

Kajian Penerapan *Carbon Capture and Storage* (CCS) pada *Central Processing Plant* (CPP) Donggi dan CPP Matindok, Sulawesi Tengah

Difa Khoirunisa dan Joni Hermana

Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: hermana@its.ac.id

Abstrak—Indonesia menunjukkan komitmennya dalam menurunkan emisi karbon global dengan mengembangkan teknologi *carbon capture and storage* (CCS). Salah satu lokasi proyek CCS direncanakan berada di Blok Donggi-Matindok, Sulawesi Tengah. Penelitian ini mengkaji potensi penerapan CCS berdasarkan emisi yang dihasilkan dari pabrik pemurnian gas alam di sana, yaitu *Central Processing Plant* (CPP) Donggi dan CPP Matindok. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung efisiensi penangkapan karbon serta membuat potensi rancangan CCS mulai dari penangkapan, transportasi, hingga injeksi karbon. Unit proses dan skema CCS dipilih menggunakan teknik *Multi Criteria Decision Analysis* (MCDA). Perhitungan efisiensi metode penangkapan karbon menggunakan perbandingan aliran CO₂ yang masuk, keluar, dan terbuang pada sistem penangkapan karbon. Didapatkan efisiensi penangkapan CO₂ yang dihasilkan berada pada rentang 89,1 – 90,1 persen. Metode penangkapan karbon yang dipilih adalah *post-combustion* dengan teknologi absorpsi kimia. Unit proses utama pada fasilitas penangkap karbon terdiri dari *pre-treatment* berupa *wet gas scrubber* (WGS), tangki absorpsi, dan *stripper*. Transportasi karbon menggunakan pipa menuju sumur Donggi 2 (DNG-2) untuk diinjeksikan dengan konsep *enhanced oil recovery* (EOR).

Kata Kunci—Carbon Capture and Storage, MCDA, Efisiensi, Rancangan.

I. PENDAHULUAN

INTERGOVERNMENTAL Panel on Climate Change (IPCC) menyatakan bahwa suhu permukaan global akan meningkat 1,1 hingga 6,4 derajat akibat efek rumah kaca. Jika peningkatan gas rumah kaca tetap seperti sekarang, suhu global dapat naik antara 1,5 – 4,5 derajat celsius pada tahun 2030. Menghangatnya suhu global dapat memicu terjadi beberapa fenomena, seperti naiknya permukaan air laut, perubahan cuaca ekstrim, timbulnya berbagai penyakit, kegagalan panen, serta kacaunya siklus air yang mengakibatkan banjir dan kekeringan [1]. Untuk mencegah dampak tersebut, sejumlah negara menandatangani *Paris Agreement* yang menyatakan komitmen dari berbagai negara untuk membatasi kenaikan suhu rata-rata global tidak mencapai 2 derajat celsius di atas suhu sebelum masa revolusi industri dan mengupayakan lebih lanjut hingga tidak melebihi 1,5 derajat celsius hingga tahun 2050 [2]. Indonesia pun menyatakan komitmennya melalui *Nationally Determined Contributions* (NDC), yaitu Indonesia menargetkan penurunan emisi GRK sebesar 29 persen dengan usaha sendiri dan 41 persen dengan dukungan internasional hingga 2030 [3].

Mendukung hal tersebut, sejumlah industri produksi energi kini fokus untuk melakukan dekarbonasi, salah satunya dengan mengembangkan teknologi pereduksi karbon berupa

carbon capture and storage (CCS). CCS adalah sistem penangkapan CO₂ dari sumber emisi karbon yang tidak bergerak dan menyimpannya secara permanen sebelum dilepaskan ke atmosfer [4]. CCS terdiri dari beberapa tahapan: penangkapan karbon, yaitu pemisahan CO₂ dari emisi gas dan mengompres fasanya menjadi superkritis; transportasi karbon untuk menyalurkan karbon ke tempat injeksi; dan penyimpanan karbon ke dalam lapisan bawah permukaan bumi [5].

Saat ini, Indonesia sudah mengadakan penelitian yang bersifat pengumpulan data-data, penilaian peluang, tantangan, efek terhadap lingkungan, serta pengaruh CCS terhadap proses produksi energi berkelanjutan di sektor industri Indonesia [6]. Salah satu perusahaan yang tengah melakukan pengembangan CCS adalah PT Pertamina (persero). Salah satu proyek penerapan CCS yang direncanakan PT Pertamina berada di Blok Donggi-Matindok, Sulawesi Tengah. Blok Matindok memiliki dua fasilitas pemurnian gas bumi atau disebut sebagai *central processing plant* (CPP), yaitu CPP Donggi dan CPP Matindok [7]. Oleh karena itu, penelitian ini mengkaji potensi penerapan CCS pada Blok Donggi-Matindok yang memiliki dua CPP sebagai unit yang menghasilkan emisi gas rumah kaca pada proses produksinya. Hasil emisi yang dikeluarkan dari kedua CPP menjadi sumber karbon pada penelitian ini. Tahapan CCS mulai dari penangkapan, transportasi, dan injeksi karbon dirancang dan dipilih berdasarkan kriteria yang paling sesuai untuk diterapkan di kondisi lingkungan setempat.

II. METODE PENELITIAN

A. Pengumpulan Data

Data terdiri atas data sekunder yang diperoleh atas izin PT Pertamina EP Donggi Matindok Field. Data sekunder yang digunakan meliputi:

1. Proses Produksi: alur produksi dan jumlah produksi untuk mengetahui proses produksi yang menghasilkan emisi karbon
2. Inventarisasi Emisi: jumlah emisi yang mengandung karbon dari setiap unit produksi. Data ini digunakan untuk mengetahui jumlah emisi karbon yang dapat ditangkap dan dimasukkan pada teknologi CCS
3. Sumur Produksi: data koordinat, umur, dan status sumur untuk menentukan sumur yang berpotensi diinjeksi karbon dan atau ditingkatkan produksinya menggunakan EOR.
4. Rona Lingkungan Hidup: karakteristik geologi untuk menentukan kelayakan injeksi karbon ke dalam tanah

Tabel 1.
Sistem Matriks MCDA

Kriteria	Bobot	Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3
Kriteria 1	20%	0	1	2
Kriteria 2	30%	2	1	0
Kriteria 3	15%	1	1	0
Kriteria 4	15%	2	2	1
Kriteria 5	20%	0	1	2
Kriteria 6	20%	2	2	1
Total	100%	1.20	1.25	0.95
Keputusan		Prioritas 2	Prioritas 1	Prioritas 3

Tabel 2.
Rentang Nilai Pemilihan Metode Penangkapan Karbon

Kriteria	Nilai		
	0	1	2
Pemulihan CO ₂	<90%	90-92%	>92%
Penghapusan Emisi NOx	<90%	90-92%	>92%
Kebutuhan energi untuk kompresi CO ₂	Kebutuhan energi kompresi maksimal lebih dari 0.3 MGJ/kg CO ₂	Kebutuhan energi kompresi maksimal sebesar 0.2 – 0.3 MGJ/kg CO ₂	Kebutuhan energi kompresi maksimal kurang dari 0.2 MGJ/kg CO ₂
Bahan Baku Pemisahan	Sulit didapatkan, mahal	Mudah didapatkan, tetapi mahal atau sulit didapatkan meski murah	Mudah didapatkan dengan harga murah
Biaya Pengembangan	Proyek pengembangan paling tinggi lebih dari 8.000.000 USD/ MTPD CO ₂ stored	Proyek pengembangan paling tinggi pada 5.000.000 – 8.000.000 USD/ MTPD CO ₂ stored	Proyek pengembangan paling tinggi kurang dari 2.000.000,000 USD/ MTPD CO ₂ stored
Perkuatan Fasilitas	Membutuhkan fasilitas/unit tambahan di luar fasilitas penangkapan karbon yang sulit diretrofit	Membutuhkan fasilitas/unit tambahan di luar fasilitas penangkapan karbon yang mudah diretrofit	Tidak membutuhkan fasilitas/unit tambahan di luar fasilitas penangkapan karbon
Kematangan Pengembangan Teknologi	Sudah ada proyek yang mencapai TRL 1-3	Sudah ada proyek yang mencapai TRL 4-7	Sudah ada proyek yang mencapai TRL 8-9

Tabel 3.
Rentang Nilai Pemilihan Teknologi Penangkapan Karbon

KriteriaSeleksi	Nilai		
	0	1	2
Efisiensi Pemisahan	<85%	85 - 90%	>90%
Persyaratan suhu	>500 celcius	100-500 celcius	<100 celcius
Biaya Operasional	>100 USD/tCO ₂ Tidak terjadi	50 - 100 USD/tCO ₂	50 USD/tCO ₂
Korosifitas dan Toksisitas	korosifitas dantoksisitas	Korosifitas dan toksisitas rendah.	Sensitivitas terhadap gas korosif.
Biaya BahanBaku Pemisahan	Bahan baku per satuan kebutuhan mahal dan tidak dapat digunakan secara kontinyu	Bahan baku per satuan kebutuhan mahal, tetapi dapatdigunakan secara kontinyu	Bahan baku per satuan kebutuhan murah dan dapat digunakan secara kontinyu
KematanganTeknologi	Sudah ada proyek yang mencapai TRL 1-3	Sudah ada proyek yang mencapai TRL4-7	Sudah ada proyek yang mencapai TRL 8-9

Untuk menunjang data tersebut, digunakan juga data primer berupa:

1. Wawancara terkait proses produksi untuk mengetahui kebutuhan sumber daya dan kondisi eksisting produksi
2. Wawancara terkait rencana strategi produksi perusahaan untuk mengetahui target maupun teknologi produksi yang berpengaruh pada naik-turunnya jumlah timbulan emisi karbon

B. Perhitungan Beban Emisi Karbon

Perhitungan emisi menggunakan skenario *Business as Usual* (BAU) dengan melihat intervensi yang dilakukan oleh perusahaan terkait aktivitas dan kebijakan yang diterapkan. Beban emisi yang timbul dari kegiatan produksi dihitung menggunakan regresi linear dengan melibatkan beban emisi sebagai variabel independen dan tahun perhitungan sebagai variabel dependen. Regresi linier dapat digunakan untuk mengukur seberapa besar pengaruh variabel independen

terhadap variabel dependen. Persamaan regresi linier adalah sebagai berikut:

$$y = a + bx + e$$

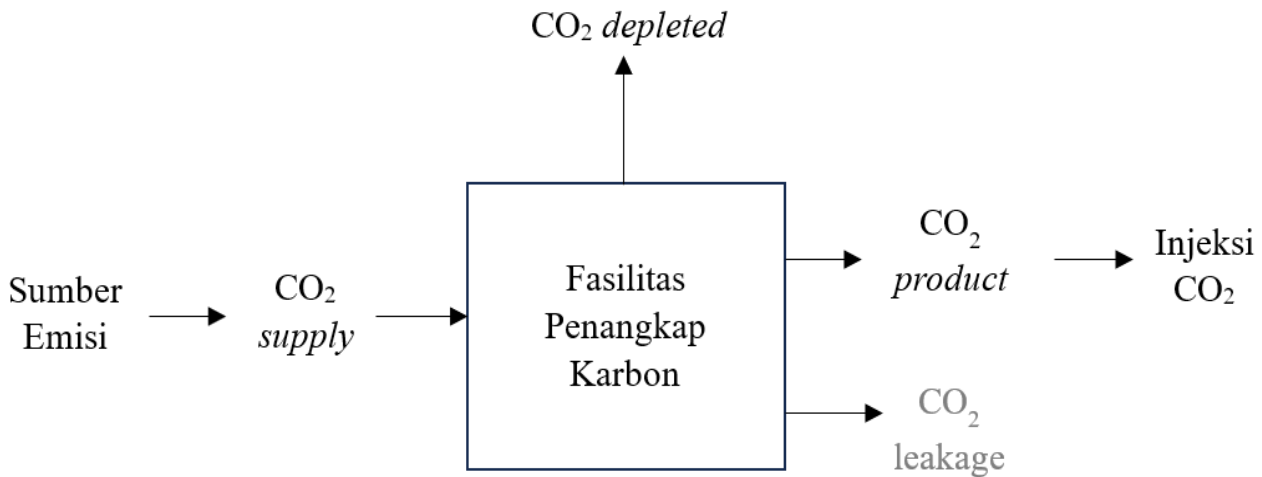
Dimana:

- y = beban emisi
- x = tahun perhitungan
- a = konstanta intersep
- b = konstanta regresi
- e = koefisien konstan

Besarnya konstanta intersep dan konstanta regresi dapat ditentukan menggunakan persamaan:

$$a = \frac{(\sum Y_i)(\sum X_i^2) - (\sum X_i)(\sum X_i Y_i)}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}$$

$$b = \frac{n(\sum X_i Y_i) - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}$$



Gambar 1. Aliran CO₂ pada fasilitas penangkap karbon.

Tabel 4.
Rentang Nilai Pemilihan Pre-treatment Penangkapan Karbon

Kriteria Seleksi	Rentang Nilai Pemilihan Pre-treatment Penangkapan Karbon		
	0	1	2
Efisiensi penghilangan SO ₂	<85%	85 -90%	>90%
<i>Multi-pollutantRemoval</i>	Dapat memisahkanSOx	Dapat memisahkan SOx dan NOx (belum sempurna untuk NOx)	Dapat memisahkan SOx dan NOx

Tabel 5.
Efisiensi Penangkapan CO₂ Dan Perhitungan Pemulihan Karbon

Ketentuan	Deskripsi Penangkapan Karbon	Efisiensi Penangkapan CO ₂ (%)
Metode 1	CO ₂ (<i>product</i>) dengan kemurnian tinggi diukur terhadap aliran CO ₂ (<i>supply</i>) Asumsi bahwa CO ₂ (<i>product</i>) yang ditangkap adalah jumlah dari CO ₂ (produk) dan CO ₂ (<i>depleted</i>)	$= \frac{CO_2 (product)}{CO_2 (supply)}$
Metode 2	Dipakai untuk meminimalisir ketidakpastian relatif Menggunakan CO ₂ (<i>supply</i>) sebagai parameter untuk menghitung % dari desain dan rasio absorber	$= \frac{CO_2 (product)}{CO_2 (product) + CO_2 (depleted)}$
Metode 3		$= \frac{CO_2 (supply) - CO_2 (depleted)}{CO_2 (supply)}$

C. Multi Criteria Decision Analysis (MCDA)

Pada penelitian ini, pengambilan keputusan untuk memilih rancangan CCS mulai dari fasilitas penangkap, transportasi, hingga injeksi karbon menggunakan metode *Multi Criteria Decision Analysis* (MCDA). Penilaian setiap alternatif menggunakan matriks seperti contoh pada Tabel 1.

Nilai yang diberikan pada masing-masing alternatif disesuaikan dengan kebutuhan CCS di Donggi Matindok Field berdasarkan rona lingkungan dan studi literatur mengenai proyek-proyek CCS yang sudah berjalan di dunia. Nilai yang diberikan pada masing-masing alternatif kemudian dikalikan dengan bobot pada kriteria penilaian. Untuk mengetahui nilai akhir dari satu alternatif, hasil perkalian bobot dan penilaian alternatif dijumlahkan. Persamaan perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$Total\ Nilai = \sum Bobot\ Kriteria \times Poin\ Penilaian$$

Setelah masing-masing alternatif dinilai berdasarkan kriteria yang ditetapkan, hasil keseluruhannya dijumlahkan. Alternatif yang memiliki nilai paling tinggi diberi peringkat prioritas sebagai keputusan terpilih.

D. Rentang Nilai Pemilihan Metode Penangkapan Karbon

Untuk menggunakan MCDA, ditentukan kriteria seleksi. Masing-masing kriteria seleksi ditentukan rentang nilainya berdasarkan contoh proyek CCS di dunia dan kesesuaian dengan rona lingkungan lokasi penelitian. Penilaian dibagi menjadi angka 0, 1, dan 2 dengan nilai yang lebih tinggi mengindikasikan kesesuaian penerapan metode penangkapan karbon pada CPP Donggi dan CPP Matindok. Rentang penilaian metode penangkapan karbon tertera pada Tabel 2.

E. Rentang Nilai Pemilihan Teknologi Penangkapan Karbon

Masing-masing kriteria seleksi teknologi penangkapan karbon ditentukan rentang nilainya berdasarkan contoh proyek CCS di dunia dan kesesuaian dengan rona lingkungan lokasi penelitian. Rentang penilaian metode penangkapan karbon tertera pada Tabel 3.

F. Rentang Nilai Pemilihan Pre-Treatment Penangkapan Karbon

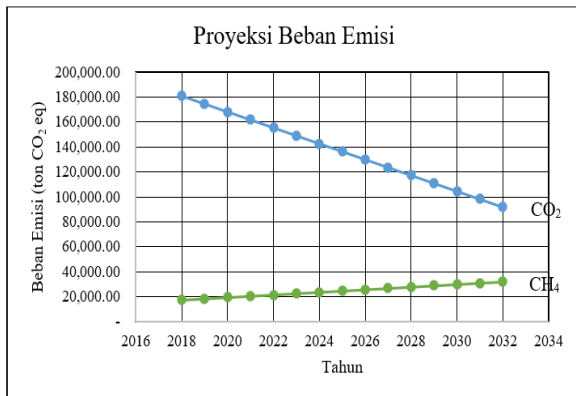
Kriteria seleksi *pre-treatment* penangkapan karbon ditentukan rentang nilainya berdasarkan contoh proyek CCS

Tabel 6.
Data Beban Emisi CPP Donggi dan CPP Matindok

Tahun	Beban Emisi			
	CO ₂ (ton)	CH ₄ (ton eq CO ₂)	SOx (ton)	NOx (ton)
2018	173.281,50	18.443,57	388,00	755,63
2019	170.299,31	18.534,71	329,80	462,91
2020	189.432,34	16.381,88	394,45	798,59
2021	162.095,17	20.957,23	335,38	723,46
2022	145.618,72	22.478,81	370,28	661,65

Tabel 7.
Statistika Regresi dan Koefisien Proyeksi Beban Emisi CO₂

Statistik Regresi	
Multiple R	0,611893856
R Square	0,374414091
Adjusted R Square	0,165885455
Standard Error	12.516,50933
Observations	5
Koefisien	



Gambar 2. Grafik proyeksi beban emisi CO₂ dan CH₄.

di dunia dan kesesuaian dengan rona lingkungan lokasi penelitian. Rentang penilaian metode penangkapan karbon tertera pada Tabel 4.

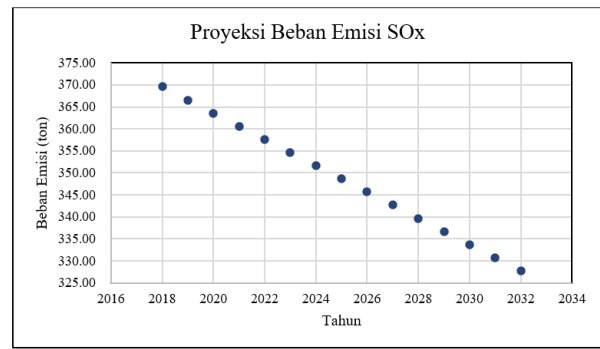
G. Perhitungan Efisiensi Penangkapan Karbon

Terdapat tiga jenis aliran pada fasilitas penangkap karbon, yaitu aliran *supply* dari sumber emisi, aliran produk, dan aliran *depleted* [7]. Aliran CO₂ pada sistem penangkapan karbon secara umum ditampilkan pada Gambar 1. CO₂ *supply* adalah emisi karbon (*flue gas*) yang dihasilkan oleh CPP Donggi dan CPP Matindok. CO₂ *supply* akan menjadi aliran karbon yang masuk ke dalam fasilitas penangkap karbon. Melalui serangkaian proses yang terjadi di dalam fasilitas penangkap karbon, terdapat CO₂ *depleted* atau aliran dengan sedikit kandungan karbon yang ikut terlepas dengan gas non karbon. Selain itu, dihasilkan pula CO₂ *product* yang merupakan aliran CO₂ murni karena sudah terpisah dari kandungan emisi lainnya. CO₂ *product* ini adalah hasil dari fasilitas penangkap karbon yang selanjutnya akan diinjeksikan. Terdapat tiga perhitungan efisiensi penangkapan karbon secara general [7]. Formula perhitungan tercantum pada Tabel 5.

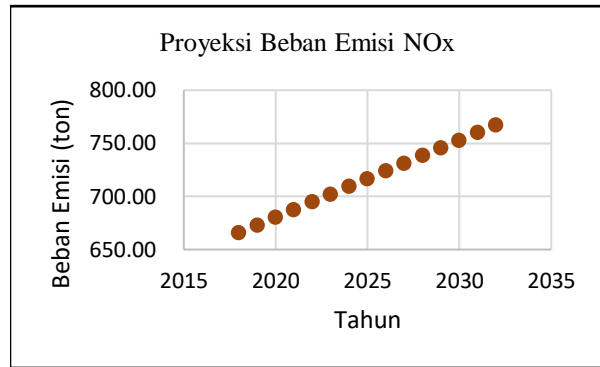
III. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Perhitungan Beban Emisi

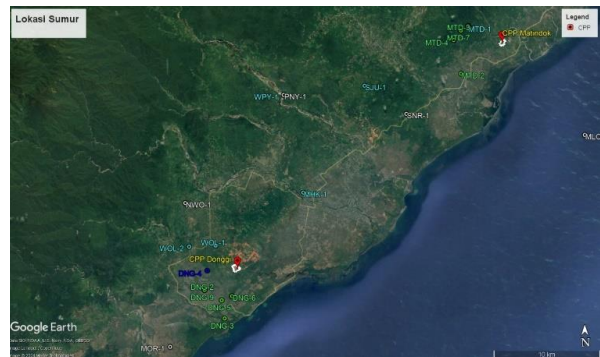
Untuk menghitung beban emisi pada tahun perencanaan, digunakan data *time series* inventarisasi emisi dari PT Pertamina EP Donggi-Matindok. Data inventarisasi emisi karbon tercantum pada Tabel 6.



Gambar 3. Grafik proyeksi beban emisi sox.



Gambar 4. Grafik proyeksi beban emisi nox.



Gambar 5. Pemetaan sumur produksi.

Perhitungan beban emisi dilakukan selama sembilan tahun ke depan, dari tahun 2023 hingga tahun 2032. Hal ini dilakukan karena pengembangan CCS di Blok Donggi-Matindok direncanakan baru memasuki tahap studi kelayakan per tahun 2023. Perhitungan beban emisi CO₂ menghasilkan statistika regresi dan koefisien seperti pada Tabel 7. Dengan demikian, hasil proyeksi beban emisi karbon CPP Donggi dan CPP Matindok seperti pada grafik yang tertera pada Gambar 2, Gambar 3 dan Gambar 4.

B. Pemilihan Metode Penangkapan Karbon

Tahap awal yang dilakukan adalah menentukan kriteria seleksi. Setelah itu, dilakukan pembobotan dengan pertimbangan *cost-benefit* dan kebutuhan sumber daya yang tersedia di lingkungan CPP Donggi dan CPP Matindok. Seluruh kriteria seleksi akan berpengaruh kepada biaya proyek. Oleh karena itu, bobot sebesar 100% akan dibagi dengan jumlah kriteria seleksi dengan pembulatan ke bawah. Sisa nilai untuk mencapai angka 100% kemudian diletakkan pada kriteria seleksi yang berpengaruh langsung pada biaya dan efisiensi sistem penangkapan karbon

Selanjutnya, dilakukan penilaian ketiga metode penangkapan karbon sesuai Tabel 2. tentang rentang

Tabel 8.

Matriks MCDA Pemilihan Metode Penangkapan Karbon

Kriteria Seleksi	Bobot	Variasi Metode Penangkapan Karbon		
		Pra Combustion	Post Combustion	Oxyfuel Combustion
Pemulihan CO ₂	15%	2	0	1
Penghapusan Emisi Nox	13%	0	1	2
Kebutuhan energi untuk kompresi CO ₂	14%	1	0	1
Bahan Baku Pemisahan	14%	2	1	1
Biaya Pengembangan	15%	0	1	2
Perkuatan Fasilitas	14%	0	2	0
Kematangan Pengembangan Teknologi	15%	1	2	0
Total Nilai	100%	0,87	1,00	0,99
Keputusan		Prioritas 3	Prioritas 1	Prioritas 2
<i>Intercept</i> (a)		10900917.41		
<i>X Variable 1</i> (b)		-5303.669686		

Tabel 9.

Matriks MCDA Pemilihan Teknologi Penangkapan Karbon

Kriteria Seleksi	Bobot	Variasi Teknologi Penangkapan Karbon		
		Absorpsi	Membran	Adsorpsi
Efisiensi Pemisahan	17%	2	0	1
Persyaratan suhu	16%	2	0	1
Biaya Operasional	17%	0	1	2
Biaya Bahan Baku Pemisahan	17%	1	2	2
Korosifitas dan Toksifitas	16%	2	0	0
Kematangan Teknologi	17%	2	1	1
Total Skor	100%	1,49	0,68	1,18
Keputusan		Prior-1	Prior-3	Prior-2

penilaian metode penangkapan karbon. Hasil analisis MCDA pemilihan metode penangkapan karbon tertera pada Tabel 8.

Berdasarkan penilaian MCDA, metode *post combustion* memiliki nilai tambah pada perkuatan fasilitas dan perkembangan teknologinya yang jauh lebih matang dibandingkan metode lain. Hal tersebut menjadi aspek penting karena kondisi geologi lokasi penelitian rawan terjadi gempa bumi. Penggunaan metode *post-combustion* sudah mencapai tahap komersial dengan penggunaannya pada proyek-proyek CCS di dunia. Salah satu proyek yang terkenal adalah *Boundary Dam CCS Project* di Kanada yang menangkap gas buang dari pembangkit listrik tenaga batu bara dengan kapasitas penangkapan CO₂ mencapai satu juta ton per tahun.

C. Pemilihan Teknologi Penangkapan Karbon

Pemilihan teknologi penangkapan karbon juga menggunakan teknik MCDA. Berdasarkan subbab sebelumnya, diputuskan bahwa rancangan CCS pada penelitian ini menggunakan metode *post combustion*. Terdapat tiga alternatif pilihan teknologi yang bisa diterapkan pada metode penangkapan karbon *post combustion*, yaitu absorpsi, adsorpsi, dan membran. Terdapat 6 kriteria seleksi yang dapat dibandingkan datanya. Pembobotan dan penilian yang dilakukan pada pemilihan teknologi penangkapan karbon terangkum pada matriks MCDA pada Tabel 9.

Tabel 10.

Matriks MCDA Pemilihan Pre-Treatment Penangkapan Karbon

Kriteria Seleksi	Bobot	Variasi Teknologi Penangkapan Karbon				
		FGD	SDA	CDS	DSI	WGS
Efisiensi penghilangan SO ₂	55%	2	2	2	0	2
<i>Multipollutant Removal</i>	45%	1	1	1	1	2
Total Skor	100%	1,55	1,55	1,55	0,45	2,00
Keputusan		Prior1				

Tabel 11.

Efisiensi Penangkapan CO₂ dan CO₂ recovery Rancangan Penangkap Karbon

Metode	Efisiensi (%)	CO ₂ Recovery (%)
Metode 1	89.1	%
Metode 2	90.0	%
Metode 3	90.1	%
CO ₂ Recovery	99	%

Tabel 12.

Alternatif Sumur Injeksi CO₂

Pilihan Alternatif	Nama Sumur	Peran	Elevasi
Alternatif 1	DNG 2	sumur injeksi	7
	DNG 8	sumur target	6
	DNG 9	sumur target	7
Alternatif 2	MTD 1	sumur injeksi	111
	MTD 6	sumur target	110
	MTD 8	sumur target	111
Alternatif 3	MTD 3	sumur injeksi	77
	MTD 7	sumur target	78

Tabel 13.

MCDA Pemilihan Sumur Injeksi

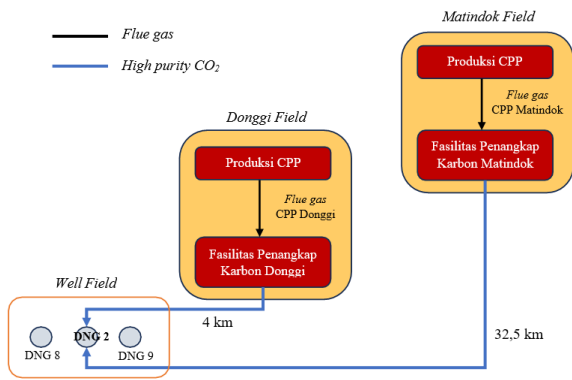
Kriteria	Bobot	Alt.1	Alt.2	Alt.3
Umur Bor	30%	0	1	1
Elevasi	20%	2	0	1
Jarak	15%	0	1	1
Multi-Purpose	20%	2	1	1
Akses	10%	1	0	0
Total	95%	0.9	0.65	0.85
Keputusan		P.1	P.3	P.2

Berdasarkan matriks MCDA, metode penangkapan karbon dengan nilai paling tinggi adalah metode absorpsi. Metode absorpsi kimia unggul pada kriteria-kriteria utama, yaitu efisiensi penangkapan CO₂ yang tinggi dengan kematangan teknologi yang juga lebih tinggi dibandingkan metode lainnya. Teknologi absorpsi juga lebih banyak digunakan pada proses pemisahan gas, bukan hanya pada CCS, tetapi juga pada proses pabrik pada umumnya. Oleh karena itu, teknologi absorpsi dinilai lebih matang dan komersial dibandingkan teknologi lainnya dan dipilih menjadi teknologi pada fasilitas penangkapan karbon di penelitian ini.

D. Pemilihan Pre-Treatment Penangkapan Karbon

Berdasarkan analisis pemilihan metode dan teknologi penangkapan karbon yang dilakukan pada subbab sebelumnya, diputuskan bahwa rancangan CCS pada penelitian ini menggunakan metode *post combustion* dengan teknologi absorpsi. Terdapat dua kriteria seleksi yang dapat dibandingkan datanya. Kedua kriteria seleksi tersebut berkaitan dengan kemampuan *removal* gas pengotor. Namun, kemampuan unit *pre-treatment* dalam memisahkan SO₂ diberi bobot lebih besar karena sebagai target zat pengotor utama yang dihilangkan. Sedangkan, kemampuan unit *pre-treatment* dalam pemisahan zat pengotor lain diutamakan pada kemampuan menghilangkan

NOx. Pembobotan dan penilaian pre-treatment penangkapan



Gambar 6. Skenario transportasi karbon.



Gambar 7. Jalur pipa transportasi karbon.

karbon terangkum pada matriks MCDA pada Tabel 10.

Terdapat beberapa penerapan CCS yang tidak menggunakan *pre-treatment*. Namun, untuk CPP Donggi dan CPP Matindok, gas pengotornya cukup banyak sehingga investasi pada pembuatan instalasi *pre-treatment* akan menguntungkan dengan efisiensi penangkapan CO₂ yang juga akan lebih optimal. Berdasarkan matriks MCDA, *pre-treatment* penangkapan karbon dengan nilai paling tinggi adalah teknologi *wet gas scrubber* (WGS). Metode ini unggul pada pemisahan SO₂ dan NO_x secara spesifik sebagai gas pengotor yang dihasilkan pada CPP Donggi dan Matindok. Oleh karena itu, *pre-treatment* yang akan digunakan pada penelitian ini adalah WGS.

E. Perhitungan Efisiensi Penangkapan Karbon

Untuk menghitung efisiensi penangkapan karbon, perlu diketahui aliran CO₂ dari input dan output pada masing-masing unit proses. Output pada unit terbagi menjadi dua, yaitu *output product* yang akan menjadi *supply* pada unit proses selanjutnya dan *output depleted* yang akan dibuang. Input dan output dari masing-masing unit ditentukan berdasarkan efisiensi unit proses. Berdasarkan pemilihan menggunakan teknik MCDA, rancangan sistem penangkap karbon dapat ditentukan. Unit proses yang dirancang terdiri dari *pre-treatment* berupa *wet gas scrubber* (WGS), absorpsi kimia, dan *stripper* untuk proses desorpsi.

Proses penangkapan karbon dimulai dari masuknya gas buang CPP Donggi dan Matindok menuju unit *pre-treatment* WGS untuk dihilangkan kadar SO_x dan NO_x-nya. SO_x dan NO_x yang berhasil dipisahkan pada proses *pre-treatment* menjadi emisi dari sistem penangkapan karbon. Sedangkan, CO₂ langsung mengalir ke unit proses selanjutnya, yaitu absorpsi. Pada proses absorpsi, Sebagian besar CO₂ akan

terendam pada solvent, tetapi ada pula yang ikut keluar bersama gas pengotor lainnya. Sehingga, untuk memaksimalkan penangkapan CO₂, emisi dari proses absorpsi akan diarahkan kembali menuju tangki absorpsi. Terakhir, proses pemisahan amina dan CO₂ pada *stripper* menghasilkan aliran CO₂ dengan konsentrasi tinggi sebagai hasil produk dari sistem penangkapan karbon. Sedangkan, CO₂ yang tidak berhasil dipisahkan dari amina merupakan aliran CO₂ *depleted* yang terbuang. Berdasarkan fasilitas penangkap karbon yang sudah dirancang, aliran CO₂ pada sistem penangkap karbon sebagai berikut:

- CO₂ Supply = 123,860.61 ton
- CO₂ Product = 110,359.80 ton
- CO₂ Depleted = 12,262.20 ton

Menggunakan formula sesuai pada Tabel 2, efisiensi penangkapan dapat dihitung menggunakan tiga metode. Setelah itu, dapat dihitung juga jumlah CO₂ yang berhasil ditangkap menggunakan perhitungan CO₂ *recovery*. Hasil perhitungan efisiensi penangkapan tersaji pada Tabel 11. Efisiensi penangkapan CO₂ berkisar pada rentang 89,1 – 90,1 persen. Penangkapan CO₂ yang dihitung dengan Metode 1 lebih kecil daripada penangkapan CO₂ yang dihitung dengan Metode 2 dan 3. Fakta ini menunjukkan bahwa kuantifikasi aliran CO₂ *supply* bias terlalu tinggi atau perhitungan aliran CO₂ produk biasanya rendah. Sedangkan, jumlah CO₂ yang ditangkap secara keseluruhan mencapai 99%, melebihi batas minimal efisiensi penangkapan *post combustion* yang direncanakan, yaitu 90%.

F. Pemilihan Sumur Injeksi Karbon

Pengembangan Gas Donggi dan Matindok memiliki beberapa sumur yang dibor sejak awal tahun 2000 untuk mencari sumber gas bumi di Cekungan Banggai. Sumur-sumur yang berhasil dibor tertera pada Gambar 5.

Berdasarkan kondisi geologi Banggai yang memiliki lempeng tektonik, metode injeksi yang memungkinkan adalah *enhanced oil recovery* (EOR) atau penginjeksian ke dalam saline akuifer dengan akuifer dalam asin. Berdasarkan kondisi tersebut, jenis sumur pada Donggi Matindok Field yang memungkinkan terlibat dalam injeksi CO₂ adalah:

1. Sumur eksplorasi *plug and abandoned*: Sumur ini dianggap sebagai *depleted reservoir* yang diinjeksikan CO₂ dengan metode EOR. Untuk metode ini, sumur eksplorasi *plug and abandoned* harus berdekatan dengan sumur produksi aktif yang akan menjadi sumur target peningkatan produksi. Sumur *plug and abandoned* juga berpotensi memiliki saline akuifer sehingga CO₂ dapat disimpan lebih aman, tetapi tanpa adanya proses EOR.
2. Sumur produksi aktif: Sumur aktif menjadi target peningkatan produksi dengan metode EOR.

Meski demikian, data bawah bumi yang berisi informasi terkait lapisan jenis tanah beserta kedalaman akuifer tidak tersedia secara publik. Data akuifer dalam asin juga masih minim, sehingga tidak dapat diketahui sumur mana yang dilewati oleh aliran akuifer dalam asin. Oleh karena itu, pemilihan sumur injeksi akan difokuskan pada metode EOR dengan memanfaatkan sumur eksplorasi *plug and abandoned* beserta sumur produksi aktif.

Dari kondisi tersebut, EOR bisa dilakukan dengan menargetkan sumur-sumur yang sudah berkurang produktivitasnya. Kemungkinan besar, sumur tersebut adalah sumur berusia tua, tetapi masih aktif, yaitu sumur dengan

umur bor rentang 10-20 tahun. Sumur-sumur yang berdekatan atau berada dalam satu lapangan regional kemudian dicari dan dipasangkan. Berdasarkan kriteria tersebut, didapat beberapa alternatif injeksi CO₂ menggunakan metode EOR yang memungkinkan seperti Tabel 12.

Elevasi menjadi salah satu aspek yang bisa dijadikan kriteria seleksi karena akan berpengaruh pada sistem transportasi karbon nantinya. Pipa yang melewati perubahan elevasi signifikan akan membutuhkan pengaturan tekanan dan suhu untuk menjaga CO₂ tetap berada dalam kondisi superkritis. Transportasi karbon melalui pipa dengan elevasi yang turun memiliki beberapa keuntungan. Aliran dalam pipa akan dimudahkan oleh gaya gravitasi di daerah dengan elevasi turun, sehingga mengurangi kebutuhan energi untuk memompa CO₂. Dengan demikian, pipa dengan elevasi turun mungkin memerlukan jumlah pompa yang lebih sedikit untuk mempertahankan aliran yang stabil.

Transportasi karbon melalui pipa dengan elevasi naik menghadapi tantangan yang berbeda. Elevasi menaik akan membuat sistem pipa memerlukan lebih banyak energi untuk memompa CO₂ melawan gaya gravitasi yang bekerja melawan aliran. Oleh karena itu, akan membutuhkan pompa yang perlu dipilih lagi lokasi penempatannya agar aturan aliran mendapat dorongan energi dengan tepat. Pemilihan sumur injeksi kemudian dinilai berdasarkan MCDA seperti pada Tabel 13.

Berdasarkan MCDA, didapat keputusan bahwa sumur injeksi terletak pada DNG 2 dan target peningkatan produktivitas melalui EOR-nya adalah ke DNG 8 dan DNG 9. Lokasi ketiga sumur tersebut dekat dengan pantai, sehingga ada kemungkinan bisa ditemukan akuifer dalam air asin akibat intrusi air laut. Apabila demikian, maka penyimpanan karbon dapat dilakukan di akuifer dengan risiko kebocoran yang lebih rendah.

G. Skenario Jalur Transportasi Karbon

Transportasi karbon dalam CCS dapat menggunakan pipa, truk, kereta, dan pelayaran. Sumur injeksi CO₂ yang terpilih berada di daratan dan tidak melintasi perairan, sehingga metode transportasi pelayaran tidak relevan pada penelitian ini. Jalur kereta api juga tidak tersedia pada kawasan Celuk Banggai. Transportasi menggunakan truk masih dapat memungkinkan, namun risiko kebocoran CO₂ cukup tinggi karena jarak tempuh yang jauh. Oleh karena itu, metode transportasi karbon yang akan digunakan pada penelitian ini adalah menggunakan jaringan pipa. Skenario transportasi karbon yang direncanakan tertera pada Gambar 6.

Skenario transportasi karbon yang direncanakan adalah dengan membangun fasilitas penangkap karbon pada masing-masing area CPP Donggi dan CPP Matindok. Hal ini sesuai dengan studi literatur dan wawancara dengan pihak perusahaan, bahwa risiko kebocoran CO₂ akan tinggi apabila *flue gas* dari kegiatan produksi (belum dalam kondisi superkritis) langsung ditransportasikan dengan jarak jauh.

Jalur pipa kemudian disesuaikan dengan kondisi jalan yang tersedia pada wilayah Celuk Banggai. Jarak antara masing-masing CPP dengan sumur injeksi dihubungkan dengan jalan yang tidak terlalu besar. Meski demikian, berdasarkan citra satelit pada Google Earth, kawasan tersebut masih dikelilingi

oleh persawahan dan perkebunan. Oleh karena itu, jalur pipa dapat dibuat lebih pendek dengan memotong kebun. Dengan jalur yang semakin pendek, risiko kebocoran CO₂ pada sistem transportasi dapat lebih diminimalisir. Biaya transportasi karbon juga akan lebih rendah karena kebutuhan pipa yang lebih pendek. Jalur yang direncanakan tercantum pada Gambar 7.

IV. KESIMPULAN

Efisiensi penangkapan CO₂ berkisar pada rentang 89,1 – 90,1 persen. Penangkapan CO₂ yang dihitung dengan perbandingan antara CO₂ *product* dan CO₂ *supply* lebih kecil daripada penangkapan CO₂ yang dihitung dengan dua metode perhitungan lainnya. Fakta ini menunjukkan bahwa kuantifikasi aliran CO₂ *supply* bias terlalu tinggi atau perhitungan aliran CO₂ produk biasanya rendah. Sedangkan, jumlah CO₂ yang ditangkap secara keseluruhan mencapai 99%, melebihi batas minimal efisiensi penangkapan *post combustion* yang direncanakan, yaitu 90%.

Rancangan potensi penangkapan karbon yang paling potensial untuk diterapkan di Donggi-Matindok adalah menggunakan metode *post-combustion* dengan teknologi absorpsi kimia. Unit proses utama yang direncanakan: *wet gas scrubber* (WGS) dengan efisiensi pemisahan SO₂ sebesar 95 persen dan NO_x 90 persen; tangki absorpsi dengan efisiensi pemisahan CO₂ sebesar 99 persen; dan *stripper* dengan efisiensi pemisahan CO₂ sebesar 90 persen. CO₂ kemudian ditransportasikan menggunakan pipa menuju sumur Donggi 2 (DNG-2) untuk diinjeksikan dengan konsep *Enhance oil recovery* (EOR) dengan target sumur Donggi 8 dan 9 sebagai sumur produksi yang ditingkatkan produktivitasnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada segenap pihak dari PT Pertamina EP Donggi Matindok Field, Sulawesi Tengah atas izin dan dukungannya dalam menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Leu, "Dampak pemanasan global dan upaya pengendaliannya melalui pendidikan lingkungan hidup dan pendidikan islam," *AT-TADBIR J. Manaj. Pendidik. Islam*, vol. 1, no. 2, pp. 1--15, 2021.
- [2] R. A. Aprilianto and R. M. Ariefianto, "Peluang dan tantangan menuju net zero emission (NZE) menggunakan variable renewable energy (VRE) pada sistem ketenagalistrikan di Indonesia," *J. Paradig.*, vol. 2, no. 2, pp. 1--13, 2021.
- [3] S. Syaharani and M. A. Tavares, "Nasib target emisi indonesia: pelemahan instrumen lingkungan hidup di era pemulihan ekonomi nasional," *J. Huk. Lingkung. Indones.*, vol. 7, no. 1, pp. 1--27, 2020.
- [4] T. Wilberforce, A. Olabi, E. T. Sayed, K. Elsaid, and M. A. Abdelkareem, "Progress in carbon capture technologies," *Sci. Total Environ.*, vol. 761, 2021.
- [5] B. Dziejarski, R. Krzyżyńska, and K. Anderson, "Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment," *Fuel*, vol. 342, 2023.
- [6] A. W. Prasetyo and J. Windarta, "Pemanfaatan teknologi carbon capture storage (CCS) dalam upaya mendukung produksi energi yang berkelanjutan," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 3, no. 3, pp. 231--238, 2022.
- [7] D. Thimsen *et al.*, "Results from MEA testing at the CO2 technology centre mongstad. part i: post-combustion CO2 capture testing methodology," *Energy Procedia*, vol. 63, pp. 5938--5958, 2014.