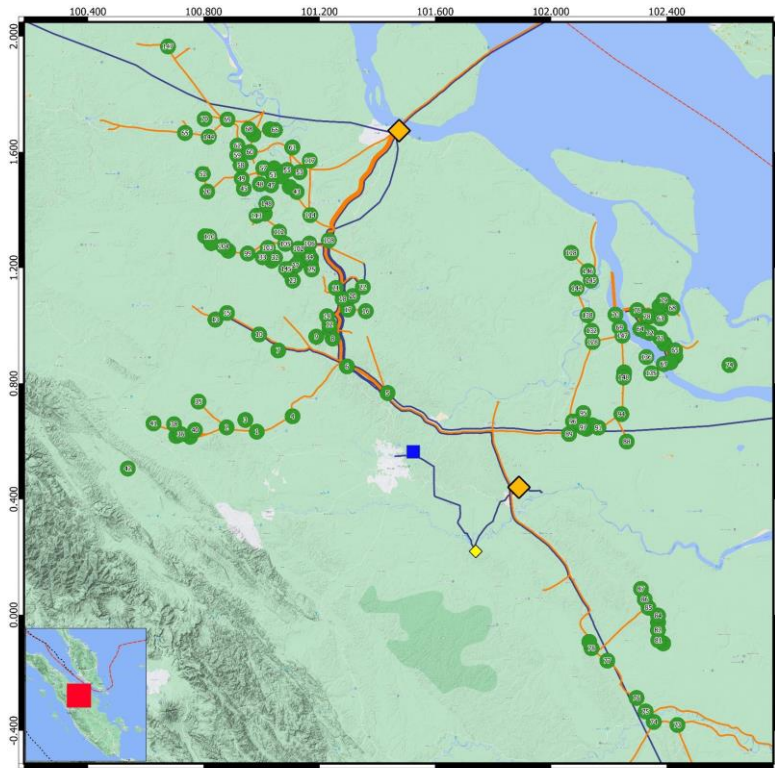
Potential Sinks of CO₂ in South Sumatera
w/ Source Category: Gas Field, PLTU, Industry

Gambar 11. Potential Sinks of CO₂ in South Sumatera



Potential Sinks of CO₂ in North Sumatera
w/ Source Category: Gas Field, PLTU, Industry

Gambar 12. Potential Sinks of CO₂ in North Sumatera



Potential Sinks of CO₂ in Central Sumatra
w/ Source Category: Gas Field, PLTU, Industry

Gambar 13. Potential Sinks of CO₂ in Central Sumatra

DAFTAR PUSTAKA

- Al Adasani, A., & Bai, B. (2011). Analysis of EOR projects and updated screening criteria. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 79(1–2), 10–24. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.07.005>
- Bains, P., Psarras, P., & Wilcox, J. (2017). CO₂ capture from the industry sector. *Progress in Energy and Combustion Science*, 63, 146–172. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.07.001>
- Becattini, V., Gabrielli, P., Antonini, C., Campos, J., Acquilino, A., Sansavini, G., & Mazzotti, M. (2022). Carbon dioxide capture, transport and storage supply chains: Optimal economic and environmental performance of infrastructure rollout. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 117(October 2021), 103635. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103635>

- NPC. (2019). Meeting the dual challenge: a roadmap to at-scale deployment of carbon capture, use, and storage. December 2019.
- PT Pupuk Indonesia. (2017). Sinergi untuk Keberlanjutan. Pupuk Indonesia Holding Company, 1–152. https://pupuk-indonesia.com/public/uploads/2018/05/SRPI_bahasa_MAY4_A.pdf-1526609141.pdf
- PT Pupuk Indonesia (Persero). (2021). Laporan Keberlanjutan PT Pupuk Indonesia Tahun 2021.
- Smith, E., Morris, J., Kheshgi, H., Teletzke, G., Herzog, H., & Paltsev, S. (2021). The cost of CO₂ transport and storage in global integrated assessment modeling. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 109, 103367. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103367>
- Yildirim, V., Yomralioglu, T., Nisanci, R., Çolak, H. E., Bediroğlu, Ş., & Saralioglu, E. (2017). A spatial multicriteria decision-making method for natural gas transmission pipeline routing. *Structure and*

Infrastructure Engineering, 13(5), 567–580.
<https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1173071>
Aladasani, A. dan Bai, B., 2010. Recent developments
and updated screening criteria of enhanced oil
recovery techniques. Society of Petroleum Engineers.
doi:10.2118/130726-MS

ISBN 978-623-389-312-1



9 786233 893121