

TUGAS AKHIR
STUDI LITERATUR CARBON CAPTURE,
UTILIZATION AND STORAGE (CCUS) DI
INDONESIA

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Derajat Sarjana (S1) Teknik Lingkungan**



THAFAIL FALAH DHIAHAQI
20513008

PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2024

TUGAS AKHIR
STUDI LITERATUR CARBON CAPTURE,
UTILIZATION AND STORAGE (CCUS) DI
INDONESIA

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Derajat Sarjana (S1) Teknik Lingkungan



THAFAIL FALAH DHIAHAQI
20513008

Disetujui,
Dosen Pembimbing:

Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D
NIK. 185130401
Tanggal: 28-10-2024

Mengetahui,
Ketua Prodi Teknik Lingkungan FTSP UII



Any Juliani, S.T., M.Sc (Res.Eng.), Ph.D.
NIK. 045130401
Tanggal: 28-10-2024

HALAMAN PENGESAHAN

STUDI LITERATUR CARBON CAPTURE, UTILIZATION AND STORAGE (CCUS) DI INDONESIA

Telah diterima dan disahkan oleh Tim Penguji

Hari : Senin
Tanggal : 28-10-2024

Disusun Oleh:

THAFAIL FALAH DHIAHAQI
20513008

Tim Penguji :

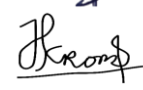
Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D.

()

Adam Rus Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.

()

Ikrom Mustofa, S.Si., M.Sc.

()

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Indonesia maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini adalah merupakan gagasan, rumusan dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan Dosen Pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Program *software* komputer yang digunakan dalam penelitian ini sepenuhnya menjadi tanggungjawab saya, bukan tanggungjawab Universitas Islam Indonesia.
5. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sangsi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh, serta sangsi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 28-10-2024

Yang membuat pernyataan,

A handwritten signature in black ink is written over a yellow rectangular stamp. The stamp contains the text 'METER TANDA' and a serial number '59540AJX051692890'.

Thafail Falah Dhiahaqi

NIM: 20513008

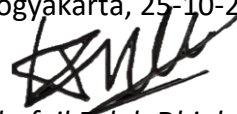
PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah *subhanahu wa ta'ala* atas segala karunia-Nya sehingga tugas akhir ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak maret 2024 ini ialah Studi Iliteratur carbon capture utilization and storage di indonesia

Terima kasih penulis ucapkan kepada Bapak/Ibu Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D. selaku pembimbing, serta Bapak/Ibu Adam Rus Nugroho S.T., M.T., Ph.D dan bapak Ikrom mustofa S.Si., M.Sc yang telah banyak memberi saran. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada ayah, ibu, serta seluruh keluarga, atas segala doa dan kasih sayangnya.

Semoga tugas akhir ini bermanfaat.

Yogyakarta, 25-10-2024



Thafail Falah Dhihaqi

ABSTRAK

THAFAIL FALAH DHIAHAQI. Studi Literatur Carbon Capture Utilization and Storage di Indonesia . Dibimbing oleh Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D

Penelitian ini membahas tantangan dan dampak lingkungan dari penerapan teknologi *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) di Indonesia dalam konteks mitigasi perubahan iklim. Teknologi CCUS dinilai penting dalam mengurangi emisi CO₂ dari sektor industri berat dan mempercepat transisi energi ke sumber yang lebih ramah lingkungan. Namun, penelitian menunjukkan bahwa penerapan CCUS di Indonesia dihadapkan pada tantangan, termasuk masalah teknis, regulasi yang belum memadai, keterbatasan infrastruktur, serta investasi yang tinggi. Dari 48 artikel yang dianalisis, sebanyak 72,9% mendukung implementasi CCUS dengan menyoroti manfaatnya dalam mengurangi emisi karbon, sedangkan 27,1% kontra karena risiko seperti biaya implementasi yang tinggi, potensi kebocoran CO₂, dan dampak sosial jika pengelolaan tidak dilakukan dengan baik. Hasil ini mengindikasikan perlunya pengembangan regulasi, infrastruktur, dan insentif ekonomi yang lebih mendukung, serta penelitian lebih lanjut untuk memastikan implementasi CCUS yang aman dan efektif. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi signifikan bagi pengembangan kebijakan dan teknologi CCUS di Indonesia.

Kata kunci: Carbon Capture Utilization and Storage, emisi nol bersih, risiko lingkungan, tantangan implementasi

ABSTRACT

Thafail Falah Dhiahaqi. *Literature Study Carbon Capture Utilization and Storage in indonesia*. Supervised by Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D

This study discusses the challenges and environmental impacts of the application of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) technology in Indonesia in the context of climate change mitigation. CCUS technology is considered important in reducing CO₂ emissions from the heavy industrial sector and accelerating the energy transition to more environmentally friendly sources. However, research shows that the implementation of CCUS in Indonesia is faced with challenges, including technical problems, inadequate regulations, limited infrastructure, and high investment. Of the 48 articles analyzed, as many as 72.9% supported the implementation of CCUS by highlighting its benefits in reducing carbon emissions, while 27.1% were against it due to risks such as high implementation costs, potential CO₂ leakage, and social impacts if not managed properly. These results indicate the need for the development of more supportive regulations, infrastructure, and economic incentives, as well as further research to ensure safe and effective implementation of CCUS. This research is expected to make a significant contribution to the development of CCUS policies and technologies in Indonesia.

Keywords: *Carbon Capture Utilization and Storage, net-zero emissions, environmental risks, implementation challenges*

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	9
DAFTAR TABEL	1
DAFTAR GAMBAR.....	1
DAFTAR LAMPIRAN	3
BAB I PENDAHULUAN	5
1.1 Latar Belakang.....	5
1.2 Rumusan Masalah.....	8
1.3 Tujuan Penelitian	8
1.4 Manfaat Penelitian.....	9
1.6 Ruang Lingkup	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	11
2.1 Global Warming	11
2.2 Produksi CO ₂ di Sektor Energi Indonesia	13
2.3 Teknologi Penangkapan CO ₂	15
2.4 Teknologi Penyimpanan CO ₂	15
2.5 Pemanfaatan CO ₂ dengan Menggunakan CCUS	16
2.6 Regulasi Terkait CCUS	18
2.7 Studi Literatur	20
BAB III METODE PENELITIAN.....	23
3.1 Prosedur Analisis Data	23
3.2 Tahapan Pelaksanaan Scoping Review	24
3.3 Pengumpulan Literatur	26
3.4 Kompilasi Data	27
3.5 Seleksi Data	27
3.6 Kategorisasi Data dan analisis Tematik.....	30
3.8 Pembandingan Data.....	31
3.9 Sintesis Data.....	32
3.10 Evaluasi	32
3.11 Penarikan Kesimpulan.....	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1 Hasil Identifikasi Literatur	34
4.2 Tantangan Implementasi CCUS secara Global dan di Indonesia	38

4.2.1 Regulasi	40
4.2.2 Ekonomi	41
4.2.3 Teknologi.....	42
4.2.4 Sosial dan Penerimaan Publik.....	43
4.2.5 Risiko & dampak lingkungan CCUS	43
4.3 Dampak Lingkungan dari CCUS	44
4.3.1 Kebocoran CO ₂	45
4.3.2 Dampak pada Air Tanah.....	46
4.3.3 Dampak Seismik	47
4.3.4 Efek Jangka Panjang	47
4.4 Research Gap dalam Dampak Lingkungan CCUS	48
4.5 Persepsi dan Stigma Para Ahli Terkait Penerapan CCUS	51
4.5.1 Pro dari Penerapan CCUS.....	53
4.5.2 Kontra dari Penerapan CCUS	54
BAB V KESIMPULAN	58
5.1 Kesimpulan.....	58
5.2 Saran	58
DAFTAR PUSTAKA	60
LAMPIRAN	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Masalah hukum dan peraturan untuk penerapan CCUS	19
Tabel 3. 1 penilaian kualitas literatur	26
Tabel 4. 1 Tantangan dan Hambatan dalam Implementasi CCUS di Indonesia	39
Tabel 4.2 Kebijakan terkait CCUS.....	41
Tabel 4. 4 Evaluasi Risiko dan Dampak Lingkungan CCUS di Indonesia	44
Tabel 4.5 Rekomendasi Studi Lanjut.....	48
Tabel 4. 6 Tabel Perbandingan Jurnal	52

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Skematik CCUS	7
Gambar 1. 2 Kerangka Pemikiran	8
 Gambar 2.1 Total dan sumber emisi sektor energi stasioner terpilih di Indonesia, 2000-2021 (IEA, 2023).....	14
Gambar 2.2 Konsep Geologi Penyerapan Karbon Sumber: Duncan & Morrissey (2011)	15
Gambar 2.3 Penyimpanan CO ₂ Sumber: Global CCS Institute (2018).....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2.4 Penggunaan CO ₂ –EOR Sumber: Global CCS Institute (2018)	18
 Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	24
Gambar 3. 2 Diagram Alir Seleksi Data	29
Gambar 3. 3 Diagram Alir Kategorisasi data dan analisis tematik.....	30
 Gambar 4.1 Jumlah Artikel Ilmiah.....	35
Gambar 4.2 Presentase Artikel Ilmiah	36
Gambar 4.3 Jumlah artikel per tahun terbit	36
Gambar 4.4 Jumlah dan Presentase kategori tantangan CCUS di Indonesia	38
Gambar 4.5 Perbandingan jumlah dan presentase antara pro dan kontra terkait CCUS	52

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Rekapitulasi literatur yang di kaji.....	64
---	----

BAB I

PENDAHULUAN

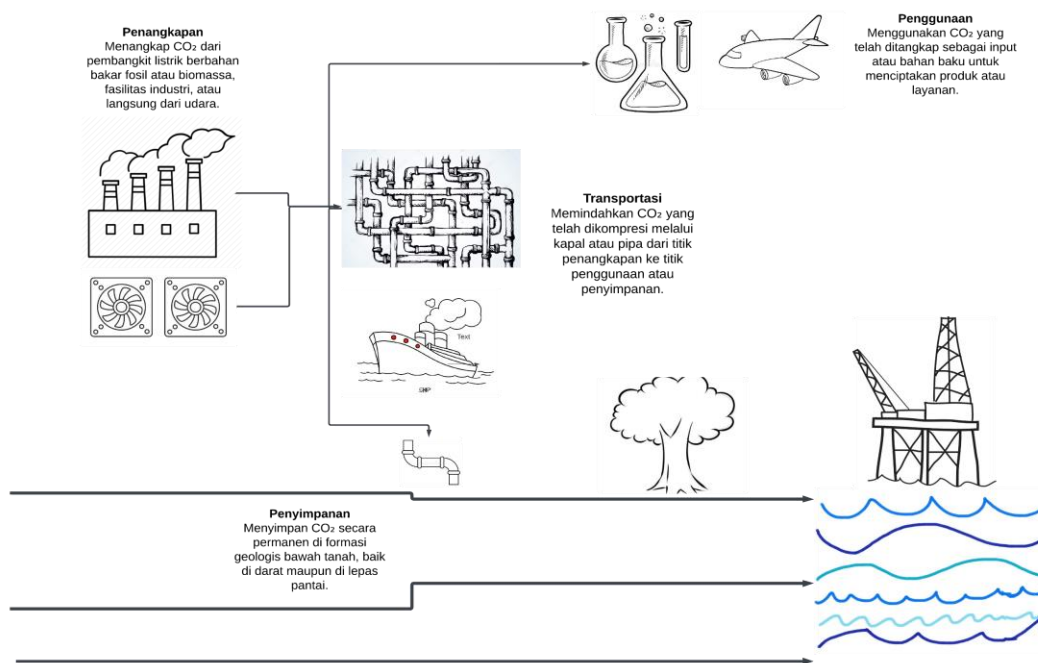
1.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki sumber daya bahan bakar fosil yang melimpah di dunia dan masih menjadi sumber energi utama pada beberapa tahun yang mendatang. Bahan bakar fosil melepaskan emisi karbon dioksida (CO₂) dan gas lain yang dapat menyebabkan peningkatan konsentrasi emisi karbon dioksida (CO₂) di atmosfer, sehingga memicu isu pemanasan global. Perubahan iklim terjadi akibat adanya pembakaran bahan bakar fosil, sehingga menjadi penyebab utama pelepasan CO₂ di udara (Muhd Nor, 2016). Meningkatnya emisi karbon yang berasal dari bahan bakar fosil menyebabkan pemerintah Indonesia berkomitmen untuk mengurangi emisi gas karbon dioksida (CO₂) dari konsumsi bahan bakar fosil sebagai upaya mitigasi perubahan iklim. Dewan Energi Nasional (2014) memberikan dua kemungkinan skenario energi yang diharapkan dapat membantu merealisasikan komitmen yang dibentuk, yaitu skenario “business as usual” dan Kebijakan Energi Nasional. Skenario Kebijakan Energi Nasional ini, berdasarkan hasil kesepakatan Indonesia dalam Paris Agreement tahun 2016, dimana pengurangan emisi CO₂ hingga 26% melalui peningkatan bauran energi, pengurangan ketergantungan bahan bakar berbasis karbon, dan penyebaran sumber energi terbarukan dari tahun 2020 hingga 2050 (Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019). Namun, hal tersebut tidak mencukupi untuk mengurangi emisi CO₂ lebih lanjut, sehingga pemerintah menerapkan teknologi *Carbon Capture, Utilization and Storage* (CCUS) (Adisaputro & Saputra, 2017).

Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) adalah teknologi yang dirancang untuk menangkap emisi CO₂ dari sumber-sumber industri dan energi, kemudian menyimpannya atau menggunakannya kembali untuk tujuan komersial. CCUS diakui sebagai salah satu solusi efektif untuk mengurangi emisi karbon dan membantu mencapai target iklim global (IEA, 2020). Teknologi ini mencakup tiga tahap utama: penangkapan, pemanfaatan, dan penyimpanan CO₂ (Global CCS Institute, 2019). Teknologi CCUS bertujuan untuk menangkap sebanyak 85% emisi CO₂ dari pembangkit listrik dan industri lain sebelum di transport melalui pipa atau kapal dan disimpan sedalam 700 meter di bawah permukaan bumi. Terdapat 3 langkah utama dalam CCUS yaitu: penangkapan dan kompresi CO₂ di lokasi emisi, pengangkutan CO₂ ke lokasi penyimpanan, dan penyimpanan CO₂ secara permanen dalam formasi geologi di bawah permukaan, atau penggunaan CO₂ untuk meningkatkan laju produksi EOR (Commission, n.d.).

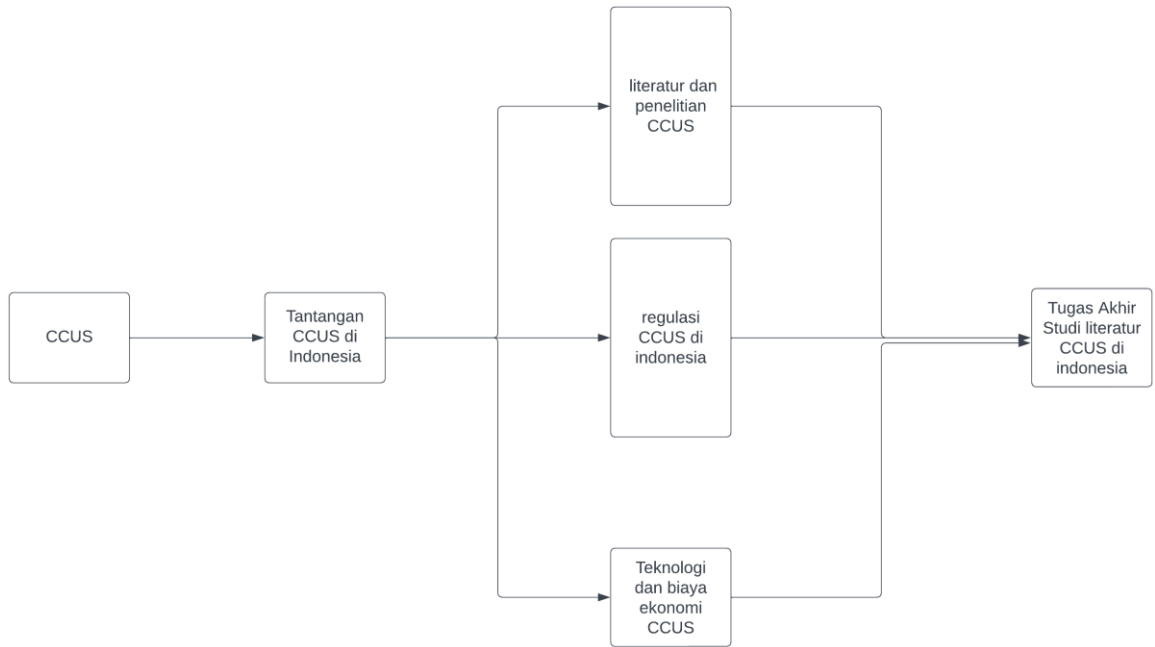
Di Indonesia Pabrik Semen Gresik menerapkan pengembangan teknologi Oxyfuel Combustion, sebuah metode yang membakar batu bara dengan oksigen murni dan uap air. Proses ini menghasilkan gas buang yang kaya akan CO₂. Selanjutnya, CO₂ dipisahkan dari gas lainnya dan diinjeksikan ke formasi geologi bawah tanah untuk penyimpanan permanen. Efisiensi teknologi ini di Pabrik Semen Gresik mencapai tingkat penangkapan CO₂ hingga 25% (SIG, 2024). Penerapan teknologi ini memiliki dampak yang signifikan dalam mengurangi emisi gas rumah kaca dari pabrik dan memberikan kontribusi penting pada upaya dekarbonisasi di Indonesia.

Salah satu permasalahan utama dalam pengembangan CCUS di Indonesia adalah kurangnya literatur dan studi yang komprehensif mengenai penerapan CCUS di berbagai sektor industri. Keterbatasan informasi ini menghambat pemahaman mengenai potensi, tantangan, dan peluang penerapan CCUS di Indonesia. Selain itu, kurangnya kesadaran dan pemahaman tentang CCUS di kalangan pemangku kepentingan juga menjadi kendala dalam mendorong adopsi teknologi ini (IEA, 2020). Dari sisi regulasi, pembentukan kerangka kerja hukum yang mendukung merupakan salah satu tantangan utama. Kebijakan dan regulasi yang jelas diperlukan untuk memberikan kepastian hukum bagi investor dan operator CCUS. Teknologi CCUS sendiri masih dalam tahap pengembangan dan adaptasi di Indonesia, menuntut kebutuhan akan penelitian dan inovasi untuk mengoptimalkan efisiensi dan efektivitasnya (IEA, 2021). Selain itu, biaya yang tinggi terkait dengan implementasi CCUS, baik dari sisi infrastruktur maupun operasional, menjadi salah satu hambatan utama. Penerapan teknologi CCUS di Indonesia merupakan langkah penting dalam upaya global dan nasional untuk mengurangi emisi karbon dan mencapai target dekarbonisasi. Meskipun terdapat tantangan, termasuk kebutuhan untuk pengembangan kerangka kerja regulasi yang kuat dan peningkatan investasi, proyek-proyek pilot yang sedang berlangsung menawarkan wawasan berharga tentang implementasi teknologi ini. Suksesnya implementasi CCUS akan membutuhkan kolaborasi antara pemerintah, industri, dan pemangku kepentingan lainnya.



Gambar 1.1 Skematik CCUS

Penelitian ini berfokus pada studi literatur mengenai teknologi CCUS di Indonesia untuk melihat peluang, tantangan, efek terhadap lingkungan, serta pengaruhnya terhadap pembangunan berkelanjutan di industri Indonesia. Studi literatur ini penting untuk mengidentifikasi gap penelitian yang ada dan memberikan rekomendasi strategis bagi pengembangan dan implementasi teknologi CCUS di Indonesia. Tugas akhir ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan literatur tersebut, dengan memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai potensi, tantangan, dan solusi penerapan CCUS di Indonesia. Studi literatur ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengambil kebijakan dan industri dalam mengembangkan dan mengimplementasikan teknologi CCUS di Indonesia



Gambar 1.2 Kerangka Pemikiran

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disusun tentang studi literature Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) di Indonesia, berikut adalah rumusan masalah yang dapat dijadikan fokus dalam penelitian Anda:

1. Apa saja tantangan implementasi CCUS secara global dan indonesia?
2. Apa saja Dampak lingkungan dari CCUS ini yang telah dipelajari dan apa research gap saat ini untuk future study?
3. Bagaimana stigma para ahli terkait dengan penerapan CCUS?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian untuk Tugas Akhir dengan judul "Studi Literature Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) di Indonesia" dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi Tantangan Implementasi CCUS secara Global dan di Indonesia
2. Menganalisis Dampak Lingkungan dari CCUS dan Mengidentifikasi Research Gap untuk Future Study
3. Menggali Persepsi dan Stigma Para Ahli Terkait Penerapan CCUS

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian untuk Tugas Akhir dengan judul "Studi Literature Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) di Indonesia" adalah sebagai berikut:

1. Pengembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi: Penelitian ini akan memberikan kontribusi penting terhadap pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi dalam bidang CCUS. Dengan menganalisis literatur yang ada, penelitian ini akan menyediakan wawasan terbaru mengenai kemajuan, tantangan, dan potensi solusi dalam penerapan CCUS di Indonesia.
2. Pertimbangan Kebijakan: Hasil penelitian ini dapat dijadikan dasar bagi pembuat kebijakan untuk merumuskan strategi dan kebijakan yang efektif terkait dengan implementasi CCUS di Indonesia. Penelitian ini akan menyoroti kebutuhan kebijakan yang mendukung, regulasi yang memadai, dan kerangka kerja yang diperlukan untuk adopsi teknologi CCUS secara efisien.
3. Dasar untuk Penelitian Lanjutan: Hasil penelitian ini akan memberikan dasar yang kokoh untuk penelitian lanjutan dalam bidang CCUS, baik di Indonesia maupun di tingkat global. Penelitian ini dapat membuka peluang untuk studi lebih lanjut mengenai penerapan teknologi CCUS dalam berbagai sektor.

1.6 Ruang Lingkup

Ruang lingkup untuk Tugas Akhir dengan judul "Studi Literature Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) di Indonesia" dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Variabel Utama Penelitian:
 - Fokus utama penelitian ini adalah pada teknologi Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS), di sektor energi dan industri berat di Indonesia
 - Analisis pengaruh CCUS terhadap pengurangan emisi karbon di sektor energi dan industri berat di Indonesia.
 - Mendapatkan kebijakan dan regulasi yang terkait dengan penerapan CCUS di Indonesia.
2. Sektor yang Ditinjau:
 - Penelitian ini akan fokus pada sektor-sektor kunci di Indonesia yang berpotensi mengadopsi teknologi CCUS, seperti pembangkit listrik, produksi semen, produksi migas, dan industri baja.

- Kajian terbatas pada aplikasi CCUS dalam konteks Indonesia, dengan penekanan pada proyek-proyek CCUS yang telah atau sedang berlangsung.
3. Batasan Temporal:
- Penelitian ini akan berfokus pada data dan informasi yang relevan dari tahun yang dicakup adalah 2006-2023., dengan mempertimbangkan perkembangan terbaru dalam teknologi dan kebijakan CCUS.
4. Aspek Geografis:
- Penelitian ini terbatas pada penerapan dan potensi CCUS di Indonesia, tidak mencakup perbandingan langsung dengan negara-negara lain kecuali sebagai referensi atau konteks.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Global Warming

Global warming, atau pemanasan global, adalah fenomena peningkatan suhu rata-rata atmosfer bumi akibat akumulasi gas rumah kaca yang terperangkap di atmosfer. Gas-gas ini, seperti karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan dinitrogen oksida (N₂O), menangkap panas matahari yang seharusnya dipantulkan kembali ke luar angkasa, sehingga menyebabkan efek rumah kaca. Fenomena ini semakin mengkhawatirkan karena aktivitas manusia, terutama pembakaran bahan bakar fosil, penggunaan lahan yang tidak berkelanjutan, dan deforestasi, terus meningkatkan konsentrasi gas-gas ini dalam jumlah besar di atmosfer bumi (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). Pemanasan global tidak hanya mengancam ekosistem, tetapi juga mengganggu kehidupan manusia melalui dampak-dampak seperti naiknya permukaan laut, peningkatan kejadian cuaca ekstrem (badai, banjir, dan kekeringan), serta perubahan pola curah hujan yang mempengaruhi pertanian dan ketersediaan air bersih. Menurut laporan Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB), jika tindakan signifikan tidak segera diambil, dunia akan menghadapi peningkatan suhu global hingga 1,5°C di atas tingkat pra-industri pada tahun 2030-2050 (United Nations, 2021).

Dalam konteks pemanasan global, teknologi *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) muncul sebagai solusi penting untuk menangani peningkatan emisi CO₂, gas rumah kaca utama yang bertanggung jawab atas sebagian besar perubahan iklim. CCUS adalah teknologi yang bertujuan untuk menangkap CO₂ yang dihasilkan dari proses industri dan pembakaran bahan bakar fosil sebelum gas tersebut mencapai atmosfer. Gas yang ditangkap ini kemudian dapat disimpan secara aman di bawah tanah, atau dimanfaatkan kembali untuk keperluan industri lainnya, seperti proses Enhanced Oil Recovery (EOR) atau bahan baku dalam industri kimia (International Energy Agency, 2020). Di Indonesia, CCUS memiliki peran yang krusial dalam upaya mencapai target pengurangan emisi karbon. Sebagai negara yang bergantung pada energi berbasis bahan bakar fosil dan sektor industri yang intensif energi, Indonesia menghadapi tantangan besar dalam memenuhi komitmen iklim global. Teknologi CCUS memungkinkan Indonesia untuk melanjutkan penggunaan bahan bakar fosil dalam jangka menengah hingga panjang sambil tetap menurunkan emisi CO₂ secara signifikan (Purnomo dkk., 2022).

Indonesia telah berkomitmen untuk menurunkan emisi gas rumah kaca hingga 29% dengan usaha sendiri dan 41% dengan dukungan internasional pada tahun 2030, sebagaimana

dinyatakan dalam Nationally Determined Contribution (NDC) pada Perjanjian Paris. Untuk mencapai tujuan ini, berbagai inisiatif telah dilakukan, termasuk pengembangan CCUS di sektor energi dan industri berat. Proyek CCUS di Indonesia, seperti yang dilakukan di Lapangan Gas Gundih dan lapangan migas lainnya, bertujuan untuk menangkap dan menyimpan CO₂ dari proses industri untuk mengurangi emisi langsung dari sumber-sumber tersebut (Ministry of Energy and Mineral Resources, 2020). Salah satu tantangan utama dalam implementasi CCUS di Indonesia adalah biaya infrastruktur yang tinggi dan kebutuhan akan teknologi yang lebih maju. Meski demikian, Indonesia memiliki potensi besar dalam penyimpanan karbon di reservoir minyak, gas, dan akuifer garam (*saline aquifers*), yang memungkinkan penurunan emisi secara besar-besaran jika teknologi ini diterapkan secara luas (Raksawiguna dkk., 2023). Potensi geologis Indonesia yang kaya dengan formasi penyimpanan bawah tanah dapat mendukung penyimpanan karbon dalam jangka panjang, serta mendukung upaya global untuk mengurangi emisi karbon dan menahan laju pemanasan global.

Walaupun teknologi CCUS memiliki potensi yang besar, penerapan teknologi ini di Indonesia dihadapkan pada sejumlah tantangan besar, termasuk aspek teknis, regulasi, dan ekonomi. Tantangan teknis meliputi pemilihan lokasi penyimpanan yang aman serta keberlanjutan teknologi injeksi CO₂ untuk jangka waktu panjang. Selain itu, diperlukan regulasi yang lebih jelas dan mekanisme insentif ekonomi, seperti kredit karbon, untuk mendorong adopsi teknologi ini oleh industri energi dan manufaktur (Indrasuta dkk., 2023). Tantangan regulasi lainnya termasuk kerangka kebijakan yang mendukung pengembangan CCUS secara menyeluruh, termasuk kepemilikan lahan penyimpanan CO₂ dan tanggung jawab jangka panjang untuk pemantauan lokasi penyimpanan. Hal ini sangat penting karena kebocoran CO₂ dari lokasi penyimpanan dapat memiliki dampak negatif terhadap lingkungan dan membatalkan manfaat yang dihasilkan dari penurunan emisi (Marbun dkk., 2021).

Dalam konteks upaya mitigasi pemanasan global, CCUS memainkan peran strategis sebagai teknologi transisi. CCUS memungkinkan negara-negara yang masih bergantung pada bahan bakar fosil untuk tetap mencapai target pengurangan emisi, sambil perlahan-lahan beralih ke energi terbarukan. Dengan memanfaatkan potensi CCUS, Indonesia dapat mengurangi emisi dari sektor-sektor yang sulit didekarbonisasi, seperti industri berat dan pembangkit listrik berbasis batu bara, sekaligus memastikan stabilitas pasokan energi nasional (Hakim dkk., 2022). Selain itu, CCUS juga dapat memberikan manfaat ekonomi tambahan melalui pengembangan industri baru berbasis karbon, seperti produksi bahan kimia dari CO₂ atau penjualan kredit karbon di pasar internasional. Dengan demikian, CCUS bukan hanya

berfungsi sebagai solusi lingkungan, tetapi juga sebagai peluang ekonomi baru bagi Indonesia dalam menghadapi tantangan global warming. Global warming adalah ancaman serius yang memerlukan solusi cepat dan efektif. CCUS muncul sebagai teknologi kunci dalam mengurangi emisi CO₂, khususnya di negara seperti Indonesia yang masih bergantung pada bahan bakar fosil. Meskipun tantangan teknis dan regulasi masih ada, potensi CCUS di Indonesia sangat besar, baik dari segi kapasitas penyimpanan karbon maupun sebagai teknologi transisi untuk mencapai target emisi nol bersih. Dengan implementasi yang tepat dan dukungan kebijakan yang kuat, CCUS dapat menjadi komponen penting dalam strategi Indonesia untuk menghadapi pemanasan global dan menjaga keberlanjutan lingkungan.

2.2 Produksi CO₂ di Sektor Energi Indonesia

Dalam lima puluh tahun terakhir, Indonesia berhasil menempatkan dirinya sebagai salah satu ekonomi yang berkembang paling cepat di dunia, mencatatkan peningkatan yang signifikan dalam konsumsi energi dan volume emisi yang dihasilkannya. Data terkini pada tahun 2021 menunjukkan bahwa emisi sektor energi di Indonesia mencapai angka sekitar 600 juta ton CO₂, serupa dengan tingkat yang dihasilkan oleh sektor energi Korea Selatan. Dari total emisi tersebut, kontribusi terbesar berasal dari pembakaran batu bara, diikuti oleh minyak dan gas alam, serta emisi dari proses industri lainnya (IPCC, 2018). Periode antara tahun 2000 dan 2021 menjadi era penting bagi Indonesia, dengan pasokan energi yang tumbuh lebih dari 150% dan peningkatan emisi CO₂ dari sektor energi yang lebih dari dua kali lipat, sebagian besar disebabkan oleh peningkatan konsumsi batu bara yang dipicu oleh permintaan yang meningkat dari sektor pembangkitan listrik (IEA, 2023).

Penanganan emisi yang terus meningkat ini memerlukan solusi inovatif, di mana teknologi *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) menawarkan peluang signifikan. Teknologi CCUS memiliki potensi yang besar dalam mendukung target Indonesia untuk mencapai emisi nol bersih pada tahun 2060, dengan menangkap CO₂ dari sumber emisi utama dan menggunakannya atau menyimpannya agar tidak memasuki atmosfer. Ini tidak hanya akan memungkinkan Indonesia untuk mengurangi emisi CO₂ secara signifikan tetapi juga membuka potensi baru untuk pemanfaatan CO₂ dalam produk bernilai tambah (IPCC, 2018).

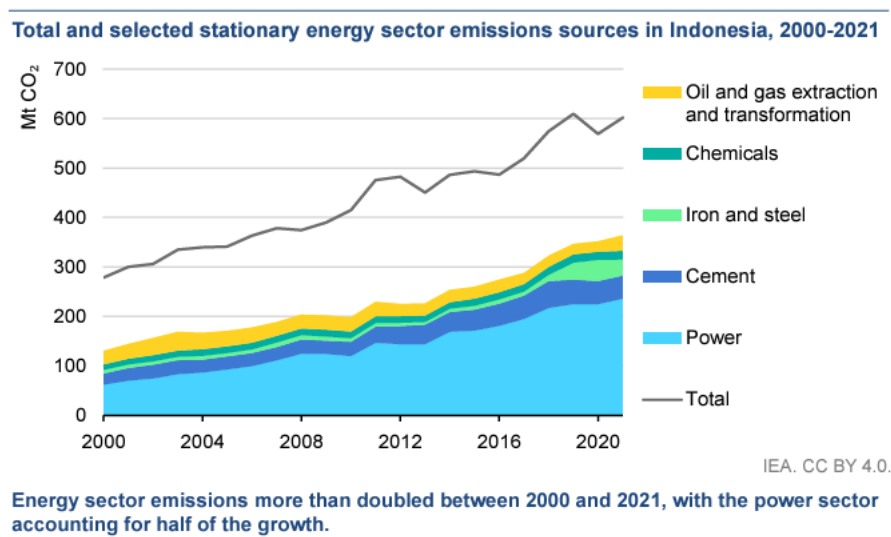
Sektor-sektor Penghasil Emisi CO₂:

- **Pembangkit Listrik:** Sektor ini merupakan kontributor utama emisi CO₂ di Indonesia, terutama karena ketergantungan pada pembangkit listrik tenaga batu bara.
- **Industri:** Industri-industri berintensitas karbon tinggi, seperti produksi semen, baja, dan petrokimia, juga menghasilkan emisi CO₂ yang signifikan.

- Transportasi: Sektor transportasi, terutama yang menggunakan bahan bakar fosil, turut berkontribusi pada emisi CO₂ di Indonesia.
- Rumah Tangga dan Komersial: Penggunaan energi untuk keperluan rumah tangga dan komersial, seperti pendingin udara dan pemanas air, juga menghasilkan emisi CO₂ (ADB, 2019).

realisasi penuh dari potensi CCUS di Indonesia memerlukan investasi substansial, pengembangan infrastruktur yang memadai, dan kesiapan teknologi, memerlukan kerjasama erat antara pemerintah, industri, dan komunitas internasional (World Bank, 2021).

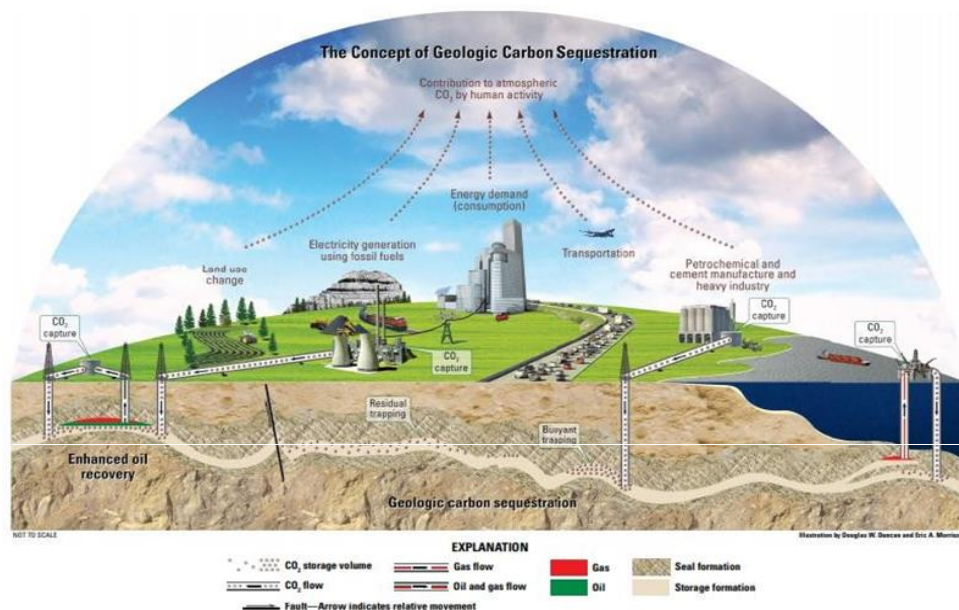
Dampak dari emisi CO₂ yang berkelanjutan tanpa intervensi signifikan seperti CCUS bisa sangat merugikan, tidak hanya bagi lingkungan tetapi juga bagi kesehatan publik dan ekonomi Indonesia. Meningkatnya emisi CO₂ berkontribusi pada perubahan iklim yang mempengaruhi stabilitas ekosistem, ketersediaan sumber daya alam, dan kehidupan sosial ekonomi masyarakat. Oleh karena itu, pengurangan emisi melalui teknologi seperti CCUS tidak hanya merupakan langkah penting dalam memerangi perubahan iklim tetapi juga dalam memastikan kesejahteraan lingkungan dan masyarakat di Indonesia (UNEP, 2021).



Gambar 2.1 Total dan sumber emisi sektor energi stasioner terpilih di Indonesia, 2000-2021 (IEA, 2023).

2.3 Teknologi Penangkapan CO₂

Penangkapan CO₂ dilakukan dengan memanfaatkan salah satu dari tiga strategi utama yaitu cara penangkapan pasca pembakaran, tangkapan pra – penyalaan atau pembakaran *oxyfuel*. CO₂ didalam pipa gas dapat diisolasi dan ditangkap dari berbagai stasioner, antara lain : pembangkit listrik bahan bakar fosil, *refinery unit*, pabrik baja, pabrik biomassa, dan *normal gas preparing*. Pada pabrik pemrosesan gas, CO₂ harus diisolasi dari gas mentah untuk menghasilkan gas reguler yang berkualitas (Gambar 2.2). CO₂ yang tertangkap hanya perlu dikeringkan dan dikemas sebelum proses transportasi (Muhd Nor dkk., 2016). Proses penyulingan di *downstream* atau *combustion* dan kompresi *gate to gate* memiliki kontribusi besar dalam emisi CO₂. Namun, terdapat ketidakpastian dalam menghitung penyimpanan CO₂, karena CO₂ diinjeksikan ke reservoir yang sama dengan sumbernya (Kelly dkk., 2019).



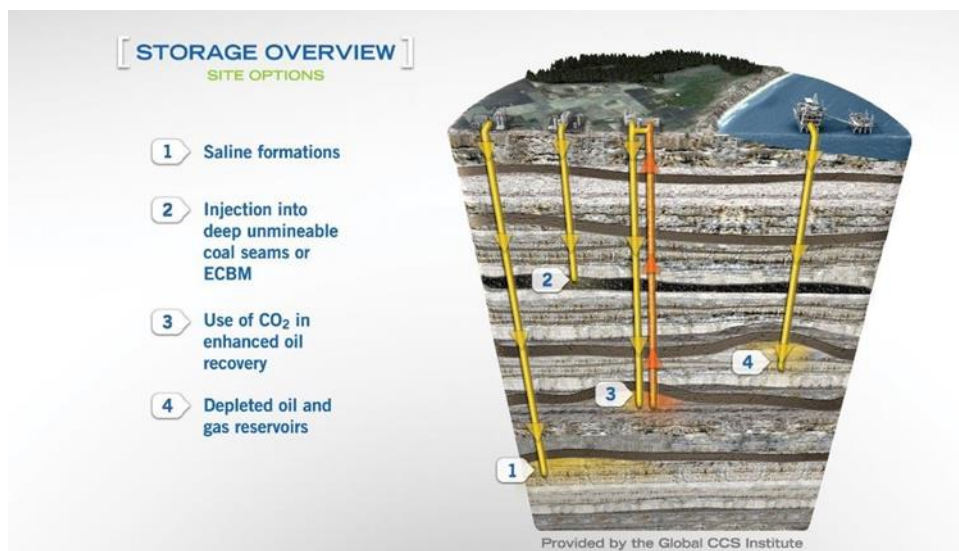
2.4 Teknologi Penyimpanan CO₂

Penyimpanan potensial CO₂ terdapat 3 bagian, CO₂ yang ditangkap harus dimasukkan ke dalam bawah permukaan yang dalam (lapangan minyak dan gas yang sudah tidak digunakan), lapisan batubara yang sudah tidak potensial, dan *saline aquifer*. CO₂ yang diinfuskan akan disimpan sebagai cairan berukuran tebal dan dapat ditangkap melalui berbagai komponen yang beragam (misalnya, penangkapan dasar dan stratigrafi, penangkapan gas yang tertinggal, penangkapan kelarutan, penangkapan mineral, dan penangkapan hidrodinamik). Namun, terdapat masalah mengenai penyimpanan CO₂ yaitu kapasitas penyimpanan CO₂ (Muhd Nor dkk., 2016).

Jenis penyimpanan CO₂ di Indonesia antara lain (Best dkk., 2011):

1. *Saline aquifer*, diprediksi akan teridentifikasi di wilayah Natuna, Namun belum adanya studi rinci untuk mengidentifikasi peluang penyimpanan *saline aquifer* di Indonesia saat ini.
2. Lapisan batubara, cadangan lapisan batubara yang melimpah terutama batubara dengan peringkat rendah tersebar di beberapa cekungan batubara. Metana yang teradsorpsi harus diproduksi. Namun, sebagian besar lapisan batubara di Indonesia saat ini masih dalam tahap non-produksi.
3. Lapangan minyak dan gas yang sudah lama ditinggalkan. Jenis penyimpanan ini sangat potensial, dikarenakan reservoir yang dikarakterisasi dengan baik dan infrastruktur yang ada dapat mengurangi biaya eksplorasi dalam menemukan lokasi baru. Namun, lapangan minyak dan gas yang ditinggalkan memiliki potensi kebocoran yang lebih tinggi, sehingga diperlukan mitigasi dengan baik (Gambar 2.3).

Penyimpanan CO₂-EOR dapat untuk memantau kinerja penyimpanan dari waktu ke waktu dan memahami apakah kegiatan CCUS mencapai tujuan utamanya yaitu mengoptimalkan penyimpanan CO₂ dalam batasan geomekanis dan operasional reservoir. Hal ini dapat membantu memvisualkan penyimpanan CO₂ dibandingkan dengan kapasitas penyimpanan maksimum serta mendapatkan perhitungan praktis dari setiap unit CO₂ yang disuntikkan dan jumlah CO₂ yang sesuai untuk disimpan di reservoir (Kelly dkk., 2019).



2.5 Pemanfaatan CO₂ dengan Menggunakan CCUS

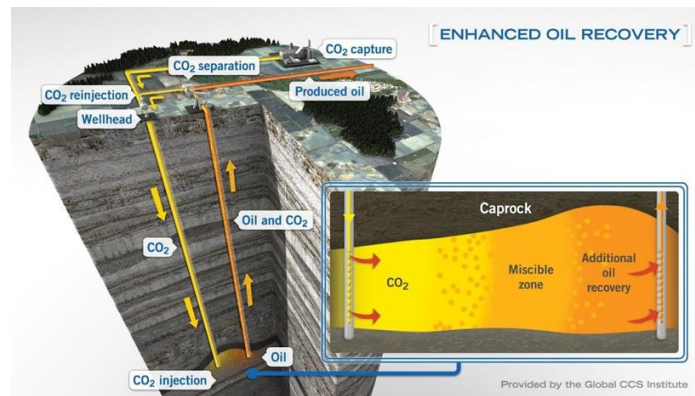
Penggunaan teknologi Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) telah jadi fokus penelitian di Indonesia dalam beberapa tahun terakhir. Penelitian yang dilakukan oleh Adisaputro & Saputra (2017) menunjukkan bahwa untuk mengurangi emisi CO₂ di Indonesia, digunakan alternatif CCUS dengan catatan Pemerintah Indonesia menerima skenario Kebijakan Energi Nasional yang memperkirakan bagian signifikan dari bauran energi berasal dari energi terbarukan. Penerapan CCUS tidak hanya membantu mengurangi emisi CO₂, tapi

juga punya potensi untuk memisahkan pertumbuhan ekonomi dari CO₂. Namun, pengembangan mengenai CCUS belum berkembang dengan baik. Penelitian oleh Best, dkk. (2011) yang bekerja sama dengan LEMIGAS menemukan bahwa peraturan dan aspek hukum tentang operasi dan pengelolaan proyek CCS dalam jangka panjang harus dipertimbangkan oleh Pemerintah Indonesia. Pemanfaatan teknologi CCUS di Indonesia baru fokus untuk meningkatkan produksi di sumur-sumur tua minyak dan gas yang tersebar di beberapa lokasi. Dengan begitu, potensi penyebaran CCUS di Indonesia terbukti ada, terutama dalam hal penyimpanan CO₂ yang berkaitan dengan Enhanced Oil Recovery.

Enhanced Oil Recovery (EOR) adalah serangkaian metode yang digunakan untuk meningkatkan jumlah minyak yang dapat diambil dari reservoir setelah metode produksi primer dan sekunder tidak lagi efektif. Pada tahap awal produksi minyak (produksi primer), minyak diekstraksi menggunakan tekanan alami dalam reservoir. Setelah itu, produksi sekunder menggunakan teknik seperti injeksi air atau gas untuk menambah tekanan reservoir. Namun, kedua metode ini umumnya hanya mampu mengekstraksi sekitar 20-40% dari total minyak dalam reservoir (Gao dkk., 2021).

Untuk mengekstraksi minyak yang tersisa, digunakan metode EOR yang umumnya melibatkan teknik seperti injeksi gas (CO₂, nitrogen), injeksi air panas atau steam, dan injeksi bahan kimia tertentu untuk mengurangi viskositas minyak dan meningkatkan mobilitasnya sehingga lebih mudah diambil (Alvarado & Manrique, 2010). Salah satu metode yang paling sering digunakan adalah CO₂-EOR, di mana gas CO₂ diinjeksikan ke dalam reservoir untuk menambah tekanan serta melarutkan minyak yang terjebak sehingga memudahkan ekstraksinya (Aziz dkk., 2023).

Penggunaan CO₂ dalam EOR tidak hanya meningkatkan produksi minyak, tetapi juga memungkinkan penyimpanan CO₂ secara permanen di bawah tanah, sehingga teknologi ini berperan ganda dalam meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi karbon (Raksawiguna dkk., 2023).



Gambar 2.3 Penggunaan CO₂–EOR Sumber: Global CCS Institute (2018)

2.6 Regulasi Terkait CCUS

Pengembangan teknologi *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) di Indonesia didukung oleh kerangka kerja hukum dan regulasi yang dibangun untuk mengatur pengelolaan dan penyimpanan CO₂ secara efektif dan aman. Kerangka ini dirancang untuk mendorong implementasi CCUS dengan memberikan pedoman yang jelas. Indonesia menonjol dengan pengesahan regulasi khusus, yaitu Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 2 tahun 2023, menjadikannya negara pionir di Asia Tenggara dalam hal penerapan kerangka kerja CCUS. Regulasi ini secara komprehensif menangani berbagai aspek penting untuk memastikan keamanan dalam penyimpanan CO₂.

Namun, ada beragam tantangan hukum dan regulasi yang dapat mempengaruhi kegiatan CCUS, terutama terkait dengan regulasi penyimpanan CO₂. Regulasi Indonesia, MEMR 2/2023, berusaha menangani berbagai isu terkait, meskipun terdapat beberapa isu spesifik yang mungkin tidak tercakup, seperti regulasi untuk proyek tertentu, menandakan bahwa pendekatan yang fleksibel dan adaptif diperlukan dalam penerapan kebijakan CCUS di Indonesia.

Tabel 2.1 Masalah hukum dan peraturan untuk penerapan CCUS

Kategori masalah hukum	Isu masalah hukum	Cakupan dalam Kerangka Kerja Indonesia
Mendefinisikan cakupan regulasi	Klasifikasi dan kemurnian CO ₂ dalam penerapan CCUS	Ya
	Kepemilikan dan hak atas CO ₂ dalam Penerapan CCUS	Tidak Jelas
Tinjauan lingkungan dan perizinan	Penilaian dampak lingkungan dari hasil pelaksanaan CCUS	Ya
	Perizinan dan otorisasi penerapan CCUS	Ya
	Keterlibatan publik dan konsultasi	Ya
Memastikan Penyimpanan CCUS yang aman dan terjamin	Penilaian Sumber Daya Penyimpanan	Tidak Jelas
	Kepemilikan Ruang Pori	Tidak Jelas
	Pengukuran, Pemantauan (Pelaporan) dan Rencana Verifikasi	Ya
	Inspeksi Situs Penyimpanan	Ya
	Tanggung Jawab Operasional dan Keamanan Finansial	Ya
	Proses Penutupan Situs	Ya
Isu Internasional dan Transnasional	Mengatur Transportasi CO ₂ Lintas Batas	Tidak Jelas
	Kepatuhan dengan Protokol London	Tidak Jelas
	Interaksi antara Front Tekanan Lintas Batas Internasional	Tidak Jelas
	Tumpang Tindih antara Beberapa Kerangka Kerja	Tidak Jelas
Memfasilitasi Pusat CCUS	Akses ke infrastruktur transportasi bersama	Ya
	Fasilitasi infrastruktur penyimpanan bersama	Ya
Isu Kunci dan yang Sedang Muncul	Perlakuan terhadap teknologi penghilangan CO ₂	Ya
	Interaksi dengan sumber daya permukaan dan subsurface lainnya	Tidak Jelas
	Transisi dari pemulihan minyak yang ditingkatkan dengan CO ₂ ke penyimpanan khusus	Tidak Jelas
	Persyaratan kesiapan CCUS	Tidak Jelas

(IEA, 2023)

2.7 Studi Literatur

Studi literatur adalah bagian yang sangat penting dalam penelitian akademik dan ilmiah. Melalui studi literatur, peneliti dapat memahami konteks dan landasan teoretis dari topik yang diteliti serta mengidentifikasi kesenjangan penelitian yang ada. Studi literatur berfungsi untuk meninjau berbagai sumber informasi yang relevan, seperti buku, artikel jurnal, laporan ilmiah, dan dokumen resmi, sehingga peneliti bisa merumuskan hipotesis yang solid serta memastikan bahwa penelitian yang dilakukan relevan dan berkontribusi pada bidang pengetahuan tertentu (Fink, 2020). Secara umum, studi literatur digunakan untuk beberapa tujuan penting yang pertama Mengidentifikasi Kesenjangan Penelitian: Dengan menelaah literatur yang ada, peneliti dapat mengidentifikasi area penelitian yang belum banyak dieksplorasi atau masih membutuhkan studi lebih lanjut. Ini membantu peneliti dalam menentukan tujuan penelitian yang lebih jelas (Jesson, 2011). yang kedua Membangun Landasan Teoritis Studi literatur memungkinkan peneliti untuk membangun landasan teori yang kuat. Dengan meninjau teori-teori yang telah ada, peneliti dapat memahami model atau konsep yang relevan dengan topik penelitian yang sedang dikaji (Boote & Beile, 2005). Yang ketiga Mengetahui Metodologi yang Tepat: Peneliti dapat mengetahui metodologi yang telah digunakan dalam penelitian-penelitian sebelumnya dan menyesuaikan metodologi penelitian mereka sendiri agar lebih efektif (Ridley, 2012). Dan yang terakhir Mendukung Argumen dan Hipotesis Studi literatur juga membantu dalam mendukung hipotesis atau argumen penelitian. Data dan informasi yang diambil dari sumber literatur dapat menjadi bukti pendukung yang kuat (Randolph, 2009).

Literature review tidak hanya memiliki satu jenis metode, tetapi ada beberapa pendekatan yang dapat digunakan tergantung pada tujuan dan jenis penelitian yang dilakukan. Berikut adalah beberapa jenis literature review yang paling umum digunakan yang pertama ada yang namanya Narrative Review, Narrative review atau tinjauan naratif adalah jenis tinjauan literatur yang umum dan sering digunakan dalam penelitian akademik. Jenis ini bersifat deskriptif, bertujuan untuk memberikan ringkasan menyeluruh dari berbagai sumber literatur yang relevan dengan topik tertentu tanpa mengikuti prosedur sistematis yang kaku. Biasanya, narrative review mencakup pandangan umum mengenai teori, konsep, dan bukti dari berbagai studi yang telah diterbitkan sebelumnya (Green dkk., 2006). Narrative review cocok untuk topik-topik yang luas dan ketika peneliti ingin menyajikan pemahaman komprehensif tentang subjek tertentu. Yang kedua Systematic Review, Systematic review adalah jenis review literatur yang lebih terstruktur dan terorganisir dibandingkan narrative review. Dalam systematic review, peneliti mengikuti langkah-langkah sistematis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis semua penelitian yang relevan dengan pertanyaan penelitian

tertentu. Proses ini melibatkan pencarian literatur di basis data yang diakui secara akademik, serta penyeleksian studi yang sesuai dengan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan sebelumnya (Higgins & Green, 2011). Systematic review banyak digunakan dalam penelitian kesehatan dan ilmu sosial karena menyediakan hasil yang lebih terukur dan dapat diandalkan. Yang ketiga Meta-Analysis, Meta-analysis adalah salah satu jenis systematic review yang melibatkan analisis statistik dari hasil penelitian sebelumnya. Dalam meta-analysis, peneliti tidak hanya mengumpulkan dan mensintesis temuan, tetapi juga menggabungkan hasil kuantitatif dari berbagai penelitian untuk memperoleh kesimpulan yang lebih kuat secara statistik (Borenstein dkk., 2011). Jenis review ini sangat berguna ketika peneliti ingin menilai efektivitas atau hubungan antara variabel tertentu dengan menggunakan data yang terkumpul dari berbagai penelitian. yang keempat Scoping Review, Scoping review merupakan jenis review yang digunakan untuk memetakan literatur yang ada pada suatu topik atau bidang tertentu, terutama ketika topik tersebut masih baru atau belum banyak diteliti. Proses ini tidak seketat systematic review, karena tujuannya adalah untuk mengeksplorasi bukti yang tersedia dan mengidentifikasi gap dalam pengetahuan (Peters dkk., 2015). Scoping review sangat berguna dalam memberikan gambaran umum mengenai literatur yang tersedia, namun tidak berfokus pada sintesis kritis atau penilaian kualitas penelitian. yang kelima Integrative Review, Integrative review mencakup berbagai jenis penelitian (kuantitatif, kualitatif, teori, dan empiris) untuk memberikan tinjauan komprehensif tentang suatu topik. Jenis review ini memungkinkan integrasi berbagai metode untuk memberikan perspektif yang lebih luas mengenai suatu masalah atau fenomena. Integrative review sering digunakan dalam bidang-bidang yang kompleks atau multidisipliner, seperti penelitian kesehatan dan pendidikan (Whittemore & Knafl, 2005). dan yang terakhir Critical Review, Critical review melibatkan evaluasi kritis terhadap literatur yang ada, dengan tujuan tidak hanya mensintesis informasi tetapi juga memberikan interpretasi baru mengenai materi yang diulas. Peneliti sering menggunakan critical review untuk mengeksplorasi kelemahan dalam literatur sebelumnya dan memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai suatu topik (Grant & Booth, 2009).

Setiap jenis literature review memiliki tujuan dan metodologi yang berbeda, dan pemilihan jenis yang tepat bergantung pada tujuan penelitian serta bidang yang sedang diteliti. Narrative review lebih cocok untuk memberikan gambaran umum, sedangkan systematic review memberikan analisis yang lebih dalam dan terstruktur. Meta-analysis dan integrative review memungkinkan analisis kuantitatif dan integrasi berbagai jenis penelitian. Memahami berbagai jenis literature review membantu peneliti memilih pendekatan yang tepat sesuai dengan pertanyaan penelitian yang mereka hadapi.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Prosedur Analisis Data

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan data sekunder yaitu pengumpulan data tentang Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) di Indonesia yang sudah dipublikasikan dalam sepuluh tahun terakhir. Penelitian dimulai dari pengumpulan data mengenai CCUS di Indonesia, analisis data peningkatan emisi CO₂ di Indonesia tanpa CCUS dan dengan CCUS, dan analisa mengenai lokasi mana yang menjadi syarat dalam mengembangkan proyek CCUS. Proyek teknologi CCUS di Indonesia belum berjalan sepenuhnya, karena dari beberapa penelitian, masih dilakukan studi di beberapa lapangan minyak dan gas di Indonesia, namun besar kemungkinan teknologi CCUS akan segera berjalan, mengingat dampak dan potensi positifnya terhadap lingkungan dan pembangunan berkelanjutan di industri migas Indonesia.

Penelitian ini menggunakan metode scoping review, Scoping review adalah sebuah metode penelitian yang dirancang untuk memetakan konsep-konsep utama, jenis penelitian, serta bukti yang tersedia di suatu bidang tertentu. Scoping review bertujuan untuk memberikan gambaran komprehensif dan luas mengenai topik yang sedang diteliti, termasuk mengidentifikasi kesenjangan penelitian (research gaps) di dalam literatur. Berbeda dengan systematic review yang fokus pada mengevaluasi dan mengkritisi literatur dengan pendekatan yang lebih mendalam, scoping review lebih bersifat eksploratif, memberikan kerangka kerja yang jelas terkait dengan ruang lingkup dan tingkat perkembangan penelitian di suatu bidang tanpa melakukan penilaian kualitas secara mendetail terhadap setiap studi yang direview (Arksey & O'Malley, 2005). Metode ini sangat bermanfaat ketika suatu topik penelitian masih baru, luas, atau belum terlalu banyak diteliti sebelumnya, sehingga scoping review dapat membantu merumuskan konsep-konsep dasar, identifikasi bukti awal, dan penentuan kebutuhan penelitian selanjutnya (Munn dkk., 2018).

.Metode Scoping review di pilih karena CCUS (Carbon Capture, Utilization, and Storage) adalah teknologi yang sedang berkembang, dan penelitian mengenai implementasinya di Indonesia masih berada dalam tahap awal. Dengan begitu, metode scoping review lebih tepat karena memungkinkan eksplorasi luas terhadap literatur yang ada tanpa terbatas pada pertanyaan penelitian yang terlalu spesifik. Hal ini memungkinkan peneliti untuk memahami berbagai aspek penting dari implementasi CCUS seperti tantangan teknis, regulasi, dampak lingkungan, dan potensi ekonomi di Indonesia (Peters dkk., 2015).

. Dalam analisis data untuk Tugas Akhir dengan judul "Studi Literature Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) di Indonesia", teknik analisis yang digunakan akan mencakup langkah-langkah sistematis dan terstruktur berikut ini, yang akan disajikan dalam bentuk bagan alir:



3.2 Tahapan Pelaksanaan Scoping Review

1. Merumuskan Pertanyaan Penelitian (Formulating the Research Question)

Tahap pertama dalam systematic review adalah merumuskan pertanyaan penelitian yang jelas dan spesifik. Pertanyaan penelitian ini berfungsi sebagai panduan untuk menyusun literatur yang akan dievaluasi (Higgins & Green, 2011). Pertanyaan yang diajukan dalam penelitian ini adalah:

- Apa saja tantangan implementasi CCUS secara global dan Indonesia?
- Apa saja Dampak lingkungan dari CCUS ini yang telah dipelajari dan apa research gap saat ini untuk future study?
- Bagaimana stigma para ahli terkait dengan penerapan CCUS?

2. Menyusun Protokol Scoping Review

Protokol merupakan dokumen rencana penelitian yang merinci strategi pencarian, kriteria inklusi dan eksklusi, serta metode analisis data yang akan digunakan dalam systematic review. Protokol ini penting untuk menjaga transparansi dan replikasi penelitian (Moher dkk., 2009). Protokol yang digunakan mencakup:

- Kriteria inklusi: Studi yang relevan dengan CCUS di Indonesia, studi peer-reviewed, dan laporan yang mengandung data teknis atau ekonomi.

- Kriteria eksklusi: Studi yang tidak relevan, laporan opini, dan penelitian yang tidak melalui peer-review.

3. Pencarian Literatur

Pencarian literatur dilakukan di beberapa database ilmiah utama, yaitu Google Scholar, dan ScienceDirect. Google Scholar digunakan karena memiliki cakupan yang sangat luas, termasuk jurnal akademik, konferensi, disertasi, buku, paten, dan laporan teknis dari berbagai disiplin ilmu. Ini membuatnya menjadi alat yang sangat berguna untuk mencari literatur lintas disiplin, termasuk Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS). Ini sangat membantu dalam mendapatkan berbagai perspektif dari disiplin ilmu terkait seperti teknik, energi, dan lingkungan (Haddaway dkk., 2015). Dan ScienceDirect digunakan karena memiliki banyak jurnal spesialis dalam bidang sains, teknologi, teknik, dan kesehatan, yang merupakan sumber penting untuk topik teknis seperti CCUS. Database ini menyediakan artikel penelitian yang sangat relevan dengan aspek teknis seperti teknik injeksi CO₂, penyimpanan karbon di bawah tanah, dan teknologi pemanfaatan karbon yang sangat penting untuk proyek CCUS di Indonesia (Falagas dkk., 2008). Proses pencarian dilakukan dengan menggunakan kata kunci terkait seperti “Carbon Capture Utilization and Storage,” “Tantangan Implementasi CCUS,”

4. Penyaringan Studi (Screening Studies)

Setelah pencarian literatur dilakukan, langkah berikutnya adalah penyaringan studi. Studi-studi yang ditemukan kemudian disaring berdasarkan judul dan abstrak untuk memastikan bahwa hanya studi yang relevan dengan topik yang dimasukkan dalam analisis selanjutnya. (Petticrew & Roberts, 2006)

Tahapan penyaringan:

- Tahap 1: Penyaringan berdasarkan judul dan abstrak untuk mengecualikan penelitian yang tidak relevan. Seperti Literatur yang hanya menyinggung teknologi lain selain Carbon Capture, Utilization, and Storage (misalnya, energi terbarukan tanpa kaitan dengan CCUS) akan dikeluarkan karena tidak berhubungan langsung dengan tujuan penelitian.
- Tahap 2: Tinjauan penuh terhadap teks studi yang relevan untuk memastikan bahwa penelitian memenuhi kriteria inklusi.

5. Penilaian Kualitas Studi (Critical Appraisal)

Pada tahap ini, studi yang telah lolos tahap penyaringan akan dinilai kualitasnya dengan menggunakan alat Critical Appraisal Skills Programme (CASP). CASP adalah serangkaian

kriteria yang dirancang untuk membantu menilai validitas, kualitas, dan relevansi dari sebuah penelitian. Penilaian ini bertujuan untuk menilai validitas internal, potensi bias, dan kualitas data yang dilaporkan dalam studi-studi tersebut (Higgins dkk., 2011).

Tabel 3.1 penilaian kualitas literatur

Kriteria Penilaian	Pertanyaan Penilaian
Validitas Internal	Apakah metodologi yang digunakan relevan dan valid?
Potensi Bias	Apakah terdapat bias dalam pengambilan data atau interpretasi?
Relevansi Data	Apakah hasil penelitian relevan dengan topik yang diulas?

6. Sintesis Data (Data Synthesis)

Setelah penilaian kualitas dilakukan, data dari studi yang relevan akan digabungkan dan disintesis. Sintesis naratif adalah menggabungkan studi yang heterogen atau berbeda dalam metodologi. Fokusnya pada deskripsi dan pengorganisasian temuan tanpa analisis statistik yang mendalam (Popay dkk., 2006). ini digunakan dalam penelitian ini untuk membandingkan temuan dari berbagai studi dan memberikan gambaran menyeluruh tentang implementasi CCUS di Indonesia. Jika memungkinkan, dilakukan juga meta-analisis, meta analisis adalah Menggabungkan hasil studi yang serupa secara statistik dan memberikan kesimpulan kuantitatif tentang efek gabungan dari hasil penelitian (Borenstein dkk., 2009). Ini digunakan untuk studi yang menyertakan data kuantitatif terkait tantangan dan manfaat ekonomi (Petticrew & Roberts, 2006).

7. Analisis dan Interpretasi

Setelah semua data dikumpulkan, hasil dari systematic review ini akan dianalisis dan disimpulkan untuk memberikan wawasan tentang tantangan dan potensi implementasi CCUS di Indonesia. Hasil penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan rekomendasi kebijakan yang lebih baik dalam pengembangan teknologi CCUS di Indonesia.

3.3 Pengumpulan Literatur

Dalam penelitian literatur mengenai Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) di Indonesia, penggunaan peralatan khusus berupa instrumen fisik tidak diperlukan, mengingat sifat penelitian yang menganalisis data dan informasi yang sudah ada melalui dokumen-dokumen publikasi ilmiah. Oleh karena itu, deskripsi alat dalam konteks konvensional tidak relevan untuk bagian ini. Namun, beberapa 'alat' yang akan digunakan meliputi:

- Perangkat Lunak Manajemen Referensi: Untuk mengatur dan menyitir sumber-sumber literatur, perangkat lunak seperti EndNote atau Mendeley mungkin digunakan untuk menunjukkan pengelolaan sumber yang sistematis dan akurat.

- Platform Penelitian Online: Platform seperti Google Scholar, Science Direct dan Consensus akan menjadi alat utama untuk mengakses publikasi ilmiah, artikel jurnal, dan paten yang relevan dengan studi CCUS.
- Database Legislasi dan Regulasi: Database seperti HukumOnline atau situs resmi pemerintah akan digunakan untuk mengakses peraturan dan regulasi yang berkaitan dengan CCUS di Indonesia.

Dalam hal bahan, penelitian ini akan mengumpulkan data dari berbagai sumber yang terdiri dari:

- Dokumen Kebijakan dan Regulasi: Ini termasuk undang-undang, regulasi, dan kebijakan yang relevan dengan CCUS di Indonesia.
- Laporan Industri dan Analisis Teknis: Laporan dari organisasi internasional seperti International Energy Agency (IEA) atau dari kementerian dan lembaga terkait akan dianalisis untuk memperoleh wawasan tentang status dan prospek CCUS di Indonesia.
- Artikel Jurnal Ilmiah: Artikel-artikel dari jurnal peer-reviewed yang membahas perkembangan terkini, tantangan, dan peluang dalam penerapan CCUS.

Nama pabrik pembuat atau merek dagang dari alat dan bahan tidak akan disebutkan karena penelitian ini tidak melibatkan eksperimen di laboratorium atau penggunaan bahan kimia atau organisme spesifik.

Prosedur kerja yang akan diuraikan dalam penelitian ini akan mencakup metode pencarian dan seleksi literatur, kriteria inklusi dan eksklusi, serta pendekatan analitis yang digunakan untuk sintesis data. Metodologi penelitian ini dirancang untuk memastikan bahwa analisis literatur yang dilakukan bersifat komprehensif, sistematis, dan reproducible.

3.4 Kompilasi Data

Tahap ini melibatkan pengumpulan data dari sumber-sumber yang kredibel dan terpercaya, termasuk artikel jurnal yang ditinjau oleh rekan sejawat, laporan industri yang detail, serta dokumen kebijakan yang diterbitkan oleh badan-badan pemerintahan atau organisasi internasional. Tujuan dari tahap ini adalah untuk mengakumulasi basis data yang luas yang akan digunakan sebagai pondasi dari analisis penelitian.

3.5 Seleksi Data

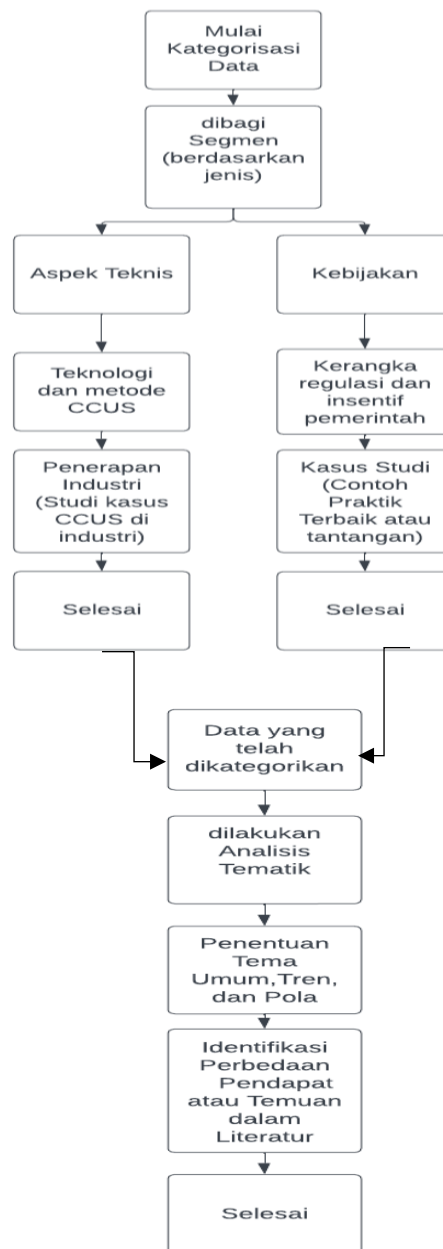
Tahap Data yang telah dikompilasi dari berbagai sumber akan disaring berdasarkan kriteria inklusi yang telah ditentukan untuk memastikan validitas dan relevansinya. Kriteria ini meliputi:

1. **Kebaruan Data:** Hanya data yang terbaru, yaitu yang dipublikasikan dalam lima tahun terakhir, yang akan dipertimbangkan untuk menjamin bahwa informasi tersebut adalah terkini dan mencerminkan kondisi serta perkembangan terbaru dalam teknologi CCUS.
2. **Relevansi dengan Topik CCUS di Indonesia:** Data yang dipilih harus secara langsung berkaitan dengan implementasi, pengembangan, dan tantangan CCUS di Indonesia. Ini mencakup studi kasus, laporan proyek, artikel ilmiah, dan publikasi lainnya yang membahas aspek teknis, ekonomi, lingkungan, dan regulasi dari CCUS di Indonesia.
3. **Validitas Sumber:** Data yang digunakan harus bersumber dari penelitian atau publikasi yang dapat dipercaya dan diakui secara akademis. Ini berarti data tersebut harus berasal dari jurnal ilmiah terindeks, laporan resmi pemerintah, organisasi internasional, atau institusi penelitian yang memiliki reputasi baik. Setiap sumber akan diverifikasi untuk memastikan bahwa metodologi penelitian yang digunakan sah dan hasilnya dapat diandalkan.
4. **Jenis Data:** Data yang diseleksi meliputi berbagai jenis informasi yang relevan seperti:
 - **Data Teknis:** Informasi mengenai teknologi penangkapan, transportasi, penyimpanan, dan pemanfaatan CO₂ yang digunakan atau diusulkan untuk digunakan di Indonesia.
 - **Data Ekonomi:** Analisis biaya dan manfaat dari implementasi CCUS, termasuk investasi awal, biaya operasional, dan potensi penghematan atau keuntungan jangka panjang.
 - **Data Lingkungan:** Dampak lingkungan dari penerapan CCUS, termasuk potensi pengurangan emisi CO₂ dan risiko lingkungan yang mungkin timbul.
 - **Data Regulasi:** Kebijakan dan regulasi yang mendukung atau menghambat penerapan CCUS di Indonesia, termasuk kerangka hukum yang ada dan usulan perubahan regulasi.



Gambar 3. 2 Diagram Alir Seleksi Data

3.6 Kategorisasi Data dan analisis Tematik



3.8 Pembandingan Data

Analisis Proses melibatkan analisis lebih lanjut dari data yang diperoleh dari berbagai sumber terkait CCUS di Indonesia. Berikut adalah perbandingan proses "Pembandingan Data" dengan proses penelitian tersebut:

1. Tujuan:

- "Pembandingan Data": Membandingkan data dari berbagai sumber untuk mengevaluasi konsistensi dan perbedaan di antara mereka, guna membangun pemahaman yang lebih komprehensif tentang subjek penelitian.
- Proses Penelitian: Menganalisis literatur, riset, dan sumber lainnya terkait CCUS di Indonesia untuk menyusun pemahaman yang mendalam tentang topik tersebut.

2. Fokus:

- "Pembandingan Data": Menyoroti tingkat konsistensi dan diskrepansi antara data dari berbagai sumber terkait CCUS di Indonesia.
- Proses Penelitian: Memusatkan perhatian pada pemahaman yang lebih baik tentang CCUS di Indonesia melalui analisis literatur yang luas dan beragam.

3. Pendekatan:

- "Pembandingan Data": Berfokus pada perbandingan data dari sumber-sumber yang berbeda untuk menyoroti persamaan dan perbedaan.
- Proses Penelitian: Melibatkan analisis mendalam dari berbagai literatur dan penelitian yang ada untuk menggali informasi yang relevan dan signifikan tentang CCUS di Indonesia.

4. Output:

- "Pembandingan Data": Menghasilkan pemahaman tentang tingkat konsistensi dan perbedaan antara data dari sumber-sumber yang berbeda terkait CCUS di Indonesia.
- Proses Penelitian: Menghasilkan pemahaman yang mendalam dan terperinci tentang situasi, tantangan, potensi, dan perkembangan terkini terkait CCUS di Indonesia, yang direpresentasikan dalam laporan Tugas Akhir

3.9 Sintesis Data

Tahap sintesis data akan melibatkan penggabungan dan integrasi temuan dari berbagai sumber literatur yang telah dianalisis sebelumnya. Proses ini akan dilakukan secara sistematis dan terstruktur, dengan menggunakan pendekatan tematik atau naratif, untuk mengidentifikasi pola, hubungan, dan kesimpulan yang muncul dari data.

- **Identifikasi Tema Utama:** Analisis akan dimulai dengan mengidentifikasi tema-tema utama yang muncul dari data, seperti potensi CCUS di Indonesia, tantangan implementasi, dampak lingkungan dan sosial, kerangka regulasi, serta studi kasus.
- **Pengelompokan Data:** Data yang relevan akan dikelompokkan berdasarkan tema-tema yang telah diidentifikasi.
- **Analisis Tematik:** Setiap tema akan dianalisis secara mendalam, dengan mengidentifikasi pola, tren, kontradiksi, dan kesimpulan yang muncul dari data.
- **Integrasi Temuan:** Temuan dari setiap tema akan diintegrasikan untuk membangun gambaran yang komprehensif dan koheren mengenai status dan prospek CCUS di Indonesia.

3.10 Evaluasi

Tahap evaluasi akan melibatkan penilaian kritis terhadap temuan yang telah disintesis, dengan mempertimbangkan relevansi, validitas, dan reliabilitas data dengan menggunakan metode yang ditunjukkan di bawah ini.

- **Relevansi:** Temuan akan dievaluasi berdasarkan relevansi terhadap tujuan penelitian dan pertanyaan penelitian yang telah ditetapkan.
- **Validitas:** Validitas temuan akan dinilai dengan mempertimbangkan kualitas metodologi penelitian yang digunakan dalam sumber literatur, serta konsistensi temuan dengan penelitian lain yang relevan.
- **Reliabilitas:** Reliabilitas temuan akan dinilai dengan mempertimbangkan konsistensi temuan dari berbagai sumber literatur, serta kemungkinan adanya bias atau keterbatasan dalam data.

3.11 Penarikan Kesimpulan

Tahap penarikan kesimpulan akan melibatkan sintesis akhir dari temuan yang telah dievaluasi, dengan tujuan untuk menjawab pertanyaan penelitian dan memberikan rekomendasi yang relevan.

- Ringkasan Temuan Kunci: Temuan-temuan kunci dari penelitian akan diringkas secara jelas dan ringkas.
- Jawaban Pertanyaan Penelitian: Pertanyaan penelitian yang telah ditetapkan akan dijawab secara langsung dan jelas, berdasarkan bukti yang diperoleh dari analisis data.
- Implikasi dan Rekomendasi: Implikasi dari temuan akan dianalisis, dan rekomendasi untuk praktik, kebijakan, atau penelitian lebih lanjut akan diberikan.
- Keterbatasan Penelitian: Keterbatasan penelitian akan diidentifikasi dan didiskusikan secara jujur, termasuk keterbatasan data, metodologi, atau ruang lingkup penelitian.
- Arah Penelitian Masa Depan: Arah penelitian masa depan yang potensial akan diidentifikasi, berdasarkan kesenjangan pengetahuan

BAB IV

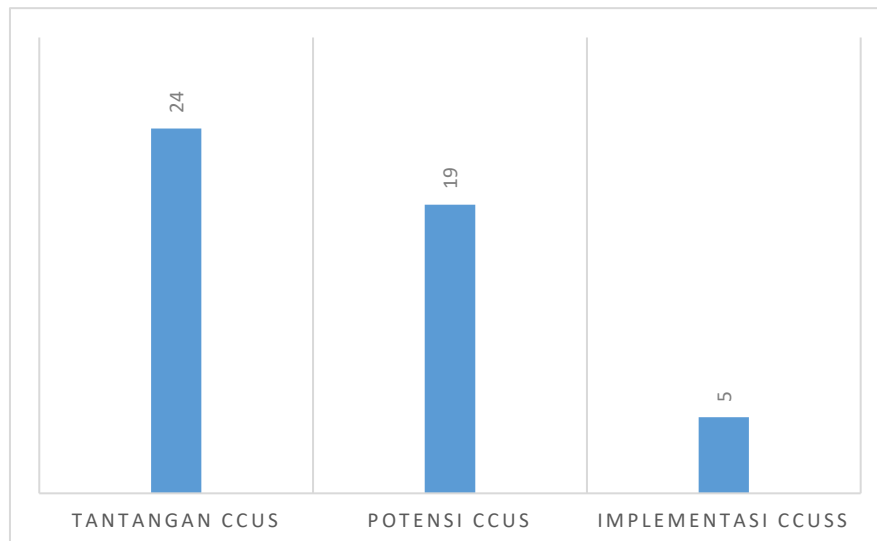
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Identifikasi Literatur

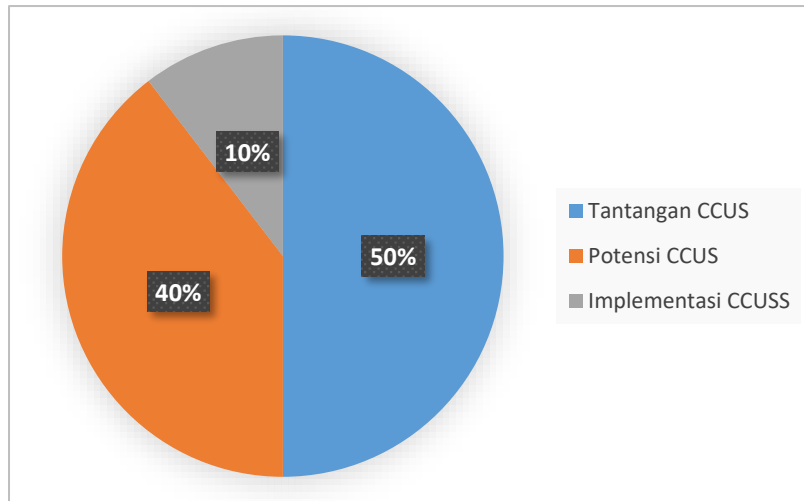
Penelitian ini menggunakan *Google Scholar* sebagai basis pencarian utama untuk mengumpulkan studi literatur terkait *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) di Indonesia. Kata kunci yang digunakan adalah "CCUS Indonesia," yang menghasilkan 10.300 artikel ilmiah pada hasil pencarian awal. Selanjutnya, hasil pencarian difilter untuk menyaring hanya artikel yang relevan dengan konteks penelitian, mengarahkan pada publikasi yang membahas implementasi, tantangan, dan perkembangan teknologi CCUS secara spesifik di Indonesia. Pada tahap ini, fitur pencarian di *Google Scholar* disesuaikan dengan "*Sort by Relevance*" untuk memastikan bahwa artikel yang muncul teratas memiliki keterkaitan yang kuat dengan topik CCUS di Indonesia. Pengaturan pencarian lainnya termasuk "*Any Type*," untuk memperluas cakupan sumber yang termasuk artikel, disertasi, laporan, dan sumber lainnya yang relevan, serta tidak mencentang "*Include Citations*" untuk menghindari artikel yang hanya dikutip tanpa konten penelitian asli yang relevan.

Dari hasil penyaringan ini, hanya 28 halaman pertama dari *Google Scholar* yang digunakan dalam pengambilan data. Pembatasan ini dilakukan karena hasil pencarian pada halaman selanjutnya cenderung menampilkan artikel yang kurang relevan atau mulai menyimpang dari fokus utama penelitian ini, yaitu penerapan dan studi CCUS di Indonesia. Oleh karena itu, dengan seleksi bertahap menggunakan filter relevansi, tipe publikasi, dan eksklusi kutipan, artikel yang didapatkan diharapkan memberikan wawasan yang komprehensif dan spesifik untuk mendukung pembahasan dan analisis dalam penelitian ini.

Gambar di bawah menunjukkan distribusi jumlah artikel ilmiah yang meneliti berbagai aspek penerapan teknologi Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) di Indonesia. Dari total 48 artikel ilmiah yang ditinjau, sebanyak 24 artikel berfokus pada tantangan CCUS, yang mencakup hambatan teknis, ekonomi, dan regulasi dalam implementasi teknologi ini. Ini menunjukkan bahwa tantangan dalam penerapan CCUS menjadi topik yang paling sering dibahas oleh para peneliti. Selanjutnya, 19 artikel menyoroti potensi CCUS dalam mendukung target net-zero emission di Indonesia. Artikel-artikel ini membahas peluang yang ditawarkan teknologi CCUS dalam pengurangan emisi karbon, serta bagaimana teknologi ini bisa menjadi solusi untuk mengatasi perubahan iklim. Terakhir, 5 artikel membahas implementasi CCUS yang sedang berlangsung, termasuk proyek-proyek pilot serta inisiatif di sektor industri untuk mulai menerapkan teknologi ini di lapangan. Meskipun jumlah artikel yang membahas implementasi masih relatif sedikit, ini menunjukkan bahwa penerapan nyata dari CCUS masih dalam tahap awal dan membutuhkan lebih banyak penelitian serta pengembangan. Secara keseluruhan, penelitian tentang CCUS di Indonesia lebih banyak difokuskan pada tantangan yang dihadapi dan potensi yang ditawarkan, dengan implementasi aktual yang masih terbatas. Hal ini menunjukkan pentingnya dukungan lebih lanjut dari berbagai pihak untuk mempercepat adopsi teknologi ini di masa depan.

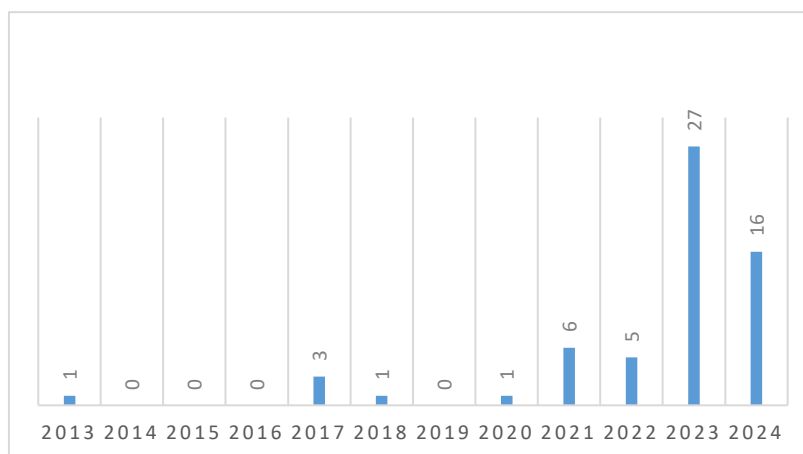


Gambar 4.1 Jumlah Artikel Ilmiah



Gambar 4.2 Presentase Artikel Ilmiah

Grafik di bawah menunjukkan jumlah artikel ilmiah yang diterbitkan per tahun dari tahun 2013 hingga 2024. Terlihat bahwa jumlah artikel yang membahas topik tertentu (misalnya, CCUS) mengalami peningkatan signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Pada periode awal, yakni dari tahun 2013 hingga 2020, jumlah publikasi masih relatif rendah dan sporadis, dengan hanya satu artikel yang diterbitkan di tahun 2013, 2018, dan 2020, serta tiga artikel di tahun 2017. Namun, mulai tahun 2021, terjadi kenaikan signifikan dengan enam artikel terbit pada tahun tersebut. Pada tahun 2023, jumlah publikasi mencapai puncaknya dengan 27 artikel yang diterbitkan, menunjukkan perhatian yang semakin besar dari para peneliti terhadap topik ini. Pada tahun 2024, meskipun belum selesai, terdapat 16 artikel yang sudah diterbitkan, yang menunjukkan tren peningkatan minat penelitian yang mungkin berlanjut. Secara keseluruhan, grafik ini mencerminkan tren peningkatan perhatian dan penelitian terhadap topik ini, terutama dalam tiga tahun terakhir



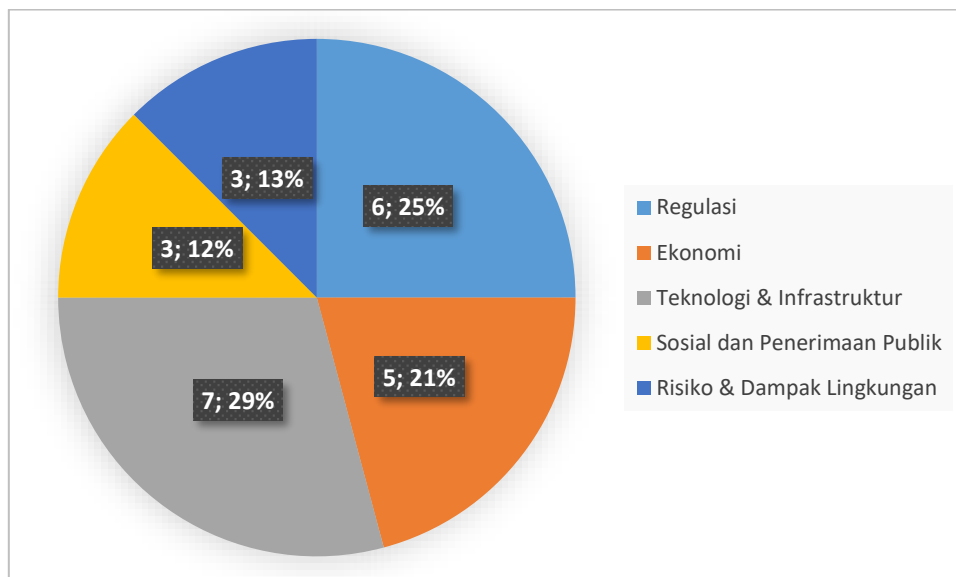
Tabel di lampiran 1 menyajikan hasil rekapitulasi pengumpulan studi literatur mengenai *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) di Indonesia, yang diambil dari 48 jurnal dengan fokus pada berbagai aspek implementasi, tantangan, potensi, dan peran CCUS dalam mencapai target emisi nol bersih. Setiap jurnal dianalisis berdasarkan beberapa indikator utama, yaitu Rumusan Masalah, Tantangan yang Dihadapi, Solusi yang Diajukan, serta Peran dan Potensi CCUS. Selain itu, tabel ini juga mencakup jurnal-jurnal yang secara spesifik membahas implementasi CCUS yang sedang berlangsung di Indonesia. Authors mencantumkan penulis dari setiap jurnal. Kolom *Title* dan *Publication Year* berisi judul dan tahun publikasi, memberikan gambaran umum mengenai relevansi waktu penelitian.

Tabel dilampiran dirancang untuk mengidentifikasi rekapitulasi kesenjangan penelitian serta menyediakan pemahaman mendalam tentang peran strategis, tantangan, dan upaya implementasi CCUS di Indonesia. Kolom Tantangan menguraikan tantangan spesifik yang diidentifikasi oleh para peneliti dalam implementasi CCUS di Indonesia, termasuk tantangan regulasi, teknis, dan infrastruktur., sedangkan kolom Solusi terhadap tantangan menyebutkan apakah solusi untuk tantangan tersebut diusulkan dalam jurnal. Selanjutnya, potensi CCUS untuk mencapai target emisi nol bersih di Indonesia. Kolom terakhir, apakah membahas implementasi, menyoroti implementasi CCUS yang sedang berlangsung di berbagai sektor industri, memberikan informasi penting mengenai sejauh mana penerapan teknologi ini telah berjalan dan hasil yang telah dicapai sejauh ini

4.2 Tantangan Implementasi CCUS secara Global dan di Indonesia

Dari 24 artikel ilmiah tentang tantangan CCUS Kategori yang paling banyak dibahas adalah Teknologi & Infrastruktur dengan 29% artikel ilmiah. Ini terjadi karena teknologi dan infrastruktur merupakan elemen kunci dalam pengembangan dan implementasi CCUS. Teknologi untuk menangkap, menyimpan, dan memanfaatkan karbon dioksida (CO₂) masih dalam tahap pengembangan yang intensif. Penelitian pada aspek teknis sangat diperlukan untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan biaya operasional CCUS. Oleh karena itu, topik ini menarik perhatian yang lebih besar dari peneliti karena signifikansinya dalam memastikan keberhasilan proyek CCUS.

Kategori yang paling sedikit dibahas adalah Sosial dan Penerimaan Publik serta Risiko & Dampak Lingkungan, masing-masing hanya memiliki 12 % dan 13 % artikel ilmiah. Rendahnya jumlah penelitian dalam kategori ini mungkin disebabkan oleh perhatian utama yang masih terfokus pada pengembangan teknologi dan kebijakan yang lebih mendesak. Sementara penerimaan publik dan risiko lingkungan adalah aspek penting, mereka sering kali dianggap sebagai tahap kedua dalam perkembangan teknologi baru. Setelah teknologi terbukti layak dan ekonomis, penelitian lebih lanjut tentang dampaknya terhadap masyarakat dan lingkungan akan berkembang.



Gambar 4.4 Jumlah dan Presentase kategori tantanga CCUS di Indonesia

Perkembangan penelitian tentang Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) di Indonesia telah mengalami kemajuan signifikan dari tahun ke tahun. Pada tahun 2017, penelitian difokuskan pada identifikasi potensi CCUS di Indonesia serta hambatan utama yang

berkaitan dengan aspek teknis dan regulasi, mencakup analisis biaya serta kerangka kebijakan yang diperlukan untuk implementasi teknologi CCS dan CCU (Adisaputro, 2017).

Pada periode 2021 hingga 2023, fokus penelitian beralih ke tantangan teknis yang dihadapi dalam lapangan, seperti evaluasi sumur untuk injeksi CO₂ dalam metode Enhanced Oil Recovery (CO₂-EOR/CCUS) (Marbun dkk 2021). Selain itu, penelitian di tahun 2022 menyoroti tantangan regulasi dan kesiapan Indonesia dalam implementasi CCUS untuk mendukung pengurangan emisi CO₂ nasional (Miyondri, 2022).

Pada tahun 2023, perhatian penelitian semakin difokuskan pada hambatan sosial, terutama penerimaan publik yang rendah terhadap teknologi CCUS. Studi ini mengeksplorasi sikap masyarakat Indonesia dan penerimaan mereka terhadap teknologi ini sebagai faktor penting dalam keberhasilan implementasi CCUS (Sitinjak, 2023). Secara keseluruhan, kemajuan penelitian ini mencerminkan kebutuhan akan pendekatan multidisipliner untuk mengatasi tantangan teknis, regulasi, dan sosial dalam implementasi CCUS di Indonesia.

Berikut ini adalah tabel yang merangkum tantangan dan hambatan utama dalam implementasi CCUS di Indonesia berdasarkan penelitian ilmiah:

Tabel 4. 1 Tantangan dan Hambatan dalam Implementasi CCUS di Indonesia

Kategori Hambatan	Deskripsi	Sumber
Regulasi	Keterbatasan regulasi spesifik yang mengatur aspek teknis CCUS, seperti injeksi CO ₂ dan pemantauan pasca-penyimpanan.	Miyondri (2022) Marbun et al. (2021) Sitinjak, Ebennezer, & Ober (2023) Adisaputro & Saputra (2017) Mulyasari et al. (2021) Best et al. (2011)
Ekonomi	Kurangnya insentif finansial dan biaya investasi yang tinggi membuat proyek CCUS sulit dilaksanakan tanpa dukungan ekonomi tambahan.	Raksawiguna et al. (2023) Aziz et al. (2023) Amelinda & Soekarno (2023) Adisaputro & Saputra (2017) Sambodo et al. (2022)
Teknologi	Keterbatasan infrastruktur dan teknologi yang diperlukan untuk operasionalisasi CCUS secara efektif dan aman.	Sambodo et al. (2022) Miyondri (2022) Marbun et al. (2021). Aziz et al. (2023) Indrasuta et al. (2023) Adisaputro & Saputra (2017) Sitinjak et al. (2023)
Sosial dan Penerimaan Publik	Resistensi sosial dan kurangnya pemahaman publik terhadap manfaat CCUS, serta kekhawatiran terhadap	Sitinjak et al. (2023) Mulyasari et al. (2021) Miyondri (2022)

	risiko yang ditimbulkan oleh teknologi ini.	
Risiko dan dampak Lingkungan	Penelitian menunjukkan bahwa risiko utama yang terkait dengan CCUS meliputi potensi kebocoran CO ₂ , dampak pada air tanah, dan kemungkinan terjadinya gempa bumi akibat aktivitas injeksi CO ₂ .	(Haszeldine dkk., 2020); (Marbun dkk., 2021); (Indrasuta dkk., 2023)

4.2.1 Regulasi

Teknologi *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) memiliki potensi besar dalam membantu Indonesia mencapai target pengurangan emisi karbon. Namun, kurangnya regulasi yang spesifik dan mendetail menjadi salah satu hambatan terbesar dalam implementasi teknologi ini di Indonesia. Tanpa kerangka hukum yang jelas, aspek penting dari CCUS, seperti prosedur injeksi CO₂, pemantauan pasca-penyimpanan, dan manajemen risiko, masih berada dalam area abu-abu yang dapat menghambat adopsi teknologi ini secara luas dan mengancam keberhasilannya (Marbun dkk., 2021). Ketidadaan standar yang jelas untuk proses injeksi CO₂, yang merupakan komponen kritis dari CCUS, menambah kompleksitas tantangan ini. Injeksi ini harus dilakukan dengan hati-hati, karena risiko seperti kebocoran atau induced seismicity dapat terjadi jika prosedur tidak diatur dengan baik (Rahman & Santoso, 2021).

Selain itu, pemantauan pasca-penyimpanan memerlukan regulasi yang lebih rinci untuk memastikan CO₂ yang diinjeksikan tetap terperangkap dengan aman di lokasi penyimpanan. Penggunaan teknologi canggih, seperti seismik 4D dan pemantauan gravitasi, sangat penting untuk mendeteksi potensi kebocoran, namun tanpa panduan regulasi yang jelas, risiko kebocoran dapat luput dari pengawasan dan merusak kepercayaan publik (Julius & Setiawan, 2021). Ketidakpastian regulasi ini juga berdampak pada minat investasi dan kolaborasi internasional, karena perusahaan cenderung enggan untuk berinvestasi dalam proyek CCUS di tengah ketidakpastian hukum, tanggung jawab lingkungan, dan risiko finansial yang mungkin timbul (Miyondri, 2022). Oleh karena itu, penting bagi pemerintah Indonesia untuk segera mengembangkan regulasi yang mendukung, yang tidak hanya melindungi lingkungan tetapi juga mempercepat adopsi CCUS dengan standar yang setara dengan negara-negara lain (Rahman & Santoso, 2021).

Tabel 4.2 Kebijakan terkait CCUS

No	Kebijakan/Regulasi	Tahun	Deskripsi	Keterkaitan dengan CCUS
1	Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 22/2019	2019	Inventarisasi dan mitigasi emisi di sektor energi	Kebijakan ini relevan dengan CCUS karena mengatur mitigasi emisi karbon di sektor energi, yang dapat didukung oleh teknologi CCUS dalam upaya pengurangan emisi karbon.
2	Peraturan Presiden No. 98/2021	2021	Nilai ekonomi karbon	Dengan menerapkan nilai ekonomi karbon (NEK), kebijakan ini mendorong penerapan CCUS melalui insentif ekonomi, membuat teknologi ini lebih menarik dan layak secara finansial bagi industri.

4.2.2 Ekonomi

Implementasi teknologi *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) di Indonesia memerlukan investasi yang besar karena setiap tahap dalam proses ini—penangkapan, transportasi, dan penyimpanan CO₂—memerlukan infrastruktur yang canggih dan biaya operasional berkelanjutan. Biaya tinggi ini menjadi salah satu hambatan utama dalam adopsi CCUS, terutama karena sektor swasta sering enggan untuk berinvestasi dalam teknologi yang masih berisiko tinggi dan membutuhkan modal besar (Aziz dkk., 2023). Dalam setiap proyek CCUS, penangkapan CO₂ dapat mencapai hingga 60-70% dari total biaya, khususnya karena kebutuhan untuk memurnikan CO₂ dari sumber emisi yang bervariasi, seperti pembangkit listrik, pabrik semen, dan kilang minyak (Aziz dkk., 2023).

Selain biaya penangkapan, biaya transportasi dan penyimpanan juga cukup tinggi, terutama jika jarak antara sumber emisi dan lokasi penyimpanan jauh, mengingat infrastruktur energi di Indonesia masih terbatas di beberapa daerah (IEA, 2020). Di banyak negara maju, insentif fiskal seperti kredit pajak dan kredit karbon telah digunakan untuk mendukung CCUS, seperti program 45Q di Amerika Serikat yang memberikan kredit per ton CO₂ yang berhasil disimpan, sebuah model yang dapat diadaptasi oleh Indonesia untuk meningkatkan investasi CCUS (Global CCS Institute, 2021). Kebijakan fiskal yang mendukung, seperti insentif pajak dan kredit karbon, serta penggunaan Green Bonds, dapat membantu perusahaan dalam menutupi sebagian biaya, yang pada gilirannya dapat meningkatkan daya tarik

investasi dan mempercepat implementasi CCUS di Indonesia (World Bank, 2020). Implementasi CCUS di Indonesia menghadapi tantangan ekonomi yang signifikan, tetapi dengan kebijakan fiskal yang tepat, Indonesia dapat meningkatkan investasi di sektor CCUS dan mempercepat upaya mitigasi perubahan iklimnya (Aziz dkk., 2023).

4.2.3 Teknologi

Teknologi *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) di Indonesia memiliki potensi besar untuk membantu negara mencapai target pengurangan emisi karbonnya. Namun, penerapan teknologi ini memerlukan infrastruktur canggih dan keahlian teknis yang tinggi, yang menjadi tantangan besar bagi Indonesia karena keterbatasan teknologi dan infrastruktur yang ada. Penangkapan CO₂ dari sumber emisi memerlukan metode yang sangat efisien, seperti *post-combustion capture*, *pre-combustion capture*, dan *oxy-fuel combustion*, yang memerlukan teknologi canggih dan sering kali mahal untuk diimplementasikan di sektor-sektor industri di Indonesia (Miyondri, 2022).

Di samping itu, proses penyimpanan CO₂ di formasi geologi juga memerlukan infrastruktur yang mampu menjaga stabilitas CO₂ untuk waktu yang sangat panjang serta sistem pemantauan berkelanjutan untuk mengantisipasi risiko kebocoran yang dapat berdampak pada ekosistem. Kondisi geologi yang bervariasi di Indonesia menciptakan tantangan logistik untuk transportasi dan penyimpanan CO₂, di mana pengembangan jaringan pipa atau moda transportasi lainnya memerlukan investasi yang sangat besar serta koordinasi antarwilayah yang kompleks. Untuk mengatasi hal ini, diperlukan penelitian dan pengembangan (R&D) yang berfokus pada inovasi yang dapat mengurangi biaya teknologi CCUS di Indonesia (Rahman & Santoso, 2021). Selain itu, meningkatkan kapasitas teknis tenaga kerja lokal melalui program pelatihan dan kolaborasi internasional juga menjadi prioritas untuk mempercepat adopsi teknologi ini. Kemitraan dengan negara-negara maju dapat membantu Indonesia mengakses teknologi terbaru, melibatkan transfer pengetahuan, dan memberikan dukungan finansial melalui bantuan internasional atau investasi asing. Upaya ini sangat penting agar teknologi CCUS dapat diadopsi secara efektif di Indonesia, yang pada akhirnya dapat mendukung pencapaian target emisi karbon secara nasional (Global CCS Institute, 2021).

4.2.4 Sosial dan Penerimaan Publik

Dalam upaya menerapkan teknologi *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) di Indonesia, penerimaan sosial dan dukungan publik memegang peranan penting. Teknologi CCUS menawarkan potensi besar untuk mengurangi emisi karbon dan membantu Indonesia mencapai target iklim. Namun, ada tantangan signifikan dari aspek sosial, termasuk resistensi publik yang muncul akibat kurangnya pemahaman masyarakat tentang teknologi ini dan kekhawatiran terkait risiko potensial yang ditimbulkan oleh CCUS (Sitinjak et al., 2023). Misalnya, resistensi publik telah diamati di beberapa negara, di mana proyek CCUS dibatalkan setelah penolakan masyarakat lokal yang khawatir akan risiko kesehatan dan keselamatan. Di Belanda, proyek penyimpanan CO₂ di Barendrecht dihentikan pada 2010 setelah protes publik yang sebagian besar dipicu oleh kekhawatiran tentang keselamatan dan kurangnya keterlibatan publik dalam pengambilan keputusan (Van Alphen et al., 2010).

Pendekatan yang efektif untuk mengatasi resistensi sosial ini adalah dengan melibatkan masyarakat melalui kampanye edukasi dan keterlibatan dalam tahap perencanaan. Edukasi publik yang memberikan informasi yang akurat dan mudah dipahami tentang cara kerja CCUS, manfaat potensialnya, serta metode pengelolaan risiko seperti kebocoran CO₂ dan dampak seismik, menjadi sangat penting (IEA, 2021). Di Kanada, misalnya, proyek Quest CCUS di Alberta berhasil diterima masyarakat karena didukung kampanye edukasi yang kuat dan keterlibatan publik sejak tahap awal perencanaan. Selain edukasi, transparansi informasi dan keterbukaan terhadap hasil pemantauan proyek sangat membantu dalam membangun kepercayaan publik. Dengan memberikan akses terhadap data pemantauan yang menunjukkan keamanan penyimpanan CO₂, kekhawatiran publik dapat diminimalisasi, sehingga kepercayaan terhadap teknologi ini meningkat (Munkejord et al., 2016; Benson et al., 2012).

4.2.5 Risiko & dampak lingkungan CCUS

Salah satu dampak lingkungan paling signifikan dari kebocoran CO₂ dari tempat penyimpanan bawah tanah adalah potensi kontaminasi air tanah. Air tanah merupakan sumber daya penting bagi keperluan domestik, pertanian, dan industri. Kebocoran CO₂ dapat mengkontaminasi air tanah dengan membentuk asam karbonat (H₂CO₃), yang

meningkatkan keasaman dan menurunkan pH air tanah. Proses ini dapat melarutkan mineral dari batuan, termasuk logam berat seperti arsenik dan timbal, yang berbahaya bagi kesehatan manusia dan tanaman (Handyarso, 2023). Selain itu, pengasaman air tanah juga mengganggu keseimbangan kimiawi yang mendukung organisme mikroba, berpotensi menurunkan kualitas tanah dan air serta memengaruhi produktivitas pertanian dan keberlanjutan ekosistem lokal (Rahman & Santoso, 2021).

Kontaminasi air tanah juga membawa implikasi serius bagi masyarakat yang bergantung pada sumber daya ini. Air tanah adalah sumber utama air minum di banyak daerah, dan pencemarannya oleh asam karbonat dan logam berat dapat menyebabkan risiko kesehatan seperti kanker dan gangguan ginjal (Handyarso, 2023). Ketergantungan pada air tanah untuk irigasi mengakibatkan kontaminasi yang merusak produktivitas pertanian, sehingga tanaman dapat mengalami penurunan hasil atau mati, mengancam ketahanan pangan (IEA, 2020). Selain dampak langsung pada manusia, kontaminasi air tanah dapat merusak ekosistem lokal dengan membawa kontaminan ke sungai dan danau, yang dapat menyebabkan kematian massal ikan dan mengurangi keanekaragaman hayati (Schlumberger, 2020).

4.3 Dampak Lingkungan dari CCUS

Penelitian tentang dampak lingkungan dari teknologi *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) menunjukkan perkembangan yang signifikan dari tahun ke tahun. Pada tahun 2021, fokus utama penelitian adalah pada evaluasi teknis dan metode identifikasi risiko lingkungan di sektor CCUS dan sektor industri lainnya (Marbun dkk, 2021). Kemudian, pada tahun 2023, perhatian para peneliti beralih ke karakterisasi penyimpanan geologis dan penerimaan publik terhadap teknologi CCUS. Selain itu, studi tahun ini juga mencakup evaluasi risiko terkait dengan injeksi CO₂ di lokasi penyimpanan yang berpotensi menimbulkan dampak lingkungan (Handyarso, 2023). Studi lain di tahun yang sama juga mengkaji aspek ekonomi dari proyek integrasi CCUS, dengan fokus pada risiko injeksi CO₂ dan dampaknya terhadap lingkungan (Raksawiguna, 2023). Penelitian ini memberikan wawasan mendalam mengenai tantangan teknis, risiko lingkungan, dan persepsi publik yang menjadi faktor kunci dalam implementasi teknologi CCUS

Tabel 4. 3 Evaluasi Risiko dan Dampak Lingkungan CCUS di Indonesia

Aspek	Risiko/Dampak	Keterangan	Sumber
Kebocoran CO ₂	Risiko kebocoran CO ₂ dari tempat penyimpanan bawah tanah	Dapat menyebabkan kontaminasi air tanah dan meningkatkan	(Haszeldine dkk., 2020); (Marbun dkk., 2021);

			konsentrasi CO ₂ di atmosfer	(Indrasuta dkk., 2023)
Dampak pada Tanah	Potensi kontaminasi air tanah dari kebocoran CO ₂	CO ₂ yang bocor dapat bereaksi dengan air tanah, menyebabkan pengasaman dan kontaminasi air		(Benson & Cole, 2008); (Handyarso, 2023)
Dampak Seismik	Peningkatan risiko gempa bumi akibat injeksi CO ₂ ke dalam formasi geologi	Aktivitas injeksi CO ₂ dapat memicu pergeseran lapisan tanah yang berpotensi menyebabkan gempa		(Zoback & Gorelick, 2012); (Haszeldine dkk., 2020)
Efek Jangka Panjang	Dampak terhadap ekosistem lokal akibat kegagalan infrastruktur atau kegagalan sistem penyimpanan jangka panjang	Kegagalan sistem penyimpanan dapat menyebabkan kerusakan ekosistem yang tidak dapat diperbaiki		(Haszeldine dkk., 2020); (Benson & Cole, 2008); (Indrasuta dkk., 2023)

4.3.1 Kebocoran CO₂

Kebocoran CO₂ dari tempat penyimpanan bawah tanah adalah salah satu risiko utama dalam implementasi teknologi Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS). Risiko ini menjadi perhatian serius karena dampak potensialnya yang signifikan terhadap lingkungan, kesehatan masyarakat, dan keberlanjutan jangka panjang dari proyek CCUS. Oleh karena itu, memahami risiko ini serta mengembangkan strategi untuk meminimalkan dan mengelolanya adalah langkah penting dalam memastikan keberhasilan teknologi CCUS. Kebocoran CO₂ dari tempat penyimpanan bawah tanah dapat menyebabkan berbagai masalah lingkungan yang serius. Salah satu dampak langsung adalah kontaminasi air tanah. Ketika CO₂ bocor ke dalam akuifer air tawar, ia dapat meningkatkan keasaman air (menurunkan pH), yang dapat melarutkan mineral beracun seperti logam berat dari batuan sekitarnya. Kontaminasi ini tidak hanya membahayakan kualitas air minum tetapi juga dapat merusak ekosistem air tawar yang bergantung pada keseimbangan kimiawi tertentu (Handyarso, 2023). Kebocoran CO₂ dari penyimpanan bawah tanah dapat terjadi jika integritas geologis tidak dipastikan dengan baik. Kebocoran ini tidak hanya mengurangi efisiensi penyerapan karbon, tetapi juga dapat menyebabkan pelepasan CO₂ kembali ke atmosfer, yang pada gilirannya merusak tujuan utama dari teknologi CCUS dalam mitigasi emisi karbon (Haszeldine dkk., 2020).

Selain kontaminasi air, kebocoran CO₂ juga dapat meningkatkan konsentrasi gas ini di atmosfer jika tidak tertangani dengan baik. CO₂ adalah gas rumah kaca

utama yang berkontribusi terhadap pemanasan global. Oleh karena itu, setiap kebocoran dari tempat penyimpanan bawah tanah dapat mengurangi efektivitas CCUS sebagai strategi mitigasi perubahan iklim. Hal ini sangat penting karena tujuan utama dari teknologi CCUS adalah untuk mengurangi jumlah CO₂ yang dilepaskan ke atmosfer, dan kebocoran dapat mengurangi atau bahkan membalikkan manfaat ini (IEA, 2020). Untuk mengurangi risiko kebocoran CO₂, diperlukan teknologi penyimpanan yang andal serta strategi pemantauan yang ketat. Teknologi penyimpanan yang efektif biasanya melibatkan penyimpanan CO₂ dalam formasi geologis yang dalam, seperti formasi batuan berpori atau ladang minyak yang sudah tidak produktif. Formasi ini harus memiliki lapisan penutup alami yang tidak tembus air (cap rock) yang dapat mencegah CO₂ naik ke permukaan (Marbun dkk., 2021).

4.3.2 Dampak pada Air Tanah

Salah satu dampak lingkungan yang paling signifikan dari kebocoran CO₂ dari tempat penyimpanan bawah tanah adalah potensi kontaminasi air tanah. Air tanah adalah sumber daya alam yang sangat penting, terutama di wilayah yang bergantung pada air tanah untuk keperluan domestik, pertanian, dan industri. Kebocoran CO₂ yang menyebabkan kontaminasi air tanah dapat memiliki konsekuensi serius bagi kesehatan masyarakat, keberlanjutan lingkungan, dan kesejahteraan ekonomi lokal. Ketika CO₂ yang bocor masuk ke dalam akuifer atau lapisan air tanah, ia dapat bereaksi dengan air membentuk asam karbonat (H₂CO₃), meningkatkan keasaman air tanah (menurunkan pH). Hal ini menyebabkan air tanah dapat melarutkan mineral dari batuan, termasuk logam berat seperti arsenik, timbal, dan merkuri, yang bisa mencemari air sehingga tidak layak untuk diminum atau digunakan dalam irigasi, membahayakan kesehatan manusia dan tanaman (Handyarso, 2023).

Pengasaman air tanah ini juga mengganggu ekosistem, karena banyak mikroorganisme yang berperan dalam siklus nutrisi tanah dan air terpengaruh oleh perubahan kimia tersebut. Dampak lainnya adalah pada sektor pertanian, di mana air tanah yang tercemar logam berat dapat merusak produktivitas tanaman, yang pada gilirannya mengancam ketahanan pangan dan ekonomi masyarakat setempat. Selain itu, kontaminasi air tanah juga dapat menyebar ke ekosistem air permukaan, menyebabkan penurunan kualitas air dan mengancam keanekaragaman hayati. Oleh karena itu, pemantauan yang ketat dan strategi mitigasi yang efektif, seperti

pemilihan lokasi penyimpanan dengan formasi geologi yang tepat dan teknologi penyimpanan yang dirancang untuk mencegah kebocoran, sangat diperlukan untuk mendeteksi dan mencegah kontaminasi sejak dini (Rahman & Santoso, 2021).

4.3.3 Dampak Seismik

Injeksi CO₂ ke dalam formasi geologi dalam, yang merupakan bagian dari teknologi CCUS (Carbon Capture, Utilization, and Storage), memiliki risiko terjadinya induced seismicity, yaitu gempa bumi yang diakibatkan oleh injeksi fluida ke dalam bumi (Marbun dkk., 2021). Hal ini terjadi ketika injeksi CO₂ meningkatkan tekanan pori di dalam batuan, yang dapat mengurangi kekuatan gesekan pada patahan dan menyebabkan pergeseran lapisan tanah, memicu gempa bumi. Risiko ini tidak selalu menghasilkan gempa signifikan, tetapi tetap harus diperhitungkan dalam perencanaan proyek CCUS. Evaluasi geologis yang cermat dan penggunaan teknologi seperti data seismik 3D dan pemodelan geomekanik penting untuk memahami struktur bawah permukaan dan meminimalkan risiko seismik sebelum injeksi dimulai (Handyarso, 2023).

Lokasi penyimpanan yang ideal untuk injeksi CO₂ adalah daerah dengan tekanan pori stabil dan jauh dari patahan aktif (Rahman & Santoso, 2021). Setelah injeksi dimulai, pemantauan seismik yang berkelanjutan, menggunakan alat seperti seismograf mikro, diperlukan untuk mendeteksi perubahan aktivitas seismik. Jika risiko meningkat, injeksi dapat disesuaikan untuk mengurangi tekanan pada formasi batuan. Selain itu, kontrol laju dan volume injeksi serta strategi pengurangan risiko lainnya, seperti injeksi bertahap dan redistribusi fluida, dapat membantu menghindari terjadinya gempa bumi yang lebih besar. Dengan evaluasi geologi dan pemantauan ketat, risiko seismik dapat diminimalkan, mendukung implementasi aman teknologi CCUS (Schlumberger, 2020).

4.3.4 Efek Jangka Panjang

Penyimpanan CO₂ dalam formasi geologi bawah tanah sebagai bagian dari teknologi Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) merupakan solusi potensial untuk mengurangi emisi karbon dioksida dan mitigasi perubahan iklim (IEA, 2020). Namun, tantangan signifikan terkait dengan risiko kegagalan infrastruktur penyimpanan, seperti kebocoran sumur injeksi atau perubahan tekanan geologi, dapat berdampak buruk pada lingkungan dan ekosistem lokal. Kebocoran CO₂ yang tidak terdeteksi dapat menyebabkan kontaminasi air tanah dan peningkatan keasaman tanah yang mengganggu keseimbangan ekosistem,

mempengaruhi produktivitas pertanian, dan mengancam keanekaragaman hayati (Handyarso, 2023).

Untuk meminimalkan risiko tersebut, pemantauan berkelanjutan dan pengelolaan infrastruktur yang proaktif sangat penting. Teknologi pemantauan modern seperti seismik 4D dan sensor kimia dapat mendeteksi perubahan kondisi geologi secara real-time, memungkinkan tindakan korektif segera diambil sebelum masalah membesar (Julius & Setiawan, 2021).. Selain itu, regulasi yang ketat dan kebijakan pendukung perlu diterapkan, termasuk inspeksi rutin, perawatan sumur injeksi, dan pengembangan rencana tanggap darurat untuk memastikan pengelolaan risiko jangka panjang yang efektif dalam proyek penyimpanan CO₂ (Handyarso, 2023).

4.4 Research Gap dalam Dampak Lingkungan CCUS

Meskipun banyak penelitian telah dilakukan tentang dampak lingkungan dari teknologi *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS), masih terdapat sejumlah *research gap* yang signifikan. Mengatasi kesenjangan ini sangat penting untuk memastikan bahwa teknologi ini dapat diterapkan secara luas dan aman dalam jangka panjang, terutama dalam konteks skala besar. Tabel dibawah ini menunjukkan fokus rekomendasi studi lanjut yang disarankan oleh penulis jurnal.

Tabel 4.4 Rekomendasi Studi Lanjut

No.	Judul Jurnal	Fokus Rekomendasi Studi Lanjut	Penulis	Tahun	Sumber
1	<i>A Patent Bibliometric Analysis of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Technology</i>	Studi lebih lanjut tentang perkembangan inovasi CCUS secara global, khususnya pada dampak lingkungan dan distribusi teknologi	Yaozong Zhu et al.	2023	(Yaozong Zhu et al., 2023)
3	<i>CCUS evaluation and simulation in a Chinese oil field</i>	Evaluasi ekonomi dan lingkungan untuk proyek CCUS di ladang minyak, relevan untuk panduan keputusan pemerintah	Shijian Lu et al.	2018	(Shijian Lu et al., 2018)
5	<i>Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Oxyfuel and Post-combustion Capture</i>	Studi perbandingan lingkungan antara teknologi Oxyfuel dan post-combustion capture dengan CCUS	G. Oreggioni et al.	2017	(G. Oreggioni et al., 2017)

6	<i>Future Technology Mix—Enhanced Geothermal System and CCUS</i>	Kombinasi teknologi geothermal dan CCUS yang berpotensi memberikan manfaat lingkungan besar	A. Sowizdzał et al.	2022	(A. Sowizdzał et al., 2022)
7	<i>Community acceptance and social impacts of CCUS projects</i>	Penerimaan publik dan dampak sosial dari proyek CCUS serta keterlibatan komunitas	Jacob A E Nielsen et al.	2022	(<u>Jacob A E Nielsen et al., 2022</u>)

1. Pemantauan Jangka Panjang

Salah satu *research gap* terbesar dalam implementasi CCUS adalah kurangnya data tentang dampak jangka panjang dari penyimpanan CO₂. Sebagian besar proyek CCUS yang ada masih dalam tahap awal atau baru berjalan selama beberapa tahun, dan hanya sedikit penelitian yang mengevaluasi stabilitas geologis dari tempat penyimpanan CO₂ selama beberapa dekade atau bahkan abad. Hal ini menjadi perhatian utama karena perubahan kondisi geologi dalam jangka panjang bisa berdampak pada keamanan penyimpanan CO₂. Oleh karena itu, diperlukan lebih banyak studi yang fokus pada pemantauan jangka panjang untuk memastikan bahwa CO₂ tetap tersimpan secara aman tanpa menyebabkan kebocoran atau perubahan struktur geologis yang tidak terduga. Pemantauan semacam ini juga akan membantu memastikan bahwa teknologi CCUS tidak menimbulkan dampak lingkungan yang merugikan di masa depan (Haszeldine dkk., 2020).

Pemantauan jangka panjang juga relevan dalam mengevaluasi potensi kerusakan ekosistem di sekitar lokasi penyimpanan CO₂. Studi yang mengukur efek interaksi jangka panjang CO₂ dengan formasi batuan dan air tanah sangat penting untuk mengetahui apakah penyimpanan CO₂ dapat dilakukan tanpa mempengaruhi kualitas air tanah atau memicu aktivitas seismik. Oleh karena itu, penelitian yang menyelidiki interaksi kimia dan fisik dalam formasi geologis di mana CO₂ disimpan sangat diperlukan untuk mendapatkan gambaran lengkap tentang keamanan penyimpanan jangka panjang (Benson & Cole, 2008).

2. Simulasi Risiko Lingkungan

Sebagian besar penelitian yang ada tentang risiko lingkungan dalam proyek CCUS hanya berfokus pada simulasi laboratorium atau menggunakan model yang tidak mencerminkan kondisi lapangan secara realistis. Simulasi laboratorium seringkali dilakukan dalam skala kecil dan dalam kondisi yang ideal, yang tidak sepenuhnya mencerminkan skenario lapangan sebenarnya. Dalam kenyataannya, formasi geologi,

tekanan, suhu, dan kondisi lainnya dapat bervariasi secara signifikan di lapangan. Oleh karena itu, penelitian yang lebih terfokus pada simulasi risiko lingkungan yang mencerminkan kondisi lapangan nyata sangat diperlukan.

Misalnya, risiko kebocoran CO₂ dari tempat penyimpanan di berbagai kondisi geologis masih perlu dipelajari lebih lanjut. Simulasi yang mencakup berbagai jenis formasi batuan, tekanan penyimpanan, dan potensi migrasi CO₂ ke permukaan dapat memberikan wawasan lebih dalam tentang bagaimana risiko kebocoran dapat dikurangi atau dicegah. Penelitian semacam ini akan memungkinkan pengembangan tindakan mitigasi yang lebih efektif dan akurat dalam menangani potensi risiko lingkungan dari CCUS (Marbun dkk., 2021).

3. Efek Terhadap Keanekaragaman Hayati

Penelitian yang berfokus pada dampak CCUS terhadap keanekaragaman hayati, terutama di ekosistem laut dalam, masih sangat terbatas. Hal ini penting untuk dipelajari karena banyak proyek CCUS mempertimbangkan opsi penyimpanan CO₂ di bawah dasar laut. Penyimpanan di lingkungan laut dalam menimbulkan sejumlah pertanyaan terkait perubahan kimia dan dampak biologis yang mungkin terjadi pada flora dan fauna laut.

Penelitian yang ada cenderung berfokus pada perubahan kimia, seperti pengasaman air laut akibat CO₂ yang bocor, sementara dampak langsung terhadap organisme laut, seperti ikan, karang, dan plankton, belum banyak dipelajari. Efek dari penyimpanan CO₂ di laut dalam, baik dari sisi ekosistem mikro maupun makro, harus dianalisis secara menyeluruh untuk memahami bagaimana emisi yang disimpan dapat mempengaruhi keanekaragaman hayati di wilayah-wilayah tersebut (Sitinjak dkk., 2022). Hal ini penting mengingat potensi dampak jangka panjang terhadap rantai makanan laut dan keseimbangan ekosistem.

4. Teknologi Pemantauan Kebocoran

Saat ini, teknologi untuk memantau kebocoran CO₂ dari tempat penyimpanan masih memiliki keterbatasan. Kebanyakan teknologi yang ada saat ini hanya mampu mendeteksi kebocoran besar, sementara kebocoran skala kecil sering kali terlewatkan. Deteksi dini kebocoran kecil sangat penting untuk menghindari kerusakan lingkungan yang lebih besar, seperti pencemaran air tanah atau peningkatan konsentrasi CO₂ di udara sekitar.

Teknologi seperti sensor serat optik dan pemantauan seismik dapat menjadi solusi yang lebih sensitif dalam mendeteksi kebocoran kecil sebelum berkembang

menjadi masalah besar. Selain itu, pengembangan teknologi pemantauan jarak jauh dan pengawasan secara real-time akan memungkinkan deteksi dini kebocoran CO₂ sehingga tindakan mitigasi dapat segera diambil untuk meminimalkan dampak lingkungan (Benson & Cole, 2008).

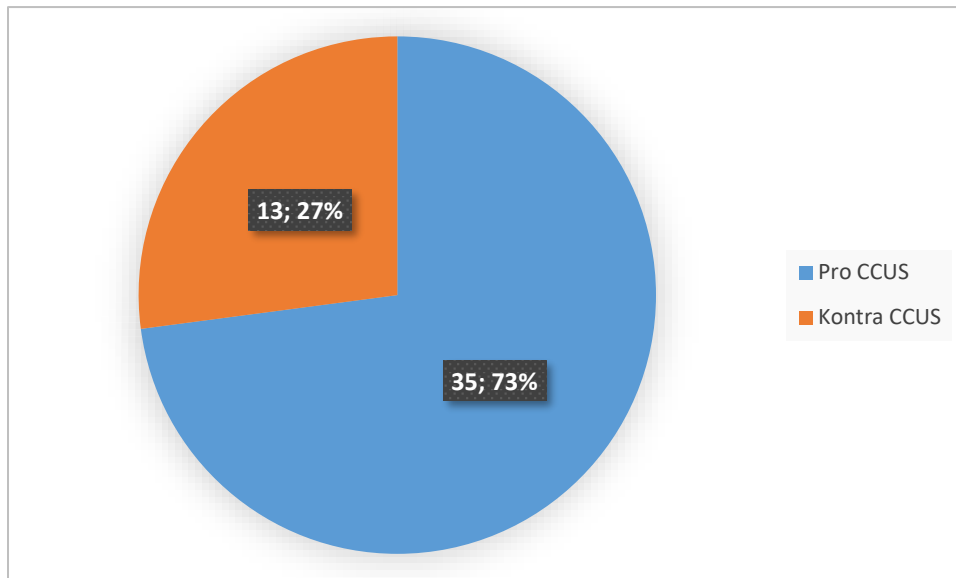
Berdasarkan *research gap* yang telah diidentifikasi, berikut adalah beberapa rekomendasi untuk penelitian di masa depan terkait dampak lingkungan CCUS:

- **Pemantauan Jangka Panjang:** Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengembangkan metode pemantauan yang dapat memastikan stabilitas geologis penyimpanan CO₂ selama beberapa dekade atau lebih. Teknologi pemantauan harus ditingkatkan untuk memberikan pengawasan terus-menerus di lokasi penyimpanan.
- **Simulasi Risiko Lapangan:** Simulasi lapangan yang lebih realistis harus dikembangkan untuk mengevaluasi risiko kebocoran CO₂ dan potensi migrasi ke permukaan, terutama dalam berbagai kondisi geologis yang ada di Indonesia.
- **Dampak pada Keanekaragaman Hayati:** Penelitian yang berfokus pada dampak biologis terhadap flora dan fauna laut di sekitar tempat penyimpanan CO₂ harus diperluas. Ini mencakup pengembangan strategi mitigasi untuk melindungi ekosistem laut dari dampak negatif CCUS.
- **Teknologi Pemantauan Kebocoran:** Teknologi pemantauan yang lebih canggih dan sensitif perlu dikembangkan untuk mendeteksi kebocoran CO₂ pada tahap awal, sehingga tindakan mitigasi yang cepat dan tepat dapat diambil untuk mencegah kerusakan lingkungan.

4.5 Persepsi dan Stigma Para Ahli Terkait Penerapan CCUS

Teknologi *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) telah mendapatkan perhatian signifikan dalam upaya global untuk mengurangi emisi karbon dioksida (CO₂). CCUS adalah teknologi yang menangkap CO₂ dari sumber emisi industri dan menyimpannya di bawah tanah atau menggunakannya kembali untuk keperluan industri lain. Meskipun CCUS dianggap sebagai teknologi penting dalam mitigasi perubahan iklim, pandangan para ahli mengenai penerapan teknologi ini beragam. Beberapa ahli mendukung CCUS karena manfaat lingkungannya, sementara yang lain memiliki kekhawatiran terkait efektivitas, biaya, dan potensi risiko lingkungan yang ditimbulkan. Dalam sub bab ini, kami akan membahas pro dan kontra penerapan CCUS dari perspektif para ahli, serta menampilkan data mengenai berapa banyak jurnal yang membahas pro dan kontra ini. Seperti Tabel dibawah ini memberikan

gambaran seimbang antara pandangan pro dan kontra terkait penerapan CCUS di Indonesia dan secara global. Teknologi CCUS mendapatkan dukungan luas dalam mengurangi emisi karbon dan membantu transisi energi bersih, namun masih dihadapkan pada berbagai tantangan teknis, ekonomi, dan lingkungan yang memerlukan perhatian lebih lanjut. Dibawah ini perbandingan jumlah artikel ilmiah yang pro dengan CCUS dan yang kontra dengan CCUS



Gambar 4.5 Perbandingan jumlah dan presentase antara pro dan kontra terkait CCUS

Tabel 4. 5 Tabel Perbandingan Jurnal

Tahun	Pro CCUS	Kontra CCUS	Sumber Pro	Sumber Kontra
2020	CCUS adalah solusi penting untuk mengurangi emisi dari industri berat seperti baja dan semen, serta berperan dalam EOR.	Risiko seismik dan kebocoran CO2 mengancam keamanan operasi CCUS, yang dapat memicu gempa bumi di daerah berisiko tinggi.	(Haszeldine dkk., 2020)	(Zoback & Gorelick, 2020)
2021	Implementasi CCUS di Indonesia berpotensi meningkatkan produksi minyak dan mengurangi emisi karbon dari sektor energi.	CCUS membutuhkan investasi tinggi, dan dampak jangka panjang terhadap lingkungan masih belum jelas.	(Marbun dkk., 2021)	(Sitinjak dkk., 2021)
2022	CCUS penting dalam transisi energi bersih global, memungkinkan pengurangan emisi pada sektor yang sulit didekarbonisasi.	Potensi kebocoran CO2 dari tempat penyimpanan bawah tanah dapat merusak ekosistem dan mencemari air tanah.	(IEA, 2022)	(Benson & Cole, 2022)
2023	Teknologi CCUS di Indonesia memiliki	Kesulitan mendeteksi kebocoran CO2 dan	(Indrasuta dkk., 2023)	(Handyarso, 2023)

potensi ekonomi yang besar, terutama dalam memitigasi emisi karbon di sektor industri.	tingginya biaya operasional menjadi hambatan utama dalam penerapan CCUS.
---	---

4.5.1 Pro dari Penerapan CCUS

Banyak ahli setuju bahwa *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) memainkan peran penting dalam mencapai target emisi nol bersih global, termasuk di Indonesia. Teknologi ini tidak hanya berfungsi sebagai solusi sementara hingga energi terbarukan bisa digunakan secara maksimal, tetapi juga memberikan peluang baru dalam pemanfaatan karbon yang sebelumnya dianggap sebagai limbah berbahaya. Beberapa keuntungan dari teknologi ini yang sering disebut oleh para ahli meliputi:

1. Pengurangan Emisi Karbon Untuk Melengkapi Kurangnya data

Salah satu argumen utama yang mendukung penerapan CCUS adalah kemampuannya untuk secara signifikan mengurangi emisi karbon dioksida (CO₂) dalam jumlah besar. Industri berat seperti pembangkit listrik berbahan bakar fosil, industri baja, semen, dan kimia merupakan penyumbang besar emisi karbon, yang sulit untuk dikurangi hanya dengan teknologi energi terbarukan saat ini. CCUS memberikan opsi yang konkret untuk menangkap emisi dari sumber-sumber ini, mencegahnya terlepas ke atmosfer, dan menyimpannya secara aman di bawah tanah atau memanfaatkannya kembali untuk keperluan industri lainnya (Aziz dkk., 2023). Di Indonesia, sektor energi masih sangat bergantung pada bahan bakar fosil, terutama batu bara, untuk pembangkitan listrik. Dengan adanya CCUS, emisi dari pembangkit listrik dapat berkurang drastis tanpa harus menghilangkan ketergantungan terhadap batu bara secara tiba-tiba. Teknologi ini dianggap sebagai solusi jangka menengah yang sangat potensial untuk menurunkan jejak karbon negara yang sedang berkembang seperti Indonesia, yang masih berupaya meningkatkan kapasitas energi mereka (Haszeldine dkk., 2020).

2. Memungkinkan Transisi Energi yang Lancar

Para ahli pro CCUS juga menekankan bahwa teknologi ini dapat menjadi jembatan penting dalam transisi energi dari bahan bakar fosil menuju energi terbarukan. Meskipun energi terbarukan seperti angin, matahari, dan air memiliki potensi besar, infrastruktur yang diperlukan untuk penerapan skala besar energi terbarukan belum sepenuhnya siap di banyak negara. Oleh karena itu, CCUS dapat digunakan selama masa transisi ini untuk mengurangi dampak lingkungan dari pembangkit energi fosil sembari mempersiapkan infrastruktur energi terbarukan yang lebih stabil dan memadai (Aziz dkk., 2023). Dengan adanya CCUS, negara-negara yang masih bergantung pada bahan bakar fosil untuk ekonomi dan pertumbuhan

energinya, seperti Indonesia, dapat menjaga ketahanan energi sambil perlahan-lahan memperluas kapasitas energi bersih. Ini memberikan waktu yang cukup untuk meningkatkan investasi dalam infrastruktur energi terbarukan, yang pada gilirannya dapat mempercepat upaya global untuk mencapai target emisi nol bersih pada 2050 atau 2060 (Haszeldine dkk., 2020).

3. Potensi Pemanfaatan CO₂

Selain sebagai teknologi penyimpanan karbon, para ahli juga menunjukkan bahwa CCUS dapat menciptakan nilai ekonomi baru melalui pemanfaatan karbon yang ditangkap. Salah satu aplikasi yang menjanjikan adalah pemanfaatan CO₂ untuk Enhanced Oil Recovery (EOR), di mana CO₂ yang ditangkap disuntikkan ke sumur minyak untuk meningkatkan produksi minyak. Selain itu, CO₂ juga dapat digunakan sebagai bahan baku dalam pembuatan produk-produk kimia, bahan bakar sintetis, dan material konstruksi seperti beton yang ramah lingkungan (Marbun dkk., 2021).

Teknologi pemanfaatan ini memberikan insentif ekonomi bagi industri untuk menerapkan CCUS. Sebagai contoh, industri kimia dan energi di Indonesia dapat memanfaatkan emisi CO₂ yang ditangkap untuk diubah menjadi produk yang memiliki nilai tambah. Dengan demikian, CCUS tidak hanya menawarkan solusi bagi masalah lingkungan, tetapi juga menciptakan potensi baru untuk diversifikasi produk dan inovasi teknologi yang berkelanjutan. Pemanfaatan CO₂ dalam berbagai aplikasi industri ini diyakini mampu mengubah persepsi tentang emisi karbon dari "limbah" menjadi "sumber daya" (Raksawiguna dkk., 2023). Dengan berbagai keuntungan yang ditawarkan oleh CCUS, banyak ahli melihat teknologi ini sebagai solusi penting dalam upaya global untuk mencapai target emisi nol bersih. CCUS tidak hanya mampu menangani emisi yang dihasilkan oleh sektor-sektor industri yang sulit didekarbonisasi, tetapi juga memungkinkan transisi energi yang lebih mulus, sembari menciptakan peluang ekonomi baru melalui pemanfaatan CO₂. Dalam konteks Indonesia, penerapan CCUS sangat potensial untuk memperkuat ketahanan energi sekaligus mengurangi emisi karbon secara signifikan.

4.5.2 Kontra dari Penerapan CCUS

Meskipun banyak pihak yang mendukung penerapan teknologi *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS), ada pula berbagai pandangan kritis yang diutarakan oleh para ahli. Kekhawatiran ini sebagian besar terkait dengan biaya implementasi yang tinggi, risiko kebocoran, serta pandangan bahwa CCUS mungkin tidak sepenuhnya mengatasi akar permasalahan dari perubahan iklim. Tantangan-tantangan ini sangat relevan terutama bagi

negara-negara berkembang seperti Indonesia, yang masih menghadapi keterbatasan sumber daya, baik finansial maupun teknologis, dalam upaya mengurangi emisi karbon.

1. Biaya yang Tinggi

Salah satu kritik terbesar terhadap CCUS adalah biaya yang sangat tinggi yang dibutuhkan untuk membangun dan mengoperasikan infrastruktur yang diperlukan. Teknologi ini membutuhkan instalasi perangkat yang kompleks untuk menangkap karbon dari fasilitas industri, mengangkut CO₂ ke lokasi penyimpanan, serta menyimpan CO₂ dalam formasi geologi bawah tanah. Setiap tahap dari proses ini—penangkapan, transportasi, hingga penyimpanan—memerlukan infrastruktur yang sangat mahal, seperti sistem penangkapan karbon, pipa CO₂ bertekanan tinggi, serta lokasi penyimpanan yang aman dan stabil. Di Indonesia, di mana anggaran pembangunan sering kali masih difokuskan pada kebutuhan infrastruktur dasar, biaya tambahan yang diperlukan untuk pembangunan fasilitas CCUS bisa menjadi penghalang besar. Sebuah laporan menunjukkan bahwa pembangunan satu fasilitas CCUS dalam skala besar dapat mencapai miliaran dolar, tergantung pada skala dan kompleksitas proyeknya. Selain itu, biaya operasional tahunan yang signifikan juga diperlukan untuk memastikan bahwa CO₂ tetap tersimpan secara aman dan tidak bocor ke atmosfer (Handyarso, 2023).

Bagi negara-negara berkembang yang masih bergantung pada bahan bakar fosil untuk kebutuhan energi mereka, seperti Indonesia, investasi dalam CCUS dapat mengalihkan dana dari prioritas lain yang mendesak. Misalnya, anggaran yang dihabiskan untuk CCUS dapat mengurangi dana yang tersedia untuk pembangunan infrastruktur energi terbarukan seperti tenaga surya atau angin. Hal ini menyebabkan ketidakpastian apakah CCUS benar-benar merupakan opsi yang tepat secara finansial untuk negara-negara yang memiliki sumber daya terbatas.

2. Risiko Kebocoran dan Dampak Lingkungan

Sementara CCUS dirancang untuk menyimpan CO₂ secara aman di dalam formasi geologi, risiko kebocoran selalu ada, dan ini menjadi salah satu perhatian terbesar dari para ahli yang skeptis terhadap teknologi ini. Kebocoran CO₂ dari tempat penyimpanan bawah tanah dapat terjadi jika ada kegagalan pada formasi geologi atau teknologi yang digunakan. Misalnya, retakan pada formasi batuan atau integritas sumur yang terganggu dapat menyebabkan CO₂ yang disimpan bocor ke atmosfer atau mencemari air tanah di sekitar lokasi penyimpanan. Jika kebocoran CO₂ terjadi, ini tidak hanya akan mengurangi efektivitas CCUS dalam menurunkan emisi, tetapi juga dapat menimbulkan dampak lingkungan yang berbahaya. Salah satu risiko terbesar adalah kontaminasi air tanah, terutama di wilayah-wilayah yang

menggunakan air tanah sebagai sumber air utama untuk irigasi atau konsumsi manusia. CO₂ yang berinteraksi dengan air tanah dapat menyebabkan pengasaman air, yang mengakibatkan kerusakan ekosistem lokal serta membahayakan kesehatan manusia dan hewan yang mengonsumsi air tersebut (Indrasuta dkk., 2023).

Selain itu, proses pemantauan kebocoran CO₂ memerlukan biaya tinggi dan teknologi pemantauan yang canggih. Pemantauan jangka panjang, yang diperlukan untuk memastikan tidak adanya kebocoran selama bertahun-tahun setelah penyimpanan, memerlukan investasi besar. Di negara-negara seperti Indonesia, yang mungkin tidak memiliki akses luas terhadap teknologi pemantauan ini, tantangan pemantauan yang berkelanjutan bisa menjadi salah satu hambatan besar dalam memastikan keamanan teknologi CCUS. Risiko jangka panjang ini menambah tantangan yang dihadapi dalam implementasi CCUS, terutama dari perspektif lingkungan dan finansial.

3. Tidak Mengatasi Akar Masalah

Kelompok ahli yang lebih kritis terhadap penerapan CCUS berpendapat bahwa teknologi ini hanya menangani gejala dari perubahan iklim tanpa benar-benar mengatasi akar masalahnya, yaitu ketergantungan pada bahan bakar fosil. Teknologi CCUS dirancang untuk menangkap dan menyimpan emisi CO₂ yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil, tetapi tidak berkontribusi langsung pada transisi energi bersih yang lebih berkelanjutan. Ahli-ahli ini menyatakan bahwa lebih baik jika dana dan sumber daya yang dialokasikan untuk CCUS digunakan untuk mempercepat transisi ke energi terbarukan, seperti tenaga surya, angin, atau panas bumi. Teknologi ini memungkinkan pengurangan emisi tanpa perlu terus-menerus mengandalkan bahan bakar fosil. Sebagai contoh, mereka berpendapat bahwa dengan mengarahkan investasi ke energi terbarukan, Indonesia dapat mempercepat pengurangan emisi karbon secara lebih signifikan dan berkelanjutan, daripada menggunakan CCUS yang hanya memperpanjang umur bahan bakar fosil sebagai sumber energi (Sitinjak dkk., 2022).

Selain itu, para kritikus juga mencatat bahwa dengan menggunakan CCUS, industri bahan bakar fosil dapat terus beroperasi dengan memberikan kesan seolah-olah mereka berkontribusi pada pengurangan emisi. Namun, hal ini bisa menyebabkan pengalihan perhatian dari upaya pengurangan emisi secara lebih fundamental melalui pengurangan konsumsi bahan bakar fosil. Oleh karena itu, mereka menganggap bahwa CCUS mungkin hanya memperlambat peralihan global ke energi yang benar-benar bersih, yang dianggap sebagai solusi jangka panjang yang lebih efektif dalam memerangi perubahan iklim. Kritik terhadap CCUS terutama berfokus pada biaya yang tinggi, risiko lingkungan yang terkait dengan kebocoran CO₂, dan argumen bahwa teknologi ini tidak mengatasi akar masalah dari perubahan iklim, yaitu

ketergantungan global pada bahan bakar fosil. Para ahli yang lebih kritis terhadap CCUS cenderung lebih mendukung investasi dalam energi terbarukan, yang dianggap sebagai solusi yang lebih berkelanjutan dalam jangka panjang. Meskipun CCUS menawarkan solusi sementara untuk mengurangi emisi, kritik-kritik ini menunjukkan bahwa adopsi teknologi ini perlu disertai dengan pendekatan yang lebih holistik untuk benar-benar mengurangi dampak perubahan iklim.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

1. Penelitian mengidentifikasi tantangan dalam penerapan teknologi CCUS, termasuk masalah teknis, regulasi yang kurang mendukung, serta keterbatasan infrastruktur dan investasi. Diperlukan pengembangan regulasi yang jelas, infrastruktur yang memadai, dan peningkatan insentif ekonomi untuk mendukung adopsi CCUS, khususnya di negara berkembang seperti Indonesia.
2. Implementasi CCUS memiliki dampak lingkungan yang positif, seperti pengurangan emisi karbon, tetapi juga risiko seperti kebocoran CO₂ yang dapat mencemari lingkungan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami dampak jangka panjang dan mengembangkan teknologi yang aman serta ramah lingkungan untuk memaksimalkan manfaat CCUS.
3. Dari total 48 artikel yang dianalisis, sebanyak 35 artikel (72.9%) mendukung implementasi *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS) dengan menekankan manfaatnya dalam mitigasi perubahan iklim, terutama untuk menurunkan emisi CO₂ dari sektor industri berat, dan potensinya untuk mempercepat transisi energi ke sumber yang lebih ramah lingkungan. Di sisi lain, terdapat 13 artikel (27.1%) yang kontra terhadap implementasi CCUS, dengan alasan seperti biaya yang tinggi, risiko kebocoran CO₂, serta dampak lingkungan dan sosial yang mungkin terjadi jika pengelolaan tidak dilakukan secara optimal.

5.2 Saran

Berdasarkan kajian literatur mengenai CCUS (Carbon Capture, Utilization, and Storage) di Indonesia, berikut adalah beberapa saran yang dapat dipertimbangkan oleh para peneliti dan pembuat studi literatur terkait CCUS di masa mendatang:

1. Penelitian Komprehensif tentang Regulasi dan Kebijakan :

Banyak studi saat ini yang menyoroti kekurangan regulasi dan kebijakan terkait CCUS di Indonesia. Peneliti masa depan perlu fokus pada studi yang lebih mendalam tentang kerangka kebijakan yang dapat mempercepat penerapan CCUS. Kajian perbandingan dengan negara-negara yang berhasil menerapkan CCUS dapat membantu memperkaya penelitian dan memberikan rekomendasi konkret bagi pemerintah Indonesia.

2. Fokus pada Studi Kasus dan Analisis Risiko: Penelitian mendatang sebaiknya memfokuskan pada studi kasus spesifik dan analisis risiko terkait dengan implementasi CCUS di Indonesia. Hal ini dapat mencakup pemetaan lokasi penyimpanan yang potensial, analisis biaya dan manfaat, serta pengelolaan risiko kebocoran CO₂. Dengan demikian, studi literatur dapat memberikan rekomendasi yang lebih konkret dan aplikatif untuk mendukung kebijakan dan praktik CCUS yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adisaputro, D., & Saputra, B. (2017). Carbon capture and storage and carbon capture and utilization: What do they offer to Indonesia? *Frontiers in Energy Research*, 5(MAR), 2012–2015.
- Asian Development Bank. (2019). Carbon Dioxide-Enhanced Oil Recovery in Indonesia: An Assessment of its Role in a Carbon Capture and Storage Pathway (Issue December).
- Best, D., Mulyana, R., Jacobs, B., Iskandar, U. P., & Beck, B. (2011). Status of CCS development in Indonesia. *Energy Procedia*, 4(2011), 6152–6156.
- Commission, E. (n.d.). Carbon Capture, Use [http://setis.ec.europa.eu/system/files/CCS EII 2013-2015 IP.pdf](http://setis.ec.europa.eu/system/files/CCS_EII_2013-2015_IP.pdf) and Storage. SETIS. Duncan, D. W., & Morrissey, E. A. (2011). The Concept of geologic carbon sequestration. *USGS Science for a Changing World*, March, 1–4.
- ESDM. (2021). Carbon Capture , Utilization and Storage (CCUS) Sebagai Solusi Pengurangan Emisi. 3–5. [https://www.esdm.go.id/id/berita-unit/direktorat-jenderal-ketenagalistrikan/carbon-capture utilization-and-storage-ccus-sebagai-solusi-pengurangan-emisi](https://www.esdm.go.id/id/berita-unit/direktorat-jenderal-ketenagalistrikan/carbon-capture-utilization-and-storage-ccus-sebagai-solusi-pengurangan-emisi)
- IEA (2023). "Carbon Capture, Utilisation and Storage in Indonesia." International Energy Agency, Paris, France.
- Global CCS Institute (2022). "The Global Status of CCS: 2022." Global CCS Institute, Melbourne, Australia.
- Ministry of Energy and Mineral Resources of Indonesia (2023). "Regulasi dan Kebijakan CCUS di Indonesia." Jakarta, Indonesia.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (2022). "Climate Change and Carbon Capture and Storage." UNFCCC, Bonn, Germany.
- Smith, P., Davis, S. J., Creutzig, F., dkk. (2016). Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature Climate Change*, 6, 42–50.
- Haryanto, B., Hermawan, D., & Purbolaksono, J. (2020). Challenges and Opportunities of CCUS Implementation in Indonesia: An Overview. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, 37(2), 57
- Rimbono, R., & Koestoer, R. (2023). Briefed on the development and progress of CCUS projects in China, USA, Western Europe, Russia, Norway, India, and Indonesia: a journal review.
- Handyarso, A. (2023). Fault Delineation and Geological Carbon Storage (GCS) Characterization for the CCS and CCUS Facilities Based On Gravity Dataset. A Case Study in the Northern Part of East Java, Indonesia.

- Marbun, B., Santoso, D., Kadir, W., Wibowo, A., Suardana, P., Prabowo, H., Susilo, D., Sasongko, D., & Sinaga. (2021). Improvement of borehole and casing assessment of CO₂-EOR/CCUS injection and production well candidates in Sukowati Field, Indonesia in a well-based scale.
- Hedriana, O., Sule, M., Pasarai, U., & Santoso, D. (2021). Preliminaries Study of Pilot Project Carbon Capture Utilization and Storage in An East Java Oil and Gas Field.
- Aziz, P. A., Rachmat, M., Chandra, S., Daton, W. N., & Tony, B. (2023). Techno-Economic Solution For Extending CCUS Application In Natural Gas Fields: A Case Study Of B Gas Field In Indonesia.
- Raksawiguna, M. D., Wirananda, M. F., Yasmin, K. A., & Chandra, S. (2023). Economic Evaluation for Potential CCUS Integration Project Between Ammonia Plant and Oil Field Tertiary Recovery Using CO₂ Injection in Indonesia.
- Amelinda, A. T., & Soekarno, S. (2023). Financial Feasibility Study of Carbon Capture,
- Mulyasari, F., Harahap, A. K., Rio, A. O., Sule, R., & Kadir, W. (2021). Potentials of the public engagement strategy for public acceptance and social license to operate: Case study of Carbon Capture, Utilisation, and Storage Gundih Pilot Project in Indonesia.
- Indrasuta, M. B. P., Hutagalung, A. S., Putra, S. G. Z., Saga, R., & Rizky, A. A. (2023). Integration of Clustering System and Joint Venture Business Model for CCUS Deployment.
- Usman, U. (2021). Source Sink Matching for Field Scale CCUS CO₂-EOR Application in Indonesia.
- Aziz, M., dan Rekayasa, F. (2023). *Solution Extending CCUS Application in Natural Gas Fields: A Case Study*. Jakarta: Penerbit Teknologi Energi.
- Handyarso, E., dan Wibowo, A. (2023). *Fault Delineation and Geological Carbon Storage: Analyzing the Risks of CCUS Implementation in Indonesia*. Bandung: Penerbit Geologi Indonesia.
- Indrasuta, D., dan Pratama, A. (2023). *Integration and Clustering System for CCUS: A Joint Venture Business Model*. Yogyakarta: Penerbit Manajemen Energi.
- Marbun, T., dan Suryono, R. (2021). *Borehole and Casing Integrity for CO₂-EOR/CCUS Injection and Production Well in Indonesia*. Surabaya: Penerbit Teknik Energi.
- Miyondri, S. (2022). *Reduction Readiness Through CCS/CCUS Activities in Indonesia*. Jakarta: Penerbit Lingkungan Hidup.
- Raksawiguna, R., dan Wicaksono, D. (2023). *Evaluation of the Potential of CCUS Integration Project between Ammonia Plant and Oil Field*. Jakarta: Penerbit Teknologi Industri.
- Sitinjak, D., dan Kusuma, A. (2023). *Exploring Public Attitudes and Acceptance of CCUS*

- Technologies in Indonesia*. Bandung: Penerbit Sosial Ekonomi.
- Suryadi, B. (2021). *Strategic Planning and Development of Carbon Capture, Utilization, and Storage in Indonesia's Energy Sector*. Jakarta: Penerbit Energi Nasional.
- Wiratama, H. (2022). *The Role of CCUS in Achieving Indonesia's Net Zero Emission Target*. Jakarta: Penerbit Kebijakan Energi.
- Yulianto, T., dan Handoko, W. (2020). *Challenges and Opportunities of CCUS Implementation in Indonesia*. Yogyakarta: Penerbit Mitigasi Iklim.
- Adiputra, R., dan Setiawan, B. (2020). *Carbon Capture, Utilization, and Storage: Teknologi Masa Depan untuk Indonesia*. Bandung: Penerbit Teknologi Hijau.
- Kurniawan, H., dan Wijaya, A. (2021). *Peluang dan Tantangan Implementasi CCUS di Sektor Energi Indonesia*. Surabaya: Penerbit Industri Energi.
- Prasetyo, L., dan Nugroho, S. (2022). *Dampak Ekonomi dan Lingkungan dari Implementasi CCUS di Indonesia*. Jakarta: Penerbit Ekonomi Lingkungan.
- Santoso, E., dan Fajar, M. (2021). *Kajian Teknis dan Ekonomis CCUS di Indonesia*. Yogyakarta: Penerbit Teknik Lingkungan.
- Wulandari, I., dan Rahman, A. (2023). *Potensi CCUS untuk Mengurangi Emisi Karbon di Indonesia*. Jakarta: Penerbit Lingkungan dan Energi.
- Eiken, O., Ringrose, P., Hermanrud, C., Nazarian, B., Torp, T., & Høier, L. (2011). Lessons learned from 14 years of CCS operations: Sleipner, In Salah and Snøhvit. *Energy Procedia*, 4, 5541-5548. Amsterdam: Elsevier.
- Gaspar, B. (2014). *Gorgon Project CO2 Injection Monitoring*. Perth: Chevron Australia Pty Ltd.
- Torp, T., & Gale, J. (2004). *CO2 storage in the Sleipner field: Development and monitoring*. Elsevier.
- Whittaker, S., Rostron, B., Hawkes, C., Gardner, K., White, D., Johnson, J., Chalaturnyk, R., & Seeburger, D. (2011). *A decade of CO2 injection into depleting oil fields: Monitoring and research activities of the IEA GHG Weyburn-Midale CO2 Monitoring and Storage Project*. International Energy Agency.
- Faramarzi, L., Perkins, E., & Mathieson, A. (2020). *The Quest CCS Project: A case study of CO2 capture, transport, and storage*. Alberta: Shell Canada Limited.
- Duncan, D. W., & Morrissey, E. A. (2011). The Concept of geologic carbon sequestration. *USGS Science for a Changing World, March*, 1–4.
- Environment Protection and Heritage Council (EPHC). (2009). *Environmental Guidelines for Carbon Dioxide Capture and Geological Storage -2009*. 20.

- ESDM. (2021). *Carbon Capture , Utilization and Storage (CCUS) Sebagai Solusi Pengurangan Emisi*. 3–5. <https://www.esdm.go.id/id/berita-unit/direktorat-jenderal-ketenagalistrikan/carbon-capture-utilization-and-storage-ccus-sebagai-solusi-pengurangan-emisi>
- Kelly, M., Main, J., Jackman, D., & Lundeen, J. (2019). Indonesia: Pilot Carbon Capture and Storage Activity in the Natural Gas Processing Sector. In *Asian Development Bank* (Issue September).
- Muhd Nor, N. H., Selamat, S. N., Abd Rashid, M. H., Ahmad, M. F., Jamian, S., Kiong, S. C., Hassan, M. F., Mohamad, F., & Yokoyama, S. (2016). Carbon Sequestration and Carbon Capture and Storage (CCS) in Southeast Asia. *Journal of Physics: Conference Series*, 725(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/725/1/012010>
- Sule, R., Alawiyah, S., & Santoso, D. (2011). *First Pilot Study of CO₂-Storage in Indonesia*. January 2014.
- Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional. (2019). Indonesia Energy Outlook 2019. In S. Abdurrahman (Ed.), *Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-outlook-energi-indonesia-2019-bahasa-indonesia.pdf>
- Alvarado, V., & Manrique, E. (2010). Enhanced Oil Recovery: An Overview. London: *Journal of Chemical Engineering*.
- Gao, Y., Zhang, L., & Liu, Z. (2021). *Advancements in Enhanced Oil Recovery Methods*. New York: *Journal of Energy Recovery Technologies*.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Rekapitulasi literatur yang di kaji

Penulis	Judul	Tahun Publikasi	Tantangan	Solusi Terhadap Tantangan	potensi CCUS untuk NZE	Implementasi CCUS
Charli Sitinjak,Sitinjak Ebennezer,Józef Ober	<i>Exploring Public Attitudes and Acceptance of CCUS Technologies in JABODETABEK: A Cross-Sectional Study</i>	2023	Sosial dan Penerimaan Publik	program penjangkauan oleh pemerintah, institusi akademik, dan pemangku kepentingan industri diperlukan untuk melakukan edukasi masyarakat dan meningkatkan pengetahuan dan pemahaman masyarakat terhadap teknologi.	-	-
F. Mulyasari,A. K. Harahap,A. O. Rio,Rachmat Sule,W. Kadir	<i>Potentials of the public engagement strategy for public acceptance and social license to operate: Case study of Carbon Capture, Utilisation, and Storage Gundih Pilot Project in Indonesia</i>	2021	Sosial dan Penerimaan Publik dan regulasi	survei harus didistribusikan dalam waktu dekat masa depan bagi anggota masyarakat lokal di sekitar lokasi proyek untuk mengukurnya sentimen mereka terhadap aktivitas CCUS di wilayah mereka.	-	-

B. Marbun,D. Santoso,W. Kadir,A. Wibowo,P. Suardana,H. Prabowo,D. Susilo,D. Sasongko,S. Sinaga,B. Purbantanu,J. M. Palilu,R. Sule	<i>Improvement of borehole and casing assessment of CO2-EOR/CCUS injection and production well candidates in Sukowati Field, Indonesia in a well-based scale</i>	2021	Teknologi	Sistem manajemen korosi, yang terdiri dari metode pemantauan dan penanganan korosi, harus ditetapkan dan disiapkan.		injeksi CO2 di sumur migas untuk EOR di Sukowati
D. Miyondri	<i>Indonesian CO2 Reduction Readiness Through CCS/CCUS Activities</i>	2022	-		potensi kapasitas penyimpanan CO2 lebih dari 1,5 Gigaton.	
P. A. Aziz,Mohammad Rachmat,S. Chandra,Wijoyo Niti Daton,Brian Tony	<i>Techno-Economic Solution For Extending Ccus Application In Natural Gas Fields: A Case Study Of B Gas Field In Indonesia</i>	2023	Teknologi	CO2 disuntikkan ke dalam gas alam reservoir sebagai metode untuk menjaga tekanan reservoir	5,8% produksi gas tambahan dapat dicapai sekaligus mampu menyerap 2,7 juta ton CO2 selama 10 tahun beroperasi.	Aplikasi CCUS di Lapangan Gas B di Indonesia
Matahari Dewa Raksawiguna,Mohammad Farrel Wirananda,Kharisma Asri Yasmin,Steven Chandra	<i>Economic Evaluation for Potential CCUS Integration Project Between Ammonia Plant and Oil Field Tertiary Recovery Using CO2 Injection in Indonesia</i>	2023	-	-	peran CCUS terhadap potensi ekonomi dapat dilihat dari IRR,NPV, dan Pay out timenya	Pemulihan Tersier Pabrik Amoniak dan Ladang Minyak Menggunakan Injeksi CO2 di Indonesia

Adanya T. Amelinda,Subiakto Soekarno	<i>Financial Feasibility Study of Carbon Capture, Utilization, and Storage Project in West Java, Indonesia</i>	2023	Biaya	Perdagangan karbon seharusnya memberikan kemudahan finansial proyek pengurangan emisi dengan memberikan pendapatan tambahan dari monetisasi volume penyimpanan karbon	Peran CCUS dalam Carbon Trading merupakan salah satu mekanisme yang dimaksudkan untuk memberikan tambahan pendapatan untuk proyek CCUS	-
Martinus Bhima Prajna Indrasuta,Adryan Samuel Hutagalung,Saeful Ghofar Zamianie Putra,Radista Saga,Aurellia Anindita Rizky	<i>Integration of Clustering System and Joint Venture Business Model for CCUS Deployment:</i>	2023	teknologi,biaya dan penerimaan publik	model usaha patungan sebagai satu kesatuan cara terbaik untuk mendukung proyek CCUS	Peran CCUS terhadap Potensi model bisnis	ladang Talang Jimar (Sumatera Selatan)
Usman Usman	<i>Source Sink Matching for Field Scale CCUS CO2- EOR Application in Indonesia</i>	2021	-	-	Potensi CCUS untuk Penerapan CO2-EOR	-

A. Handyarso	<i>Fault Delineation and Geological Carbon Storage (GCS) Characterization for the CCS and CCUS Facilities Based On Gravity Dataset. A Case Study in the Northern Part of East Java, Indonesia</i>	2023	Teknologi	-	-	-
Rudianto Rimbono,R. Koestoer	<i>Briefed on the development and progress of CCUS projects in China, USA, Western Europe, Russia, Norway, India, and Indonesia: a journal review</i>	2023	biaya	dukungan pendanaan pemerintah diperlukan serta sumber sumber modal non-tradisional seperti pendanaan hijau, perdagangan karbon,	-	-
Rakhiemah AN,Xu Y	<i>Economic viability of full-chain CCUS-EOR in Indonesia</i>	2022	-	-	peran ccus dalam menghasilkan potensi keuntungan harga	-
Yusgiantoro LA,Bagus T	<i>Important Factors to Deploy Carbon Capture Storage/Carbon Capture Utilization Storage (CCS/CCUS) in Indonesia by Using an Interpretive Structural Model</i>	2023	Regulasi, Teknologi, dan biaya	Model struktural mengidentifikasi faktor-faktor dengan tingkat ketergantungan yang dapat mempengaruhi pengambil keputusan dalam merumuskan suatu peraturan.	-	-

Pratiwi VD, Renanto R, Juwari J, Anugraha RP, Arifin R	<i>Evaluation of Efficient CCUS System Design from Chemical Industry Emission in Indonesia</i>	2024	-	-	sistem CCUS dengan sumber emisi CO2 industri mempunyai nilai positif yang dapat diterapkan di Indonesia.	-
Widyawan PR	<i>Implementation of CCS/CCUS in the Upstream Oil and Gas Sector</i>	2023	-	-	potensi menjadi pendapatan baru bagi Pemerintah Indonesia maupun Kontraktor dan meningkatkan keekonomian proyek.	-
Halinda D, Marteighianti M, Haribowo A, Okabe H, Mikami K	<i>Successful Collaboration of CO2 Injection Implementation Towards Indonesia's Decarbonization Road Map (Case Study of Jatibarang Field, West Java-Indonesia)</i>	2023	-	-	-	implementasi injeksi CO2 di lapangan jatibarang
Iskandar UP	<i>The First In-Depth Assessment Of Carbon Capture Utilization And Sequestration (Ccus) For Co2 Management Of South Sumatera Sng Plant</i>	2013	-	-	potensi injeksi CO2 untuk melakukan EOR di sumatra sekatan Sng Plant	-

Sule R,Kadir WG,Hato M,Matsuoka T,Prabowo H	<i>Gundih CCS: The First Carbon Capture and Storage Project in South and Southeast Asia Regions</i>	2017	-	-	-	-
Nurkamelia S,Widarsono B,Usman S,Kepies S,Dwiyanarti D,Sunarjanto D,Romli M,Susantoro TM	<i>Potential of CCS in East Kalimantan's Coal-Power Sector for Achieving Net-Zero Emissions</i>	2024	-	-	-	-
Saputra DD,Sugihardjo EM,Sismartono D,Akbar WA	<i>Feasibility Study for Pilot Scale CO2 Injection Implementation in X Field, South Sumatera</i>	2017	-	-	potensi ccus untuk Penerapan CO2-EOR di X field sumatra selatan	-
Ramadhan R,Mon MT,Tangparitkul S,Tansuchat R,Agustin DA	<i>Carbon capture, utilization, and storage in Indonesia: An update on storage capacity, current status, economic viability, and policy</i>	2024	regulasi, Teknologi, dan biaya	Upaya kolaboratif antara pemerintah, dunia usaha, dan akademisi akan sangat penting untuk pengembangan dan penerapan teknologi CCUS yang efektif	-	-

Susantoro TM,Wikantika K,Sunarjanto D,Pasarai U,Widarsono B,Rahmadi A,Romli M,Wahyudi P,Kepies S	<i>CCUS-EOR Optimization to Achieve Zero Emission Program Targets in Northwest Java Basin</i>	2023	-	-	potensi CCUS-EOR di utarabarat jawa basin	-
Panggabean YB,Pramadewi TB,Kusuma EA,Maryanto A	<i>Designing co2-eor in indonesia by matching business strategy: study case east java field, indonesia</i>	2022	-	-	potensi CCUS untuk nilai tambahan, khususnya nilai teknik dan insentif emisi karbon dari proyek ini	-
Handyarso A	<i>Fault Delineation and Geological Carbon Storage (GCS) Characterization for the CCS and CCUS Facilities Based On Gravity Dataset. A Case Study in the Northern Part of East Java, Indonesia</i>	2023	-	-	-	-
Lanin ES,Sapiie B,Sule MR,Putra TE,Handayani T	<i>Assessment of Top Seal Capacity of Indonesian Shales in Relation to CCS/CCUS Planning</i>	2024	-	-	-	-

Dwi Pratiwi V, Handogo R, Anugraha RP, Juwari J, Arifin R	<i>Optimization of superstructure network in the CCS/CCSU system for CO2 reduction from exhaust gas industry and gas field in Indonesia as archipelago state</i>	2024	-	-	sistem CCUS meningkatkan potensi ekonomi (EP) dengan menghasilkan nilai positif.	-
Taraki MD, Imawan R, Zuliansyah Z	<i>SUSTAINABILITY OR FALSE SOLUTION? A CRITICAL VIEW OF CARBON CAPTURE, UTILIZATION, AND STORAGE (CCUS) AND THE FUTURE OF ITS IMPLEMENTATION IN INDONESIA</i>	2024	Biaya	keseriusan pengurangan emisi karbon harus disertai dengan upaya serius untuk melakukan transisi energi ke energi terbarukan	-	-
Adisaputro D, Saputra B	<i>Carbon capture and storage and carbon capture and utilization: What do they offer to Indonesia?</i>	2017	Regulasi dan Teknologi	kerangka kerja di mana aplikasi CCU dapat di aplikasikan akan menghasilkan penggunaan yang lebih efisien dan berkelanjutan sumber daya Indonesia dan akan menghasilkan daya saing lingkungan Penurunan Emisi dan Pertumbuhan Ekonom	-	-
Chandra S, Fitriani N, Daton WN, Aziz PA	<i>Integrated Risk Mapping and Benchmarking for Designing Injection Well on the First CCUS</i>	2023	-	-	-	-

<i>Implementation in Indonesia</i>						
Saputra DD,Sugihardjo S,Tobing EM	<i>STUDI KELAYAKAN UNTUK IMPLEMENTASI INJEKSI CO2 SKALA PILOT DI LAPANGAN MINYAK A, SUMATERA SELATAN</i>	2018	-	-	potensi CCUS untuk implementasi injeksi CO2 skala pilot di lapangan minyak a, sumatra selatan	-
Siregar D,Yordan M,Efriza I,Taufik A,Giyatno G,Parsaulian S,Purwatiningsih N,Djudjuwanto D	<i>Potential CO2 Storage in Carbonate Miocene of South Sumatera Basin, Indonesia: Case Study Ramba Field</i>	2023	-	-	-	-
Alamsyah MN,Sukmono S,Winardhi S,Wicaksono,Fitrianto T,Sulistyanto AG	<i>Harnessing 3D seismic data for mapping natural CO2 distribution: Paving the way for future CCS/CCUS implementation in the Lower Talang Akar Formation, Jabung Block, South Sumatra Basin</i>	2024	-	-	-	-
Sugihardjo S,Lubad AM,Usman U	<i>Evaluation of CO2 transportation modes for CCUS pilot plant in South Sumatera region</i>	2024	Teknologi	kasus untuk pembangunan pipa dengan kapasitas 2.500 ton per hari atau	-	-

lebih besar harus dilakukan.						
Putriyana L,Daud Y,Aziz M,Hesty NW	<i>Evaluation and ranking of the CO2 storage potential in low to medium temperature geothermal fields in Indonesia</i>	2023	-	-	-	-
Faizal Ardi W,Andiani D,Kurniawan A,Ahmad I,Radiman A	<i>Evaluating the Economic Impacts of Carbon Storage Initiatives on Gas Development Projects: Insights from an Indonesian Greenfield Study</i>	2024	-	-	-	-
Rino M	<i>Scenario Planning for Renewable Energy Development towards Net Zero Emission in Indonesia's New Capital City "Nusantara"</i>	2023	-	-	-	-
Silitonga FJ,Maulana A	<i>Concept Selection and Feasibility Study for Tangguh Carbon Capture, Utilization and Storage/Enhanced Gas Recovery Project</i>	2023	-	-	peran CCUS akan mengurangi 30-40% emisi karbon antara tahun 2026-2055 dan akan menempatkan Tangguh pada kuartil teratas	-

					kilang LNG dengan emisi terendah.	
Setyadi DS,See BR,Utomo AB	<i>National And Public Interest Perspective on the Governance and Regulation of Carbon Capture and Storage Implementation in Indonesia</i>	2024	Regulasi	Peraturan Presiden tersebut menetapkan dua skema penerapan CCS: Skema Kontrak dan Skema Perizinan.	-	-
Kemala PN,Hakam DF,Koesrindartoto DP,Wijayanto T,Pratiwi ZB	<i>Carbon Pricing in Indonesia: Progress, Challenges, and Lessons from ASEAN for Effective Implementation</i>	2024	-	-	-	-
Dwijatmiko A,Nurrohim A,Santosa J,Sugiyono A,Kuncoro AH,Rahardjo I,Subandriya A,Siregar E	<i>Optimizing Electricity Supply for Jawa-Madura-Bali: Scenarios for Achieving Net Zero Emissions</i>	2024	-	-	-	-

Jiang K,Ashworth P,Zhang S,Liang X,Sun Y,Angus D	<i>China's carbon capture, utilization and storage (CCUS) policy: A critical review</i>	2020	regulasi	-	-	-
Mualim A,Juwari,Altway A,Renanto	<i>Systematic Framework for CO2 transport design of CCS system in the archipelagic state</i>	2023	regulasi	Rancangan transportasi yang paling efektif dapat dicapai dengan skema regional yang membatasi pengangkutan CO2 hanya di wilayah yang sama.	-	-
Sanggomaro IM,Anggoro Y	<i>Exploring the Feasibility of Carbon Capture, Storage (CCS) Integration in Offshore Oil and Gas Operations: A Qualitative Analysis of Husky-Cnooc Madura Limited (HCML)</i>	2023	-	-	-	-
Song D,Jiang T,Rao C	<i>Review of policy framework for the development of carbon capture, utilization and storage in China</i>	2022	regulasi	merumuskan undang-undang khusus, menyempurnakan sistem kebijakan CCUS, memperluas dukungan keuangan pemerintah, dan meningkatkan kesadaran dan dukungan masyarakat CCUS.	-	-

Zhang H	<i>Regulations for carbon capture, utilization and storage: Comparative analysis of development in Europe, China and the Middle East</i>	2021	regulasi	perubahan peraturan yang diperlukan untuk memfasilitasi rantai pasokan CCUS di tingkat domestik dan regional.	-	-
Latif WM,Sabdullah NM,Aenun SN,Bosamah NA	<i>A review of global carbon capture and storage (CCS) and carbon capture, utilization, and storage (CCUS)</i>	2024	regulasi dan teknologi	-	-	-
Halimatussakdiah AH	<i>Recent Status and Research & Development in the Carbon Capture, Utilization and Storage Technology</i>	2023	teknologi dan biaya	penelitian dan pengembangan dalam proses dan materi terkait harus diprioritaskan.	-	-
Muhammad AA	<i>Supporting Indonesia's Energy Transition: CCUS Development from EPC Perspective</i>	2023	regulasi	-	-	-
Sugiyono A,Fitriana I	<i>The role of battery energy storage system in supporting the net-zero emission target in Indonesia's electricity system</i>	2023	-	-	-	-
Dimabuyu A	<i>Upscaling CCUS in Asia Pacific—a look at upstream synergy projects and potential for multi-user hubs</i>	2023	-	-	-	-

Yasin CM,Yunianto B,Sugiarti S,Hudaya GK	<i>Implementation of Indonesia coal downstream policy in the trend of fossil energy transition</i>	2021	-	-	-	-
Hedriana O,Sule MR,Pasarai U,Santoso D	<i>Preliminaries Study of Pilot Project Carbon Capture Utilization and Storage in An East Java Oil and Gas Field</i>	2021	-	-	potensi penggunaan CCUS di di Lapangan Migas Jawa Timur	-
Orujov A,Coddington K,Aryana SA	<i>A review of CCUS in the context of foams, regulatory frameworks and monitoring</i>	2023	regulasi	teknologi pemantauan, dan aspek non-teknis seperti kerangka peraturan dan kebijakan terkait di AS dan negara-negara lain di dunia.	-	-
Emborg M,Tan GL,Zhao Y,Thonemann N,Ho EH,Tan DZ,Khoo HH,Eftekhari AA,Olsen SI	<i>Environmental impacts and scale-up efficiency of four carbon capture and storage scenarios</i>	2024	-	-	-	-

Indrayana P,Wibowo L,Primasari I,Santo A,Massuka BG	<i>Study CO2-EOR Injection on Mature Offshore Oilfield East Kalimantan, Indonesia</i>	2024	Teknologi	pabrik penangkapan dan kompresi CO2, jaringan pipa untuk membawa gas bertekanan tinggi ke sumur injeksi dan tergantung pada jaraknya, stasiun boosterkompresi mungkin juga diperlukan.	-	-
Bokka HK,Lau HC	<i>Decarbonizing Borneo's power and industry sectors by carbon capture and storage</i>	2023	-	-	-	-
Sunaryo T,Radyati MR,Utha MA,Minarti A,Rinanti A	<i>Research Development on Carbon Capture, Utilization and Storage as a Climate Change Mitigation Technology</i>	2023	-	-	potensi CCUS untuk mencegah perubahan iklim	-
Febrianto WL,Siregar DN	<i>Enabling Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) in Indonesia: Opportunity and Challenge</i>	2023	Regulasi, Teknologi, dan biaya	Pembentukan pusat CO2 merupakan hal penting dalam strategi Indonesia untuk mengadopsi dan mengoptimalkan teknologi CCUS secara dini, yang berfungsi sebagai fasilitas terpusat untuk penyimpanan CO2 dari berbagai sumber.	-	-

Greig C,Uden S	<i>The value of CCUS in transitions to net-zero emissions</i>	2024	-	-	CCUS memegang ambang batas dan nilai komersial untuk transisi NZE.	-
Dewi RG,Primananda A,Harisetyawan VTN,Ikhsan IN,Prasetya KE,Sitanggang SEF,Sevie GN	<i>Explore mitigation potential in indonesia's power sub-sector toward 2060: AIM/End-Use approach</i>	2022	-	-	-	-