

Optimalisasi Dekarbonisasi dengan Integrasi *Solid Oxide Fuel Cell (Sofc) Gas Turbine Combined Cycle* dan *Oxy-Itm* Dengan Analisis Sekuestrasi Karbon: Studi Kasus Lapangan “ZT”

Arya Abraham Alik Songga, Aisah Nur Baiti

*Jurusan Teknik Perminyakan, UPN “Veteran” Yogyakarta, Yogyakarta

*Email: abrahamarya3@gmail.com

ABSTRACT

World energy demand sourced from fossil energy is increasing in line with the rapid growth of population and GDP, especially in the industrial and transportation sectors. Carbon dioxide (CO₂) from burning natural gas in power plants is one of the main contributors to global warming. According to the 2015 Paris Agreement, reducing carbon emissions is part of the policies of some energy companies. In the current era, carbon sequestration is being intensified, where 2200 gigatons of global CO₂ have been successfully injected back into geological formations. Oxy-fuel is one of the clean natural gas combustion technologies for CO₂ capture. However, the disadvantage of an air separation unit (ASU) is the large power consumption to separate oxygen. This study aims to integrate solid oxide fuel cell (SOFC) / GTCC with oxy ion transport membrane (Oxy-ITM) to reduce energy penalty, transport CO₂ in supercritical state and analyze carbon sequestration in the Arang Atas formation. The method used in this study is qualitative analysis based on previous research literature studies and “ST” field economic approach. This system has a net efficiency of 7.8% higher than the Oxy-ASU system, has a carbon dioxide purity captured of 97.5%, and a CO₂ capture rate of 99.9%. Based on the results of the calculation of economic indicators in the form of NCF obtained 3,546.11, and NPV obtained 1,338.91, POR 26.03%, PIR 2.1, DPIR 1.8 and POT 3.3 years. Analysis of economic indicators obtained a POR value of more than 12%, and a fast pay out time (POT) of 3.3 years, as well as POR, PIR, DPIR values which showed more positive values. In effect, this research will be useful for the industry as a solution to determine the appropriate technological approach to deal with carbon dioxide.

Keywords: SOFC/GTCC, oxy fuel, ion transport membrane, EOR, emission

ABSTRAK

Permintaan energi dunia yang bersumber dari energi fosil meningkat seiring dengan pesatnya pertumbuhan penduduk dan GDP, khususnya di sektor industri dan transportasi. Karbon dioksida (CO₂) hasil pembakaran gas alam pada pembangkit listrik adalah salah satu kontributor utama pemanasan global. Menurut *Paris Agreement* 2015, pengurangan emisi karbon merupakan bagian dari kebijakan beberapa perusahaan energi. Di era sekarang sekuestrasi karbon tengah gencar dilakukan, dimana 2200 gigaton CO₂ global telah berhasil diinjeksikan kembali kedalam formasi geologi. Oxy-fuel adalah salah satu teknologi pembakaran gas alam yang bersih untuk penangkapan CO₂. Namun, kerugian dari *air separation unit* (ASU) adalah konsumsi daya yang besar untuk memisahkan oksigen. Penelitian ini bertujuan mengintegrasikan *solid oxide fuel cell* (SOFC)/GTCC dengan *oxy ion transport membrane* (Oxy-ITM) untuk mengurangi pinalti energi, mentranspor CO₂ dalam keadaan *supercritical* dan menganalisis sekuestrasi karbon pada formasi Arang Atas. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis kualitatif berdasarkan studi literatur penelitian sebelumnya dan analisis kuantitatif. Sistem ini memiliki *net efficiency* 7,8% lebih tinggi daripada sistem Oxy-ASU, memiliki kemurnian karbon dioksida yang ditangkap 97,5%, dan *capture rate* CO₂ sebesar 99,9%. Berdasarkan hasil perhitungan indikator ekonomi berupa NCF yang didapatkan 3.546,11, dan NPV didapatkan 1.338,91, POR didapatkan 26,03 %, PIR 2,1, DPIR 1,8 dan POT yang 3,3 tahun. Analisis dari indikator ekonomi didapatkan nilai POR yang lebih dari 12%, dan *pay out timr* (POT) yang cepat yaitu pada 3,3 tahun, serta nilai POR, PIR, DPIR yang menunjukkan nilai yang lebih positif. Efeknya, penelitian ini akan bermanfaat bagi industri sebagai solusi untuk menentukan pendekatan teknologi yang sesuai untuk menangani karbon.

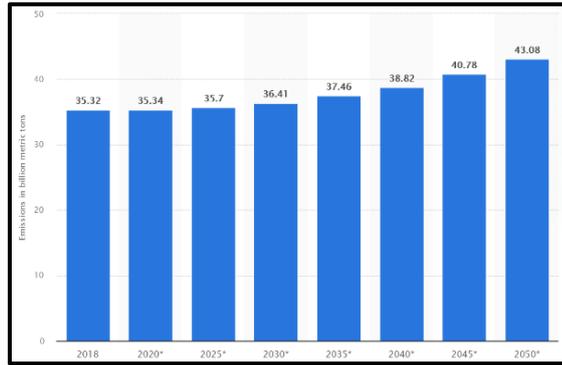
Keywords: SOFC/GTCC, oxy fuel, ion transport membrane, EOR, emission

I. Pendahuluan

Ekosistem alami bumi dipertaruhkan dengan meningkatnya emisi gas rumah kaca (GRK) antropogenik dari sektor energi dan pemanasan global yang ditimbulkan. Untuk menghindari efek pemanasan global, ditetapkan pembatasan kenaikan suhu global rata-rata hingga 2°C. Dalam mencapai tujuan ini diperlukan pengurangan 60% emisi GRK global pada tahun 2050, dibandingkan dengan tingkat tahun 2013. Menurut Badan Energi Internasional (IEA), bahan bakar fosil akan

terus memainkan peran penting dalam bauran energi global hingga tahun 2050, sehingga mencapai target 2°C akan membutuhkan penangkapan karbon yang ekstensif dari industri dan sumber energi. Staff dkk. (2017) meneliti tentang pengembangan teknologi *Carbon Capture Storage* (CCS) yang merupakan strategi mitigasi terpenting kedua setelah pengembangan teknologi energi terbarukan di sektor ketenagalistrikan dan peningkatan efisiensi energi di sektor industri dalam masa transisi energi.

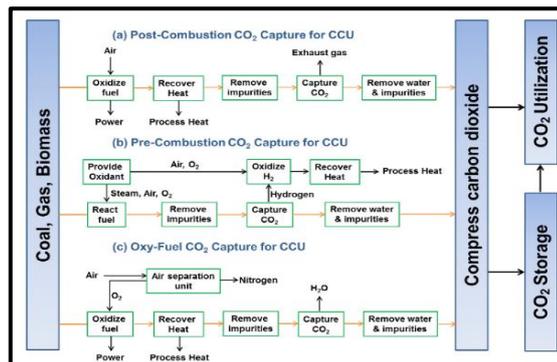
Optimalisasi Dekarbonisasi dengan Integrasi *Solid Oxide Fuel Cell (Sofc) Gas Turbine Combined Cycle* dan Oxy-Itm Dengan Analisis Sekuestrasi Karbon: Studi Kasus Lapangan “ZT”



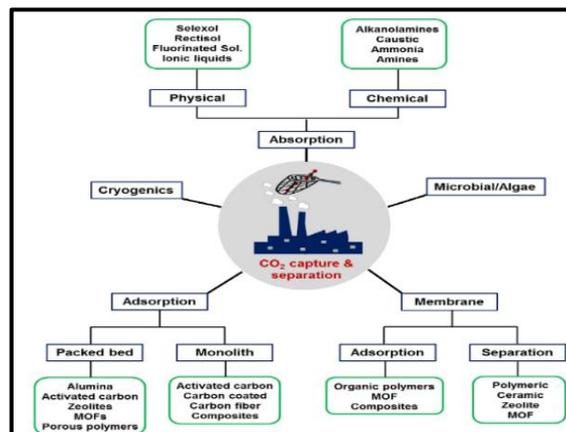
Gambar 1. Emisi CO₂ Dunia 2018-2050 (Statista, 2023)

Fennel dkk. (2021) meneliti tentang *Carbon Capture Storage* yang merupakan suatu proses penangkapan dan penyimpanan karbon dioksida selama persiapan bahan bakar fosil maupun dari limbah hasil pembakaran industri, atau ditangkap langsung dari atmosfer (*Direct Air Capture*), dimana teknologi penangkapan karbon pada industri terbagi menjadi pasca-pembakaran, pra-pembakaran, pembakaran *oxy-fuel*, dan pembakaran *chemical looping* dan

penyimpanan CO₂ mencakup formasi geologi seperti reservoir minyak atau gas yang sudah ditinggalkan, deposit batubara yang tidak dapat diakses, dan akuifer garam. Gulzar dkk. (2020) meneliti tentang metode yang digunakan untuk penangkapan dan pemisahan karbon dioksida terbagi menjadi lima yakni absorpsi, adsorpsi, pemisahan secara membran, distilasi kriogenik dan fiksasi biologis menggunakan mikroba atau alga.



Gambar 2. Metode Penangkapan CO₂ pada Pembakaran Fosil (Gulzar dkk., 2020)



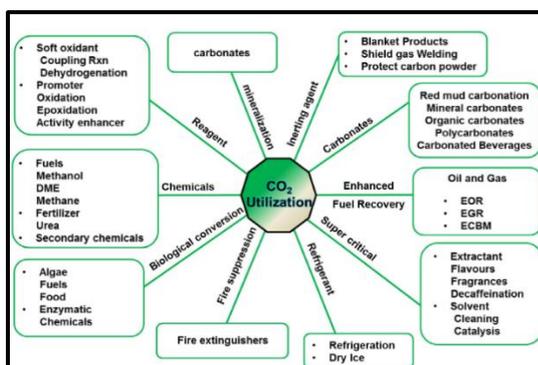
Gambar 3. Metode Pemisahan CO₂ (Gulzar dkk., 2020)

Gulzar dkk. (2020) meneliti alternatif potensial untuk CCS adalah penangkapan dan pemanfaatan karbon dioksida (CCU) dimana ini menjadi perhatian utama karena dapat dikembangkan secara berkelanjutan dan

dianggap sebagai solusi permanen untuk masalah CO₂. Dalam beberapa tahun terakhir telah terjadi kemajuan besar di bidang ini dan upaya pemanfaatan CO₂ sedang dikembangkan sebagai bahan baku kimia, konversi biologi,

pereaksi kimia, mineralisasi, sebagai *inert gas*, karbonisasi, meningkatkan perolehan bahan bakar (minyak dan gas), fasa super kritis dan

lainnya. Seluruh proses CCU lainnya dapat dilihat pada gambar.



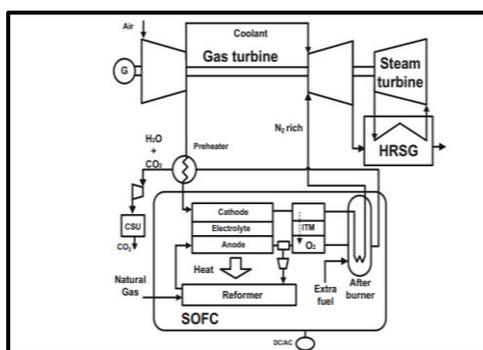
Gambar 4. Pemanfaatan CO₂ (Ansari dkk., 2020)

Brittanica (2023) menerangkan di era sekarang sequestrasi karbon tengah gencar dilakukan, dimana 2200 gigaton CO₂ global telah berhasil diinjeksikan kembali kedalam formasi geologi. Di samping keberhasilan tersebut, *carbon storage* menghadapi masalah teknis seperti, kemungkinan kebocoran, ditentang masyarakat pada penyimpanan di darat, sedangkan dalam kasus penyimpanan di laut dalam dapat menyebabkan penurunan pH dan dapat merusak ekosistem laut. Maka dari itu tujuan penulisan makalah ini adalah untuk menganalisa kinerja integrasi pembangkit listrik ITM-SOFC/GTCC *Triple Combined Cycle* dengan *Carbon Capture*, analisis sequestrasi karbon dioksida pada formasi arang atas, beserta kelayakan ekonominya. Hasil dari penelitian ini, diharapkan integrasi pembangkit listrik dengan teknologi *carbon capture* tersebut dapat diterapkan secara luas agar membantu tercapainya target *net zero emission* dan terhindar dari krisis iklim, serta tetap memperhatikan aspek keberlanjutan, efisiensi, kegunaan, ekonomis, dan kelayakan dalam penerapannya.

II. Bahan dan Metode

Dalam penelitian ini, *authors* melakukan beberapa analisis efisiensi dari integrasi teknologi, skema transport CO₂ dan mekanisme penyimpanan karbon untuk sequestrasi karbon dalam kaitannya untuk meningkatkan jumlah produksi sumur gas dan kelayakan secara ekonomi untuk direalisasikan. Studi ini diawali dengan mengidentifikasi permasalahan yang ada, kemudian dilanjutkan dengan melakukan desain skenario metode CCUS, pada tahapan ini penulis mendesain integrasi teknologi yang ada dengan pertimbangan efisiensi *carbon capture*, dan keefektifan dalam menangkap karbon. Alur kerja dilanjutkan dengan analisis ekonomi meliputi analisis biaya operasional (*operational expenditure*), biaya modal (*capital expenditure*), kemudian didapatkan indikator keekonomian seperti *net present value* (NPV), *present value* (PV), *capital rate return*, *internal rate of return* (IRR), *pay out time* (POT), dan *profit investment ratio* (PIR).

II.1. ITM SOFC/GTCC *Triple Combined Cycle* dengan *Carbon Capture*



Gambar 5. Integrasi SOFC/GTCC Oxy-ITM (Ji Hun Jeong dkk., 2019)

ITM-SOFC/GTCC *Triple Combined Cycle* dengan *Carbon Capture* adalah inovasi

teknologi pembangkit listrik dimana diterapkan pembangkit utama yakni generator gas dan

steam turbin, yang diintegrasikan dengan *solid oxide fuel cell* sebagai pembangkit panas dan listrik yang menjadi suplai energi untuk *reformer*. Untuk menghasilkan energi panas yang maksimal, pembakaran hidrokarbon harus dengan oksigen dengan kemurnian tinggi. Maka dari itu diperlukan *Ion Transport Membrane* untuk menghasilkan oksigen murni dari udara yang masuk. Untuk mencapai kondisi ideal operasi yakni pada temperature 700-900°C dan tekanan 13-20 bar, ITM membutuhkan energi yang relatif banyak untuk mencapainya, sehingga diperlukan inovasi agar ITM dapat bekerja secara efisien. Maka dari itu ITM dikombinasikan dengan SOFC, gas keluaran SOFC memiliki temperature 900°C dan tekanan 18 bar, sehingga ITM dapat bekerja dengan maksimal. *Flue gas* dari SOFC akan diteruskan melalui ITM menuju *after burner* dimana terjadi pembakaran, yang kemudian gas bertemperatur tinggi kaya karbon dioksida, nitrogen dan uap air hasil pembakaran tersebut menuju turbin ganda untuk menghasilkan listrik yang lebih besar. Karbon dioksida hasil pembakaran akan dipisahkan dengan proses *monoethanolamine* (MEA).

1. Solid Oxide Fuel Cell

Solid Oxide Fuel Cell adalah teknologi konversi energi kimia pada bahan bakar (hidrokarbon) menjadi energi panas dan listrik tanpa pembakaran. Listrik adalah elektron yang bergerak dan elemen seperti hidrogen, oksigen dan lainnya memiliki variasi nilai elektron. Cara kerja SOFC yaitu pertama-tama bahan bakar (*natural gas*) masuk ke dalam *reformer* dimana hidrokarbon akan menjadi hidrogen (H₂), karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂) dan uap air melalui proses gasifikasi. Gas hasil *reformer* tadi memasuki *fuel cell* melalui anoda sedangkan udara dari *preheater* memasuki katoda. Oksigen pada udara berkombinasi dengan elektron bebas menjadi ion oksida. Ion oksida bersama-sama dengan elektron bebas berpindah dari katoda ke anoda melewati elektrolit. Pada anoda, ion oksida bereaksi dengan uap air dan karbon monoksida menjadi karbon dioksida. Reaksi tersebut melepas elektron bebas, yang nantinya berpindah ke katoda melewati *external electrical circuit* dan memproduksi listrik. Pada teknologi ini rangkaian SOFC dipadukan dengan *ion transport membrane* dan *after burner* agar menghasilkan panas yang maksimal untuk menjalankan turbin.

2. ITM

Ion Transport Membranes (ITMs) adalah teknologi untuk memisahkan oksigen dengan kemurnian tinggi dari udara. ITM terbuat dari material keramik yang menghantarkan oksigen pada suhu tinggi. Teknologi ini memiliki potensi keuntungan yang signifikan apabila diintegrasikan dengan siklus pembangkit listrik yang canggih seperti GTCC Triple Combined Cycle. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya ITM bersinergi dengan SOFC menghasilkan efisiensi energi yang tinggi dan hasil pembakaran yang bertemperatur tinggi. Tekanan operasi dari ITM dijaga oleh tekanan udara dari kompresor turbin gas dan temperatur operasi dijaga oleh temperature gas keluaran SOFC. Oksigen dari ITM digunakan pada pembakaran di *after burner* menghasilkan gas bertemperatur tinggi yang akan digunakan membangkitkan listrik pada generator-generator turbin.

3. GTCC

Gas Turbine Combined Cycle tipe Siemens SCC6-5000 F dipilih sebagai dasar siklus gabungan rangkap tiga. Aplikasi kombinasi ini memiliki turbin gas SGT6-5000F, *heat recovery steam generator three-pressure*, turbin uap, pompa kondensat, *boiler*, dan *cooling system*. Pada turbin gas sudah tidak memerlukan *combustor* tambahan, cukup dengan *afterburner* untuk mencapai *inlet temperature turbine* karena pembakaran pada *after burner* menggunakan oksigen dengan tingkat kemurnian tinggi sehingga suhu pembakaran cenderung tinggi. HRSG digunakan untuk memanaskan ulang kemudian menghasilkan uap yang akan menggerakkan turbin uap. Gas buangnya mengalir secara horizontal melalui HRSG dan melepaskan panas melalui tabung bersirip ke siklus uap. Uap yang dihasilkan dalam HRSG disuplai ke turbin uap dua silinder, setelah itu dipanaskan ulang kemudian dikondensasi dengan *blading* efisiensi tinggi. Kondensat dipompa dari kondensor oleh pompa kondensat. Kondensat kemudian melewati *economizer* suhu rendah di HRSG sebelum memasuki bagian pompa *boiler*. Pembangkit listrik siklus gabungan memiliki ciri khas yakni menggunakan kondensor berpendingin air pada *wet cooling tower*.

Optimalisasi Dekarbonisasi dengan Integrasi *Solid Oxide Fuel Cell (Sofc) Gas Turbine Combined Cycle* dan *Oxy-Itm* Dengan Analisis Sekuestrasi Karbon: Studi Kasus Lapangan “ZT”

Tabel 1. Desain Parameter dan Data Kinerja GTCC (Ji Hun Jeong dkk., 2019)

	Item	Reference [16,35] ²	Model
Gas turbine (F-class)	Compressor inlet air flow rate [kg/s]	563.4	563.4
	Turbine inlet temperature [°C]	–	1457
	Exhausted gas temperature [°C]	597.8	597.8
	Compressor pressure ratio	18.9	18.9
	Compressor polytropic efficiency [%]	–	89.0
	Turbine polytropic efficiency [%]	–	88.3
	Generator efficiency [%]	–	98.5
	Pressure losses [%]	–	0.5–4.0
	High/Intermediate/Low pressure [kPa]	12,400/3100/–	12,400/3100/448
	HP/IP steam temperature [°C]	558.0/533.0	562.0/533.0
HRSG	HP/IP/LP turbine polytropic efficiency [%]	–	86.8/90.5/91.0
	Condensing pressure [kPa]	–	4.62
	HP/IP/LP pinch temperature difference [°C]	–	15/10/10
	Pump isentropic efficiency [%]	80.0	80.0
	Pressure losses [%]	0.5–5.0	0.5–5.0
	Motor efficiency [%]	95.0	95.0
	Generator efficiency [%]	98.5	98.5
	GTCC gross power [MW]	365.0	361.5
	Gas turbine power [MW]	242.0	242.0
	Steam turbine power [MW]	123.0	119.5
GTCC Performance	GTCC net power [MW]	360.0	360.0
	GTCC efficiency [%]	58.0	58.0

4. Carbon Capture

Penelitian terbaru tentang *carbon capture* berfokus pada optimalisasi absorpsi CO₂ menggunakan *amine* terutama *monoethanolamine*-MEA untuk meminimalkan konsumsi energi dari proses yang sangat intensif energi ini dan meningkatkan efisiensi absorpsi-nya. Perhatian utama muncul pada proses produksi pelarut, penggunaan dan regenerasi pelarut, dan efek lingkungan yang terkait dengan emisinya. Regenerasi pelarut setelah penyerapan juga adalah sumber CO₂ tidak langsung, hal ini berkaitan dengan penggunaan bahan bakar (yaitu, proses pembakaran untuk pasokan energi). Penggunaan MEA dan jenis *amine* lainnya dalam CO₂ *capture* adalah titik perhatian global. Karena suhu aliran yang disuplai ke

afterburner tinggi, pasokan tambahan bahan bakar untuk mempertahankan TIT berkurang dan konsumsi daya CSU menurun. Pembakaran *natural gas* dengan oksigen dengan kemurnian tinggi menghasilkan gas buangan CO₂ dengan kemurnian tinggi dan H₂O, hal ini memaksimalkan *capture rate* karbon dioksida hingga 99,9%.

II.2. Skema Pengembangan Lapangan dengan SOFC/GTCC Oxy-ITM

Pendemostrasian pengembangan di lapangan “ZT” dilakukan dengan menyalurkan 10% dari produksi gas eksisting akan disalurkan ke *surface facilities* menggunakan *pipeline*. Lapangan “ZT” merupakan lapangan yang mengandung *impurities* CO₂ dalam jumlah yang besar.



Gambar 6. Lokasi Studi Lapangan “ZT” (Google Earth)

Untuk mendemostrasikan metode integrasi teknologi CCUS yang diusulkan, dilakukan rencana pengembangan dengan mendesain pembangkit listrik yang minim konsumsi energi, yang berbahan bakar *natural gas* dimana nantinya pembangkit listrik ini akan diintegrasikan dengan teknologi *carbon capture*, *ion transport membrane* sebagai *air*

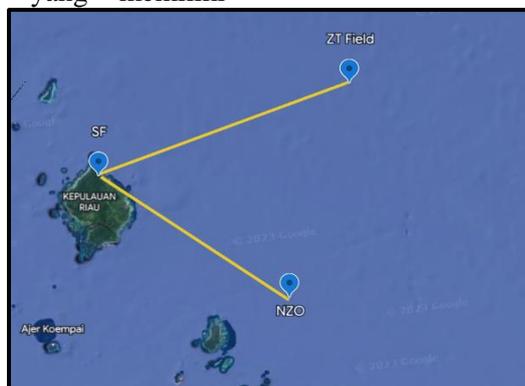
separation unit dengan *solid oxide fuel cell* (SOFC) dan *gas turbine combined cycle* (GTCC) yang memiliki tingkat *capture rate* sebesar 99,9%.

III.3. Skenario Carbon Storage

Dalam proyek penyimpanan karbon di lapangan “ZT”, perencanaan untuk injeksi karbon dilakukan di sumur NZO yang terletak di

tenggara Kepulauan Natuna (Gambar 7). Dalam proyek ini, transportasi akan dilakukan setelah pemisahan dilakukan di fasilitas pengolahan darat menggunakan pipa paduan mikro sepanjang 174 km, di mana CO₂ akan diangkut dalam fase superkritis. CO₂ injection akan dilakukan pada reservoir yang memiliki

karakteristik seperti reservoir migas pada umumnya. Target injeksi dilakukan pada reservoir yang memiliki batuan berpori permeabel dan memiliki batuan segel, sehingga CO₂ yang disuntikkan dapat terperangkap dan tidak tersebar di sekitar lingkungan.



Gambar 7. Lokasi Sumur Injeksi Karbon (Google Earth)

1. Pemilihan Pipa Transport untuk CO₂

Tipe yang paling cocok dari jaringan pipa transportasi CO₂ harus dipertimbangkan untuk eksploitasi skala besar, di mana CO₂ dipanen dari berbagai sumber titik dan dikirim dalam jarak yang sangat jauh untuk penyimpanan. Salah satu aspek penting mengenai pemilihan

pipa adalah sifat mekanik pipa, seperti ketangguhan dan kekuatannya, yang berhubungan langsung dengan ketebalannya. Selain itu, karena CO₂ yang diangkut dalam keadaan superkritis maka pemilihan bahan yang tepat untuk pipa juga merupakan aspek yang sangat penting.

Tabel 2. Mechanical Properties of Pipeline Grade Steel (Onyebuchi dkk., 2017)

Grade	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Yield ratio (%)	Elongation (%)	CVN impact energy at 0 °C (J)	CVN impact energy at -50 °C (J)
X60	461	553	83	21	194	187
X80	550	658	84	20	211	200
X100	690	780	88	25	212	197
X120	827	931	89	28	287	231

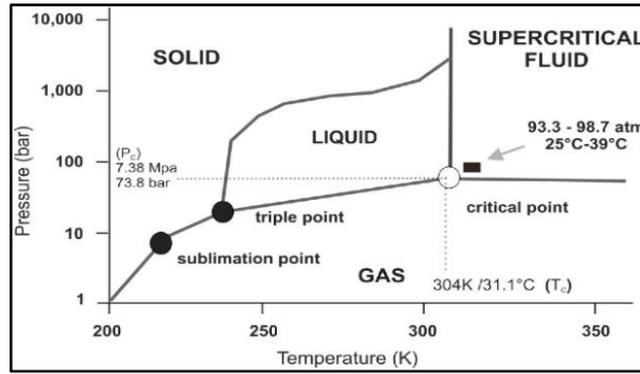
Bahan baja paduan mikro yang diterapkan dalam proyek pipa transportasi CO₂ memiliki kekuatan material yang tinggi. Hal ini diperoleh melalui kombinasi yang sesuai dari perlakuan termal dan mekanis, serta komposisi bahan yang menghasilkan kualitas tinggi. Akibatnya, keseimbangan realistis antara ketangguhan material dan kekuatannya diperoleh. (Tabel 2) bagaimana tingkat baja yang digunakan dalam pipa pengangkut CO₂, yang dapat bervariasi dari X60 hingga X120, menunjukkan ketangguhan dan kekuatan material minimum yang

diperlukan bersama dengan hasil uji benturan Charpy-V-notch (CVN), yang diterapkan pada spesifikasi ketangguhan.

2. CO₂ Supercritical

Untuk mentransport CO₂ dan menginjeksikannya direncanakan transportasi dan injeksi dengan menggunakan kondisi *supercritical fluid* dimana fase ini CO₂ akan dikompresi sehingga lebih ringan dari fase cairnya, dan lebih berat dari fase gasnya.

Optimalisasi Dekarbonisasi dengan Integrasi *Solid Oxide Fuel Cell (Sofc) Gas Turbine Combined Cycle* dan Oxy-Itm Dengan Analisis Sekuestrasi Karbon: Studi Kasus Lapangan “ZT”



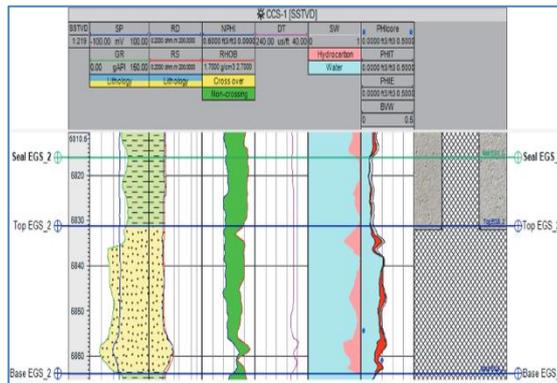
Gambar 8. Perubahan Fasa (Steve, 2016)

Pengondisian CO₂ pada tekanan 72,9 atm (1.057 psia) dan suhu 31,1 °C (88 °F) dapat menghasilkan CO₂ superkritis dengan kepadatan 250 kg/m³ hingga 850 kg/m³. Pada fase ini memiliki banyak keuntungan dalam transportasi CO₂ dikarenakan akan mentransport lebih banyak CO₂ dengan kepadatan tinggi dan bersifat lebih sedikit korosif daripada fase gas atau cair.

3. Karakteristik Reservoir untuk *Carbon Storage*

Reservoir yang akan digunakan sebagai target injeksi CO₂ terletak pada Formasi Arang Atas, dimana target kedalaman memiliki komposisi litologi yang cukup dengan dominasi batupasir sebagai wadah penyimpanan CO₂ dan

serpih sebagai segel batuan (Gambar 9). Formasi batupasir pada kedalaman 6831 ft-6863 ft memiliki sifat berpori dan permeabel sehingga cocok sebagai wadah penyimpanan CO₂, dengan sifat ini CO₂ superkritis dapat disuntikkan ke dalam pori-pori batuan. Pada kedalaman injeksi yang ditargetkan, reservoir memiliki ketebalan 32 ft dan untuk *seal rock* memiliki kedalaman 6816ft-6831ft dan ketebalan 15 ft (Gambar 10) berupa *shale rock* yang akan menjebak CO₂ dan tidak naik ke permukaan, sehingga CO₂ dapat terjaga dengan baik di dalam reservoir. CO₂ rencananya akan disuntikkan ke zona air sehingga akan membantu dalam memitigasi CO₂ sehingga dapat terperangkap dengan lebih baik.



Gambar 9. Deskripsi Reservoir dan Seal (Cherdasa J. dkk., 2018)

CCSU	Reservoir	Seal
Lithology	Sandstone	Shale
Depth (ft)	6831 - 6863	6816 - 6831
Thickness (ft)	32	15
VClay	0.261	0.606
PHIE	0.188	0.088
PHIT	0.199	0.112
SW	0.83	0.93
Pressure (psi)	3543	3365
Temperature (°F)	335	335

Gambar 10. Property Storage dan Seal (Cherdasa J. dkk., 2018)

Volume bulk yang diproyeksikan, volume pori, volume pori CO₂, dan kapasitas penyimpanan diperkirakan di lokasi reservoir yang dimaksudkan pada Formasi Arang Atas. Dalam perhitungan keseluruhan proyek selama 15 tahun, estimasi CO₂ yang diserap adalah 25,5 Mt/tahun; lapangan “ZT” memiliki total

penyerapan emisi karbon dari CLC sebesar 1,7 Mt/tahun. Kapasitas yang diantisipasi dari reservoir target di sumur penyimpanan karbon PLT-1 adalah 70,29 Mt (Gambar 10), sehingga memungkinkan untuk menyimpan emisi CO₂ yang diserap dari Lapangan “ZT” selama 15 tahun di reservoir ini.

Volumetric Result	Value
Bulk Volume (BCF)	44.21
Pore Volume (BCF)	8.31
CO ₂ Pore Volume (BCF)	6.15
Storage Capacity (BSCF)	1,308.63
Storage Capacity (MM Tonnes)	70.29

Gambar 11. Estimasi Volume Reservoir Target (Cherdasa J. *et al.*, 2018)

III. Hasil dan Pembahasan

1. Analisis Potensi

Perkiraan biaya proyek pada SOFC/GTCC

dihitung berdasarkan literature yang ditunjukkan tabel 3.

Tabel 3. Capital Expenditure

CAPEX	
SOFC Stack	\$ 12,10
SOFC afterburner	\$ 0,03
SOFC inverter	\$ 1,10
SOFC auxiliaries	\$ 1,20
GT	\$ 7,3
AC	\$ 0,41
FC	\$ 0,41
CC	\$ 0,05
HEAT EXCHANGER	\$ 0,05
GENERATOR	\$ 0,20
TOTAL	\$ 23.230.000
MMUSD	\$ 23,23
CAPEX CASE(MMUSD)	\$ 1.100,00
PIPA CS-SF 174 km (MMUSD)	33,089
PIPA WELL-SF 187 km (MMUSD)	35,561
Construction Onshore Infrastructure	\$ 500,00
TOTAL CAPEX (MMUSD)	\$ 1.691

2. Analisis Pehitungan Ekonomi

Analisis ekonomi turut dikaji untuk membuktikan kelayakan penerapan teknologi CCUS dengan integrasi *Solid oxide fuel* (SOFC) dan *Gas Turbin combined Cycle* (GTCC). Terdapat beberapa indikator ekonomi yang akan dibandingkan untuk setiap skenario, yaitu net present value (NPV), present value for capital expenditure (PV Capital), internal rate of return (IRR), payout time (POT), dan profit to investment ratio (PIR). Parameter-parameter

tersebut menjadi pertimbangan untuk membuktikan bahwa aplikasi CCUS dengan teknologi ini layak untuk diimplementasikan sebagai pengganti aktivitas. Selain itu, skema proyek yang digunakan untuk perhitungan adalah skema proyek Production Sharing Contract (PSC) Gross Split yang didasarkan pada Peraturan Menteri ESDM Nomor 52 Tahun 2017 dan Nomor 24 Tahun 2018 dengan tingkat diskonto 10%.

Optimalisasi Dekarbonisasi dengan Integrasi *Solid Oxide Fuel Cell (Sofc) Gas Turbine Combined Cycle* dan Oxy-Itm Dengan Analisis Sekuestrasi Karbon: Studi Kasus Lapangan “ZT”

Tabel 4. Hasil Analisis Ekonomi

Indikator	Units	
NCF	\$	3.546,11
NPV	\$	1.338,91
POR	%	26,03
PIR		2,1
DPIR		1,8
POT	years	3,3

Analisis ekonomi yang digunakan dengan PSC cost recovery dengan parameter yang diambil dari berbagai referensi literatur dan asumsi yang dibuat-buat, antara lain tingkat produksi, harga produk, belanja modal dan operasional, discount rate, DMO, pajak, dan waktu produksi. Perhitungan yang dilakukan dengan output yang diberikan adalah Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Profit/Investment Ratio (PIR), Discounted Profit/Investment Ratio (DPIR),

dan Pay Out Time (POT) yang digunakan untuk mengevaluasi SOFC/GTCC

Berdasarkan hasil analisis keekonomoan ditinjau dari Tabel 2 menunjukan hasil indikator ekonomi berupa NCF yang didapatkan 3.546,11, dan NPV didapatkan 1.338,91, POR didapatkan 26,03 %, PIR 2,1, DPIR 1,8 dan POT yang 3,3 tahun. Analisis dari indikator ekonomi didapatkan nilai POR yang lebih dari 12%, dan *pay out timr* (POT) yang cepat yaitu pada 3,3 tahun, serta nilai POR, PIR, DPIR yang menunjukan nilai yang lebih positif.

3. Analisis Efisiensi Alat

Bedasarkan teknologi yang diimplementasikan pada lapangan “ZT” ynag mengintegrasikan Solid Oxide Fuel (SOFC) dan Gas Turbin

Combined Cycle-OXY ITM, ditunjukkan pada gambar 12.

Item	Reference system	Post system	Oxy-ASU	Oxy-ITM (CO ₂ -HX)
CO ₂ capture rate [%]	0	90	99.9	99.9
CO ₂ purity [%]	–	99.6	90.3	97.4
Total coolant fraction ³ [%]	21.7	21.8	25.9	15.8
Turbine exhausted temperature [°C]	631.3	638.6	764.6	590.9
Specific heat capacity at turbine inlet [kJ/kg-K]	1.425	1.425	1.492	1.250
GTCC power [MW]	373.9	317.3	544.8	232.3
GT power [MW]	237.0	231.5	332.9	137.5
ST power [MW]	136.9	85.8	211.9	94.8
Fuel cell power [MW]	393.6	393.0	499.6	423.1
CO ₂ expander power [MW]	–	–	–	70.9
Total power consumption [MW]	1.8	26.0	155.1	30.4
ASU power consumption [MW]	–	–	116.4	–
CSU power consumption [MW]	–	24.2	36.4	28.5
Auxiliary power consumption [MW]	1.8	1.8	2.3	1.9
Total fuel supply [kg/s]	21.7	21.6	29.9	20.7
Fuel to fuel cell [kg/s]	14.3	14.2	18.1	15.3
Fuel to gas turbine [kg/s]	7.4	7.4	11.8	5.4
Net power [MW]	765.7	684.3	889.3	695.9
Net efficiency [%]	71.7	64.2	60.4	68.2

Gambar 12. Performa dari SOFC/GTCC dengan Carbon Capture (Ji Hun Jeong dkk., 2019)

Pada gambar 12. Kolom ke-5 menunjukan performance *carbon capture* menggunakan teknologi SOFC/GTCC apabila di integrasikan dengan OXY-ITM, dimana apabila menggunakan teknologi ini maka tidak dibutuhkan *Air Separation Unit* (ASU) sehingga konsumsi daya untuk memisahkan oksigen adalah 0, dan dengan *capture rate* tinggi, yaitu 99,9%, *net power* yang rendah dan net efisiensi 68,2% lebih tinggi dari OXY-ITM. xsehingga konsumsi daya untuk

memisahkan oksigen adalah 0, dan dengan *capture rate* tinggi, yaitu 99,9%, *net power* yang rendah dan net efisiensi 68,2% lebih tinggi dari OXY-ITM.

IV. Kesimpulan

Perubahan iklim merupakan permasalahan signifikan yang sedang dialami oleh masyarakat global saat ini. Untuk menghindari efek pemanasan global, ditetapkan pembatasan kenaikan suhu global rata-rata hingga 2°C. Penggunaan pembangkit listrik dengan

menginterasikan teknologi *carbon capture* merupakan implementasi langkah dekarbonisasi pada studi kasus lapangan “ZT”, Teknologi ini memiliki nilai *capture rate* hingga mencapai 99,9%, dan tingkat net efisiensi yang lebih tinggi yaitu mencapai 68,2% dari OXY-ASU dan penggunaan teknologi memiliki tingkat kemurnian karbon 97,4%. CO₂ hasil dari pembakaran akan demonstrasi pengurangan emisi dengan melakukan sekuertasi karbon.

Hasil indikator ekonomi berupa NCF yang didapatkan 3.546,11, dan NPV didapatkan 1.338,91, POR didapatkan 26,03 %, PIR 2,1, DPIR 1,8 dan POT yang 3,3 tahun. Analisis dari indikator ekonomi didapatkan nilai POR yang lebih dari 12%, dan *pay out timr* (POT) yang cepat yaitu pada 3,3 tahun, serta nilai POR, PIR, DPIR yang menunjukkan nilai yang lebih positif.

V. 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, 6.
- Cherdasa, J. R., Prabowo, K., Ariadji, T., Sapiie, B., & Syihab, Z. (2018). Formation Evaluation and Contingent Storage Capacity Estimation for Carbon Capture Storage and Utilization: A Case Study from East Natuna. *Modern Applied Science*, 12(4), 151-170.
- Da Silveira Cachola, C., Ciotta, M., dos Santos, A. A., & Peyerl, D. (2023). DEPLOYING OF THE CARBON CAPTURE TECHNOLOGIES FOR CO₂ EMISSION MITIGATION IN THE INDUSTRIAL SECTORS. *Carbon Capture Science & Technology*, 100102.
- Eveloy, V., Karunkeyoon, W., Rodgers, P., & Al Alili, A. (2016). Energy, exergy and economic analysis of an integrated solid oxide fuel cell–gas turbine–organic Rankine power generation system. *International journal of hydrogen energy*, 41(31), 13843-13858.
- Gulzar, A., Gulzar, A., Ansari, M. B., He, F., Gai, S., & Yang, P. (2020). Carbon dioxide utilization: A paradigm shift with CO₂ economy. *Chemical Engineering Journal Advances*, 3, 100013.
- Hosseini, S. M., Aslani, A., & Kasaeian, A. (2023). Life cycle cost and environmental assessment of CO₂ utilization in the beverage industry: A natural gas-fired power plant equipped with post-combustion CO₂ capture. *Energy Reports*, 9, 414-436.
- Jeong, J. H., Ahn, J. H., & Kim, T. S. (2019). Application of ITM to improve the efficiency of SOFC/GTCC triple combined cycle with carbon capture. *Energy*, 182, 1141-1153.
- Zaemi, F. F., & Rohmana, R. C. (2021). Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) untuk Pembangunan Berkelanjutan: Potensi dan Tantangan di Industri Migas Indonesia. *Prosiding SATU BUMI*, 3(1).