

ANALISIS *CARBON CAPTURE STORAGE* DARI EKSPLOKASI MIGAS DALAM MENCAKAI *SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS*

CARBON CAPTURE STORAGE ANALYSIS FROM PETROLEUM EXPLORATION TO REACH SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

Stefanny R. Amina^{1*}, Amanda T. Deborah², Muhammad D. Wajdi³

^{1,2,3}Departemen Geosains, Universitas Indonesia

Received: 2021, October 31th
Accepted: 2022, February 7th

Keywords:

CCS;
CO₂;
Exploration;
Petroleum;
SDGs.

Correspondent Email:

stefanny.rizika@ui.ac.id

How to cite this article:

Amina, S., Deborah, A., & Wajdi, M. D. (2022). Analisis Carbon Capture Storage Dari Eksplorasi Migas Dalam Mencapai Sustainable Development Goals. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 08(01), 44-57.

Abstrak. Sebagai salah satu negara penghasil hidrokarbon terbesar di Asia Tenggara, saat ini Indonesia masih menggarap cadangan energi yang terdampak dari penundaan eksplorasi sumur pada tahun 2020. Kondisi target eksplorasi pada cekungan di wilayah Indonesia membutuhkan peran seluruh pemangku kebijakan dalam mencegah dan mengurangi emisi CO₂ yang dihasilkan dari sumur minyak dan gas yang mati, lapangan minyak dan gas yang sudah tua, dan blok yang berpotensi untuk eksplorasi minyak dan gas. Pada kajian ini, terdapat analisis CCS dengan mengidentifikasi karakteristik dari penyekat patahan, menganalisis sekuestrasi yang bekerja tepat untuk blok migas, serta analisis terhadap isu SDGs dengan sudut pandang analisis SWOT dan PESTLE di Indonesia. Langkah ini sejalan dengan Rencana Aksi Nasional Indonesia dalam mengurangi hingga 40% emisi CO₂. Dalam studi ini, keikutsertaan dari para pegiat industri dan pemangku kebijakan dalam rangka pencapaian SDGs sangat krusial dari berbagai aspek. Hal ini diperlukan untuk melancarkan transformasi besar dari sistem energi global agar mampu mengubah prospeksi untuk merealisasikan tiga nilai SDGs yang terkait dengan energi, yaitu mengurangi dampak kesehatan yang parah akibat polusi udara (SDGs no.3), untuk mencapai akses energi yang terjangkau secara menyeluruh (SDGs no.7), dan untuk mengatasi perubahan iklim (SDGs no. 13).

Abstract. As one of the largest hydrocarbon-producing countries in Southeast Asia, Indonesia is currently working on energy reserves affected by the delay of well exploration in 2020. The condition of exploration targets in Indonesia's basins requires the policy makers' role to prevent and reduce CO₂ emissions resulting from dead oil and gas wells, old oil-and-gas fields, and potential blocks for petroleum exploration. In this study, there is an analysis of CCS carried out by identifying the characteristics of fault barriers in Indonesia's petroleum fields, analyzing the sequestration that works well for petroleum blocks,

© 2022 JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi). This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

and an analysis of the SDGs issue by doing SWOT and PESTLE analysis. It is in line with Indonesia's National Action in reducing up to 40% CO₂ emissions. It was found that the participation of industry activists and policymakers in of achieving the SDGs was crucial from various aspects. It is necessary to implement a major transformation of the global energy system that can change prospects to realize the energy-related SDGs simultaneously, such as to reduce severe health impacts of air pollution (SDGs no.3), to achieve universal energy access (SDGs no.7), and to tackle climate change (SDGs no. 13).

1. PENDAHULUAN

Mayoritas konsumsi energi di dunia saat ini bergantung pada sumber daya yang berasal dari alam hingga mencapai 80 persen (Misra dkk., 2021). Angka kegiatan konsumsi energi pun turut meningkat secara global, sehingga memerlukan perubahan kebiasaan secara konstruktif sebagai inovasi dan investasi global dalam mereduksi jumlah emisi CO₂. Salah satu metode yang menjadi solusinya saat ini yaitu *Carbon Capture Storage* (CCS). CCS merupakan sistem penyimpanan yang digunakan untuk menerima dan menyimpan lepasan karbon dari industri maupun pembangkit listrik ke dalam formasi geologi secara aman dan permanen dengan kapasitas tertentu dalam jangka waktu yang panjang (World Bank, 2015). Metode CCS memanfaatkan teknologi dengan mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu, dengan tujuan utama untuk melakukan dekarbonisasi, yang salah satunya merupakan dampak dari aktivitas eksplorasi minyak dan gas.

CCS semakin intens dilakukan sejak diumumkannya pendanaan sebesar 800 euro untuk CCS (IEA, 2020) dan pelaksanaan penelitian untuk menciptakan solusi CCS yang layak untuk digunakan pada skala yang besar di tahun 2030 (CCUS Cost Challenge Taskforce, 2018). Pelaksanaan CCS pada cekungan di China telah terbukti memberikan potensi penyimpanan CO₂ yang besar. Salah satunya yaitu pada Cekungan Ordos yang merupakan cekungan sedimen di area pegunungan. Proyek CCS secara masif hingga mencapai 73% juga diterapkan pada negara-negara di luar Asia, diantaranya yaitu Kanada dan Amerika Serikat (Page, 2019). Proyek ini bertujuan untuk pelaksanaan EOR yang melibatkan injeksi CO₂ untuk

menggantikan hidrokarbon menuju sumur ekstraksi untuk meningkatkan hasil cadangan.

Pelaksanaan pengeboran sumur pada cekungan di Indonesia juga perlu diimbangi dengan pelaksanaan CCS. Namun, sistem penilaian kelayakan yang dilakukan dengan analisis geologi harus teridentifikasi untuk memastikan tujuan pelaksanaan CCS yang diharapkan mampu merealisasikan dekarbonisasi yang dinilai sesuai kelayakannya. Untuk melakukan studi kelayakan terkait kemampuan suatu formasi geologi terhadap penerapan CCS harus memenuhi salah satu dari beberapa karakteristik, apakah (i) terdapat kapasitas yang cukup untuk CO₂, (ii) CO₂ yang diinjeksi mampu berpindah melalui formasi, (iii) mineralogi dari area tersebut cocok dan layak untuk menginduksi reaksi perpindahan ganda. Studi ini melakukan pendekatan yang menjelaskan salah satu dari tiga karakteristik formasi geologi melalui analisis penyekat patahan serta sekuestrasi dari formasi pada lapangan penghasil hidrokarbon di Indonesia Timur, yaitu Cekungan Bintuni. Pendekatan terhadap aspek lain yang lebih luas menjadi suatu isu nasional bagi Indonesia, sehingga dilakukan analisis SWOT (*Strength, Weakness, Opportunity, and Threat*) dan PESTLE (*Political, Economical, Social, Technological, Legal, and Environmental*) terhadap pelaksanaan CCS di Indonesia. Oleh karena itu, diperlukan studi yang mampu memberikan pengetahuan mengenai pengaruh dari CCS terhadap SDGs agar dapat dipertimbangkan kelayakan sebagai dasar pelaksanaan CCS yang dilakukan secara komprehensif sebagai tindak lanjut dari

pengurangan dampak emisi CO₂ dari eksplorasi minyak dan gas.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Carbon Capture Storage

Proses CCS secara umum didefinisikan sebagai langkah dari dekarbonisasi. Proses CCS lebih familiar dengan proses yang berlangsung untuk menangkap karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan selama penggunaan pembangkit listrik maupun proses industri serta menyimpannya agar tidak dipancarkan ke atmosfer (Gonzales dkk., 2020). Jadi, CCS dalam ranah minyak dan gas tentunya tidak melewatkan proses penangkapan CO₂, pengangkutan, dan penyimpanan CO₂ dari segala hal yang dilakukan selama proses produksi.

Secara umum, CO₂ dapat tersimpan di lokasi bawah permukaan yang merupakan akuifer dengan salinitas tinggi pada kedalaman, lapisan batubara, reservoir nonkonvensional, dan reservoir minyak yang telah habis (Vo dkk., 2020). CCS yang tepat meliputi kajian pada reservoir yang dibentuk oleh batuan karbonat maupun batupasir dengan karakteristik yang mumpuni. Penelitian CCS pada reservoir dengan salinitas yang tinggi juga dijadikan sebagai salah satu karakteristik yang berpotensi menyukkseskan CCS karena keberadaannya yang signifikan di berbagai lingkungan pengendapan serta penggunaannya yang relatif masih sedikit (Bachu, 2015; De Silva dkk., 2015). Selain itu, telah dilakukannya proses *abandonment* pada lapangan hidrokarbon dapat digunakan sebagai lapangan CCS dengan studi yang telah dilakukan ketika ekstraksi hidrokarbon dan telah adanya infrastruktur yang digunakan sebelumnya. Injeksi hidrokarbon dapat dilakukan di area ini karena akan menghasilkan pelaksanaan CCS yang lebih ekonomis.

2.2. Sustainable Development Goals

Sejak berlakunya Perjanjian Paris pada tahun 2015 (UNFCCC, 2015), sebanyak 191 pihak yang meliputi 190 negara serta negara-negara yang tergabung dalam Uni Eropa menyetujui adanya SDGs. Masing-

masing dari 17 nilai dalam SDGs berproyeksi langsung terhadap komitmen dari seluruh pihak yang menyetujui Perjanjian Paris untuk mereduksi emisi karbon dan beradaptasi untuk memberikan dampak yang nyata dalam rangka perubahan iklim. SDGs meliputi segala aspek kehidupan, tidak terkecuali untuk kegiatan eksplorasi migas serta emisi yang dihasilkan dari serangkaian kegiatan produksi dalam industri migas. Terdapat tiga proyeksi yang dicakup dalam SDGs yang berdampak langsung dengan penggunaan energi dari konsumsi hasil produksi migas, diantaranya yaitu pengurangan dampak kesehatan yang parah akibat polusi udara, pencapaian akses energi yang terjangkau secara menyeluruh, serta solusi untuk perubahan iklim.

2.3. Sekuestrasi Karbon

CO₂ dihasilkan sebagai dampak dari penggunaan energi fosil yang akan berdampak ke atmosfer. Pengurangan dampak buruk akibat produksi CO₂ dari aktivitas industri dilakukan dengan proses sekuestrasi karbon. Salah satu dari dua kategori area yang diajukan sebagai tempat yang layak dan tepat untuk melakukan CCS yaitu pada bagian dari struktur geologi yang ada di bawah permukaan. Sekuestrasi karbon secara geologi yang dijadikan sebagai tempat penyimpanan adalah struktur yang menyanggah karakteristik akuifer yang memiliki kedalaman tertentu serta mampu diinjeksikan material minyak dan gas. Material ini dimiliki oleh salah satu komponen dalam *basic petroleum system*, yakni reservoir.

Reservoir yang layak untuk diinjeksikan CO₂ adalah reservoir dengan salinitas di kedalaman, reservoir migas bekas yang sudah habis (*depleted reservoir*), bahkan reservoir cadangan untuk penggunaan CBM (*Coal Bed Methane*) dengan kombinasi metode *enhanced oil recovery* akan memberikan dampak pada biaya yang diperlukan untuk sekuestrasi (Vo dkk., 2019; Zhong & Carr, 2019). Pada reservoir bekas hidrokarbon, ruang penyimpanan CO₂ berjumlah ratusan miliar kali lipat jika dibandingkan dengan akuifer pada kedalaman dengan salinitas tertentu dan

ukuran yang sama dengan reservoir hidrokarbon (Metz dkk., 2005). Sekuestrasi CO₂ di bawah permukaan dengan kemampuan penyimpanan yang mencapai ribuan tahun akan sangat berpengaruh terhadap iklim di bumi melalui proses mitigasi dampak CO₂ yang ditangkap.

2.3.1. Fault Seal

Struktur patahan merupakan komponen penting dalam penyimpanan CO₂ dan memiliki pengaruh terhadap integritas dari *caprock* (Nicol dkk., 2017). Struktur patahan dapat berperan sebagai *migration pathway* dan *seal* (penyekat). Hal ini bergantung pada karakteristik kontras permeabilitas struktur di dekat patahan. Karakteristik lain yang menjadi alasan patahan mampu menjadi penyimpanan CO₂ yaitu kemampuan menjaga pelepasan CO₂ dan kekuatan hidroliknya. Patahan cenderung berasosiasi dengan *seal* agar fluida mampu bertahan dan tidak mengalami migrasi melalui celah dan pori batuan.

Terdapat faktor-faktor yang mengendalikan transmisivitas pada *fault zone* seperti; bentuk dan jenis batuan patahan, ukuran dan terhubung atau tidaknya celah patahan, kekuatan secara mekanik, permeabilitas litologi, komposisi fluida, derajat mineralisasi, tekanan, dan besarnya normal dan tegangan geser. Pemahaman mengenai bagian *caprock* dan *fault seal* yang berpotensi menjebak akumulasi CO₂ yang layak dan mampu menyimpan dengan volume besar merupakan aspek penting dalam mengevaluasi kapasitas penyimpanan, baik untuk luas cekungan ataupun kondisi lingkungan tertentu (Kaldi dkk., 2013). Dengan dikumpulkannya data dan analisis dari *fault-flow* pada lokasi penyimpanan CO₂ dapat membantu pengembangan rencana pengelolaan migrasi CO₂ pada reservoir dan *caprock* (Nicol dkk., 2017).

Adanya heterogenitas pada *seal* menyebabkan ketidakpastian terhadap tersimpannya CO₂ tanpa adanya kebocoran akibat migrasi bawah permukaan pada *caprock* (Gao dkk., 2017). Ketidakpastian keseluruhan adalah rata-rata dari kontribusi individu ini. Deskripsi heterogenitas penting untuk memahami aliran dan memperkirakan

penjebakan kapiler serta migrasi CO₂ melalui *pathway* yang berupa *large front* atau melalui celah (Nicot dkk., 2006).

2.4. Geologi Regional Indonesia

Indonesia adalah negara *Ring of Fire* dengan sesar-sesar aktif yang mengelilingi Indonesia diakibatkan oleh aktivitas tektonik (*tectonic escape*) yang terbentuk akibat tumbukan antara lempeng benua India dan lempeng Eurasia yang menyebabkan aktifnya sesar mendatar regional di Asia Tenggara (Fitriana, 2017). Selain itu, berdasarkan kondisi geologisnya, Indonesia merupakan daerah pertemuan tiga lempeng tektonik besar, yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia, dan lempeng Pasifik. Tumbukan lempeng-lempeng itulah yang menyebabkan terbentuknya rangkaian pegunungan.

Kondisi geologis Indonesia tersebut juga menyebabkan sebagian dari rangkaian pegunungan yang terbentuk adalah gunung berapi seperti di sepanjang Pulau Sumatera, Jawa, dan Nusa Tenggara. Terdapat sekitar 400 gunung api aktif maupun tidak aktif di Indonesia. Selain itu, kondisi geologis ini yang menyebabkan Indonesia sering mengalami terjadinya gempa bumi. Proses tektonik inilah yang mengakibatkan terbentuknya cekungan-cekungan dan sesar-sesar di Indonesia (Fitriana, 2017).

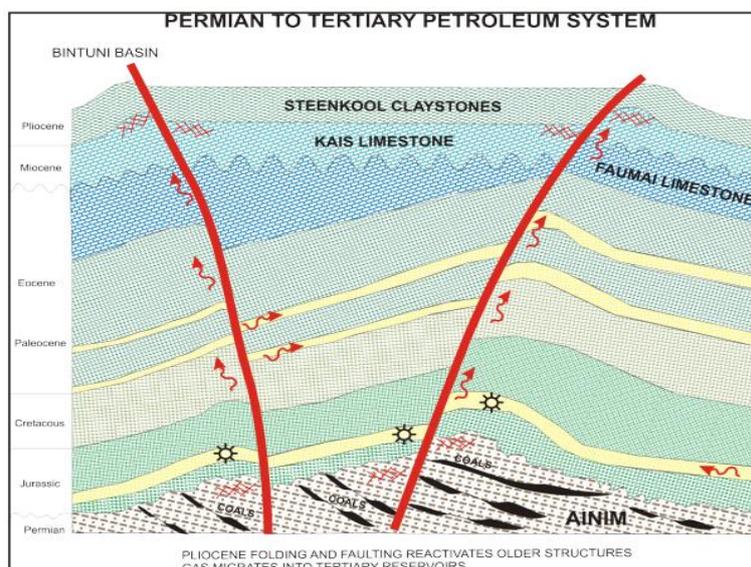
2.5. Petroleum System Cekungan Bintuni

Petroleum system terdiri dari elemen-elemen yang sangat penting untuk melakukan serangkaian proses pada suatu cekungan sebagai tempat terakumulasinya hidrokarbon. Terdapat lima elemen *petroleum system*, yaitu batuan induk, reservoir, migrasi, *seal*, dan *trap*. Pada **Gambar 1**, ditunjukkan ilustrasi *petroleum system* Cekungan Bintuni (Permian-Tersier) dengan batuan induk berupa *shale* atau batuan serpih yang banyak mengandung material organik. Batuan reservoir pada cekungan ini memiliki porositas yang cukup tinggi sebagai tempat hidrokarbon terakumulasi. Pada Cekungan Bintuni batuan reservoir berupa batuan pasir pada Formasi Lower Kembelangan dan batu gamping pada Formasi Kais dan Klasafet.

Hidrokarbon yang terakumulasi mengalami migrasi, yaitu proses berpindahnya hidrokarbon dari batuan induk menuju perangkap (*trap*) (LEMIGAS, 2009). Migrasi yang terjadi pada Cekungan Bintuni adalah migrasi primer dari batuan induk ke *carrier bed*. *Seal* atau penyekat adalah batuan yang sebagai penutup agar hidrokarbon tidak dapat berpindah lagi dan bersifat impermeabel. *Seal* pada cekungan ini berupa *shale* dan batu gamping. *Trap* atau jebakan adalah tempat hidrokarbon terjebak dan terperangkap di dalamnya. *Trap* pada Cekungan Bintuni berupa antiklin NW-SE dan *strike slip fault* yang berarah E-W.

2.6. Analisis SWOT

Analisis SWOT singkatan dari *Strength*, *Weakness*, *Opportunity*, dan *Threat*. Analisis ini digunakan tidak hanya untuk cakupan bisnis dalam menilai suatu organisasi, seseorang, maupun suatu hal dengan membandingkan kondisi internal dengan eksternal dengan membandingkan aspek keunggulan dan entitasnya terhadap persaingan (Teoli dkk., 2020). Dalam menganalisis setiap aspek pada analisis SWOT (*Strength*, *Weakness*, *Opportunity*, dan *Threat*), digunakan matriks yang menganalisis setiap studi kasus.



Gambar 1. Petroleum System Cekungan Bintuni (Permian-Tersier) (LEMIGAS, 2009).

2.7. Analisis PESTLE

PESTLE meliputi analisis industri dengan mempertimbangkan aspek *Political*, *Economic*, *Social*, *Technological*, *Legal*, dan *Environmental*. Analisis ini digunakan untuk memperoleh gambaran secara garis besar (secara makro) untuk lingkungan industri (University of Sydney, 2022). Analisis PESTLE memberikan evaluasi prospek suatu hal secara strategis dan sistematis yang memfokuskan analisis proses internal dengan informasi faktor eksternal.

Dalam mengevaluasi kebijakan serta perkembangan industri mencapai SDGs, analisis PESTLE dapat disajikan dalam skala proyek yang besar sekaligus ataupun

mengevaluasi masing-masing proyek kecil. Setiap evaluasi aspek memiliki kaitan dengan peran kontrol pemerintah, prospek pasar jangka panjang, kultur dan demografi, teknologi dan inovasi industri, kebijakan dan prosedur industri, serta kelestarian lingkungan (University of Sydney, 2022).

3. METODE PENELITIAN

Studi yang dilakukan adalah dengan kajian literatur serta ulasan dari para ahli dan tenaga profesional yang berpengalaman dalam bidang yang berkaitan dengan langkah-langkah dalam mencapai SDGs. Penulis menggunakan beberapa analisis sebagai indikator pembanding untuk

mengidentifikasi pengaruh CCS terhadap SDGs yaitu model sekuestrasi pada lapangan eksplorasi serta tipe penyekat patahan yang ada pada lapangan eksplorasi minyak dan gas di Indonesia yang masih dalam proses penilaian, sedang dalam proses eksplorasi, maupun yang telah dilakukan *abandonment*.

Analisis penyekat patahan menggunakan satu tahapan dari tiga kajian utama menurut Jones & Hillis (2003), yaitu kajian proses deformasi zona patahan. Kajian ini menjadi salah satu langkah untuk menentukan kelayakan area dilaksanakannya CCS. Pendekatan kelayakannya dilakukan dengan studi sekuestrasi karbon yang dikombinasikan dengan analisis SWOT yang didasari oleh pelaksanaan eksplorasi minyak dan gas. Serta dilakukan analisis PESTLE untuk memproyeksikan sensitivitas dari pelaksanaan CCS terhadap SDGs di Indonesia.

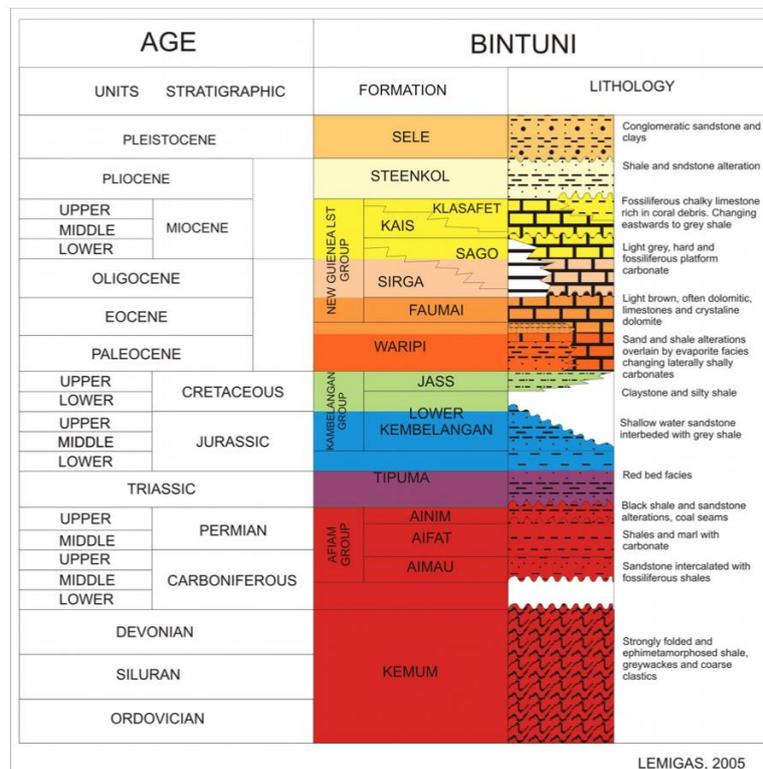
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Studi penelitian dilakukan untuk seluruh wilayah Indonesia dengan wilayah sampel Cekungan Bintuni, Lapangan Ubadari. Secara

umum, Cekungan Bintuni merupakan salah satu sumber dari pelaksanaan eksplorasi gas di Indonesia. Cekungan Bintuni dicatat sebagai lapangan yang paling berpotensi pada urutan ke-11 untuk melaksanakan CCS. Hidrokarbon yang ada pada litologi *claystone* Cekungan Bintuni mampu berperan sebagai jebakan (*trap*) dan penyekat (*seal*) (Ginanjari dkk., 2017; Haris dkk., 2017).

4.1. Analisis Stratigrafi Cekungan Bintuni

Stratigrafi Cekungan Bintuni yang ditampilkan pada **Gambar 2** diawali dengan pengendapan pada Formasi Kemum sebagai batuan dasar (*basement*) yang berumur *Ordovician* hingga *Devonian*. Batuan dasar pada Formasi Kemum tersusun dari *shale* (batu lempung), *graywackes*, dan klastik kasar. Selanjutnya terdapat kelompok Afiam yang terdiri dari Formasi Aimau, Aifat, dan Ainim. Kelompok Afiam terjadi pada umur Carboniferous hingga Permian. Litologi penyusun formasi ini adalah *shale* dan *marl* dengan karbonat, *sandstone* dan *coal*.



Gambar 2. Stratigrafi Cekungan Bintuni (LEMIGAS, 2009).

Selanjutnya pada umur *Triassic*, terbentuk Formasi Tipuma. Litologi penyusun dari Formasi Tipuma adalah batulempung dengan karbonat yang terendapkan pada lingkungan *fluvial deltaic*. Pada umur *Jurassic* hingga *Cretaceous* terdapat kelompok Kambelangan yang terdiri dari Formasi Kambelangan Bawah dan Jass. Kelompok Kambelangan tersusun dari batu karbonat, *coal*, *sandstone*, dan *shale*. Selanjutnya pada umur *Paleocene*, terbentuk Formasi Waripi. Pada formasi ini litologinya terdiri dari *sandstone* dan *shale*.

Pada umur *Eocene-miocene* tengah terdapat kelompok Batugamping New Guinea. Formasi pada kelompok tersebut terdiri dari Formasi Faumai, Sirga, Sago, Kais, dan Klasafet. Kelompok ini sebagai *source rock* dan reservoir pada Cekungan Bintuni. Formasi Klasafet bertindak sebagai *seal*. Kemudian pada Pliosen Awal-Pleistosen, terjadi tektonik yang membentuk Cekungan Bintuni dan *Lengguru Fold-Thrust-Belt* (LFTB) dan diendapkan Formasi Steenkool yang tersusun oleh batulanau, batupasir serpihan, dan batulempung dengan lingkungan pengendapan neritik. Formasi ini diketahui berperan sebagai penutup (*seal*) pada Cekungan Bintuni (Patra Nusa Data, 2006).

4.2. Analisis Sekuestrasi Karbon

Kandungan CO₂ pada formasi geologi diukur kapasitasnya menggunakan *safe storage and risk assessment*. Terdapat 4 model migrasi yang mempengaruhi penilaian risiko kebocoran CO₂ yang bermigrasi berdasarkan Badan Litbang ESDM, yaitu:

- CO₂ bermigrasi melalui ruang pori pada penyekat
- CO₂ bermigrasi di sepanjang sesar/patahan
- CO₂ bermigrasi di sepanjang sumur yang telah ada
- CO₂ bermigrasi melalui reservoir

Berdasarkan **Gambar 3**, ditunjukkan penampang dari 4 tipe migrasi pada *basic petroleum system* yang memengaruhi penilaian kapasitas penyimpanan CO₂. Analisis sekuestrasi karbon pada Cekungan Bintuni dilakukan dengan mengaitkan

formasi geologi yang tepat. Jika ditinjau dari densitasnya, densitas ± 2.2 g/cc diasosiasikan dengan adanya tanah, lempung, dan atau pasir yang dominan terletak pada Formasi Steenkool, Formasi Klasafet dan Endapan Aluvial (Handyarso & Padmawidjaja, 2017). Dari material tersebut, terbentuk lingkungan pengendapan sedimen yang bervariasi mampu menghasilkan formasi yang berperan sebagai *seal*. *Seal* berada pada Formasi Steenkool dan Formasi Klasafet. Pada Formasi Steenkool, lingkungan pengendapan berupa lingkungan neritik. Sedangkan, pada Formasi Klasafet berupa lingkungan *lagoon*.

Sekuestrasi pada formasi dengan karakteristik litologi yang memiliki permeabilitas rendah tersebut akan berpotensi tinggi terhadap keberlangsungan penilaian potensi bocornya CO₂. Pada Cekungan Bintuni, potensi bocornya CO₂ terjadi akibat migrasinya melalui ruang pori pada penyekat akibat belum adanya pembuktian terkait ketebalan struktur penyekat yang dikorelasikan dengan aktivitas geologi yang tidak stabil. Ketidakstabilan aktivitas geologi di daerah Papua Barat yakni akibat aktifnya sesar, salah satunya Lengguru *Fold-Thrust-Belt* dengan aktivitas tektonik sedimen yang menjadi histori geologi terbentuknya cekungan dengan potensi menghasilkan gas yang dapat digunakan sebagai penyimpanan CO₂ (Handyarso & Padmawidjaja, 2017; Patra Nusa Data, 2006).

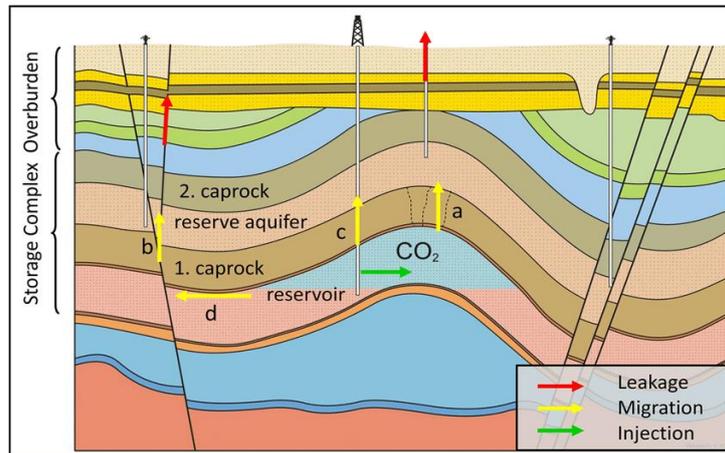
4.3. Analisis Fault Seal

Deformasi struktur geologi di Indonesia memiliki intensitas yang bervariasi bergantung pada distribusi batuan, evolusi mikro pada struktur, material sedimen, lingkungan pengendapan, konfigurasi tektonik, pengaruh struktur yang saling berdekatan, serta histori geologi (Colletini & Viti, 2009; Gluyas & Swarbrick, 2006).

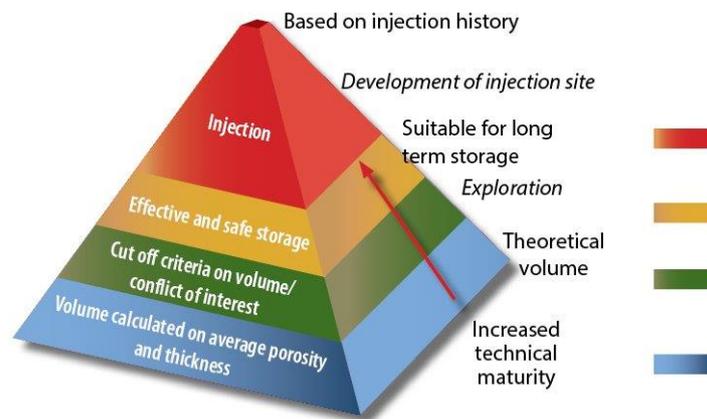
Model migrasi menyebabkan kapasitas pada *fault seal* di Indonesia bervariasi, sehingga kapasitas penyimpanan CO₂ pada ruang yang terdapat di *fault seal* dapat diestimasi dengan pendekatan yang berbeda. **Gambar 4** menunjukkan alur

penghitungan untuk mengestimasi kapasitas penyimpanan CO₂ sesuai produktivitas dari cekungan pada lapangan yang akan menerapkan CCS. Perhitungan kapasitas dan produktivitas untuk CCS di Indonesia masih menggunakan pendekatan dan belum

mencapai hasil maksimum. Evaluasi dan teknologi dari penelitian kapasitas *fault seal* di Indonesia perlu terus dikembangkan dan dikaji sedemikian sehingga prospek untuk CCS di Indonesia lebih maju.



Gambar 3. Potensi migrasi CO₂ melalui 4 tipe. a) CO₂ bermigrasi melalui ruang pori pada penyekat; b) CO₂ bermigrasi di sepanjang sesar/patahan; c) CO₂ bermigrasi di sepanjang sumur yang telah ada; d) CO₂ bermigrasi melalui reservoir (Rütters dkk., 2013).



Gambar 4. Diagram piramida yang merepresentasikan kapasitas CO₂ (Norwegian Petroleum Directorate, 1996).

4.4. Analisis SWOT

Analisis SWOT digunakan untuk menilai kelayakan *Carbon Capture Storage* untuk diimplementasikan pada lapangan eksplorasi migas di Indonesia. Pelaksanaan CCS memiliki kekuatan bagi Indonesia dalam hal pencapaian penurunan emisi karbon hingga mencapai 68%. Pembangkit di Jawa

Barat yang telah dicanangkan sejak 2012 memiliki target 90% untuk menyimpan CO₂. Uji instalasi telah dilakukan dan dinyatakan bahwa pembangkit listrik tersebut mampu menampung emisi untuk 20 tahun hingga 25 tahun ke depan.

Hal ini dapat dijadikan kekuatan bagi CCS seiring pengoptimalan pelaksanaan

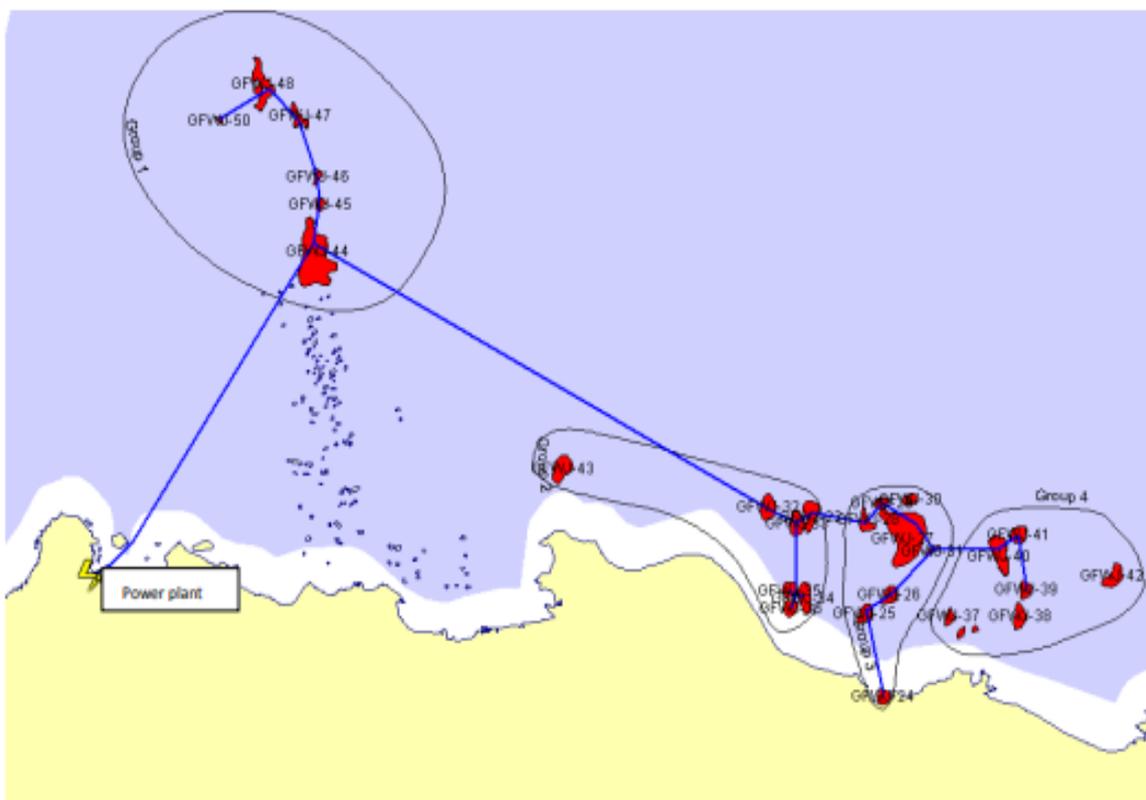
eksplorasi minyak dan gas pada lapangan migas yang berada di Pulau Jawa. Pelaksanaan eksplorasi migas pada lapangan yang telah ditutup dijadikan kekuatan untuk pelaksanaan CCS, baik *offshore* maupun *onshore*. Pemodelan pemasangan pipa dari pembangkit listrik di Jawa Barat ke lapangan *offshore* di Jawa Barat memerlukan pipa yang lebih pendek daripada pelaksanaannya secara *onshore*.

Alur pemasangan pipa CO₂ secara umum ditunjukkan pada **Gambar 5**. Selain itu, kekuatan dari pelaksanaan CCS juga dapat ditinjau dengan telah diestimasiannya jumlah banyaknya lapangan gas yang telah ditutup pada daerah eksplorasi migas di Jawa Barat-Utara dan Sumatera Selatan. Jumlah estimasi lapangan gas yang dapat dijadikan penyimpanan CO₂ ditunjukkan pada **Tabel 1**. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa kapasitas penyimpanan CO₂ yang memadai ialah pada lapangan gas *offshore* dengan kapasitas 224 juta ton CO₂. Pemasangan pipa ke arah lapangan tersebut

dapat diaplikasikan untuk kegiatan eksplorasi di Natuna karena hasil dari eksploitasi migas di Natuna memberikan kontribusi emisi CO₂ hingga mencapai 71% dari keseluruhan produksi *natural gas*.

Namun, pemasangan pipa tersebut belum diestimasi pada lapangan eksplorasi migas lainnya yang masih menjadi area *frontier* dalam hal pelaksanaan CCS. Misalnya, pada Lapangan Ubadari. Lapangan tersebut belum memiliki data yang lengkap dikarenakan identifikasi kapasitas CO₂ melalui analisis *fault seal* di Cekungan Bintuni masih berada dalam kapasitas teoritis.

Sehingga, persamaan matematis untuk menghitung kapasitas penyimpanan CO₂ dari pelaksanaan LNG Tangguh belum dapat dilaksanakan secara optimal dalam waktu yang relatif dekat. Ditambah lagi dengan angka banyaknya permintaan EOR di Sumatera Selatan bertolak belakang dengan jumlah CO₂ yang ditangkap dalam jangka waktu tertentu (World Bank, 2015).



Gambar 5. Transportasi CO₂ ke lapangan gas *offshore* di Jawa Barat (World Bank, 2015).

Tabel 1. Kapasitas CO₂ pada area lapangan eksplorasi Gas di Jawa Barat dan Sumatera Selatan. (dimodifikasi dari *The Indonesia Carbon Capture Storage (CCS) Capacity Building Program's Report* oleh World Bank, 2015).

Lokasi	Jumlah Lapangan Gas	Kapasitas Penyimpanan CO ₂ (juta ton)	Penyimpanan yang Dibutuhkan (juta ton)
Sumatera Selatan	45	537	74
Jawa Barat (<i>onshore</i>)	22	171	218
Jawa Barat (<i>offshore</i>)	29	224	218

Berbagai kelemahan dari rencana pelaksanaan CCS dapat diatasi dengan adanya potensi pelaksanaan CCS pada lapangan migas yang sudah dilakukan eksploitasi. Lapangan migas yang telah dieksploitasi hingga capaian maksimumnya dijadikan sebagai peluang baru dalam menghasilkan nilai ekonomis untuk area lapangan tersebut. Estimasi banyaknya kapasitas penyimpanan pada lapangan gas yang telah ditutup dapat diproyeksikan dari banyaknya hasil produksi gas. Banyaknya hasil produksi yang diproyeksikan dalam pemodelan reservoir akan meningkatkan tingkat akurasi adanya indikasi formasi *seal* yang tepat dari adanya gas yang tereksplorasi. Hal ini disebabkan karena pada lokasi cekungan tertentu, beberapa formasi *seal* juga berfungsi sebagai batuan induk untuk produksi minyak dan gas (Griffith dkk., 2011). Dengan demikian, formasi geologi yang tergolong sebagai *seal* digolongkan sebagai tolok ukur yang mendasar untuk lokasi pelaksanaan *Carbon Capture Storage* (World Bank, 2015).

Dalam rangka pelaksanaan CCS pada tahun 2025, besarnya penawaran dan permintaan untuk penyimpanan CO₂ cenderung mengalami peningkatan. Dengan menggunakan asumsi jika Indonesia akan melaksanakan CCS pada tahun 2025 pada area Jawa Barat, maka target pencapaian penangkapan emisi CO₂ sebanyak 90% dapat tercapai dengan jika seluruh unit pada *onshore* dan *offshore* digunakan hingga 2045.

Namun, terdapat ancaman bahwa pelaksanaan CCS menjadi satu hal yang sangat kontroversial bagi masyarakat

Indonesia. Sebab, pelaksanaan CCS akan memberikan pengaruh yang tidak langsung bagi seluruh masyarakat dalam jangka waktu yang cepat. Selain itu, rencana pelaksanaan CCS juga dinilai sebagai satu peluang bagi pelaksanaan pembakaran batubara untuk terus berlangsung tanpa mengkhawatirkan dampak emisi karbon yang besar karena telah adanya solusi berupa CCS. Pengaruh dari ancaman ini menjadi suatu hak yang perlu dikaji lebih lanjut terhadap berbagai sektor kehidupan bagi masyarakat Indonesia.

4.5. Analisis PESTLE

Analisis PESTLE digunakan untuk menilai pelaksanaan CCS di Indonesia dengan kaitannya terhadap pencapaian SDGs. **Tabel 2** menunjukkan analisis pelaksanaan CCS melalui metode PESTLE terhadap SDGs target nomor 3, 7, dan 13 di berbagai sektor, diantaranya yaitu *Political, Economical, Sociological, Technological, Legal, dan Environmental*.

Dari sudut pandang politik, keterlibatan parlemen pemerintah dalam berkomitmen untuk mengurangi emisi karbon telah ditunjukkan melalui partisipasi pembentukan dan pengesahan kebijakan yang berlaku di Indonesia. Namun, penilaian terhadap pelaksanaan eksplorasi dan eksploitasi migas belum seluruhnya terlaksana di bagian timur Indonesia yang memiliki potensi untuk dilakukan eksploitasi. Untuk memberikan keterbukaan kebijakan politik kepada seluruh masyarakat, terjadi konflik pada UU Minerba yang seringkali diinterupsi oleh masyarakat yang peduli akan lingkungan.

Tabel 2. Analisis Carbon Capture Storage terhadap Sustainable Development Goals dari analisis PESTLE (*Political; Economical; Sociological; Technological; Legal; Environmental*).

Target SDGs	P	E	S	T	L	E
Target 3	Keterlibatan parlemen pemerintah untuk berkomitmen mengurangi emisi karbon.	Pemerataan bantuan ekonomi bagi keluarga yang membutuhkan.	Pemerataan pola hidup dalam konteks sosial untuk menghindari adanya kesenjangan.	Tidak adanya teknologi CCS yang bersifat 100% ramah lingkungan.	Konstitusi mengenai CCS belum sepenuhnya komprehensif terhadap isu kesehatan.	CCS pada <i>onshore</i> dan <i>offshore</i> memerlukan asesmen yang komprehensif
Target 7	Partisipasi pemerintah dan pelaksanaan eksploitasi energi dan distribusi ke seluruh wilayah di Indonesia.	Sumber energi listrik yang terjangkau secara ekonomi ke daerah pelosok.	Sosialisasi pentingnya optimalisasi penggunaan energi bersih oleh pemerintah ke masyarakat.	Pelaksanaan CCS tidak berpengaruh secara langsung dalam pencapaian akses energi bersih.	Ketersediaan energi untuk kebutuhan nasional telah diatur dalam Kebijakan Energi Nasional.	Pengelolaan akses energi perlu dibarengi seiring dengan persiapan CCS.
Target 13	Keterbukaan pemerintah terhadap adanya masukan dari rakyat tentang kebijakan (e.g.: UU Minerba).	Pelaksanaan CCS pada lapangan yang berada di daerah rural.	Komitmen seluruh masyarakat sebagai makhluk sosial dalam aksi peduli lingkungan.	Instalasi peralatan eksplorasi dan eksploitasi migas masih memberikan emisi karbon yang dominan.	Terdapat beberapa isu eksplorasi migas tidak sesuai Kebijakan Energi Nasional.	Segala konstitusi di Indonesia terkait industri dan dampaknya terhadap lingkungan belum optimal.

Dari sudut pandang ekonomi, pelaksanaan CCS dikesampingkan akibat belum meratanya bantuan ekonomi dalam hal akses energi. Selain itu, teknologi CCS memerlukan biaya yang tergolong tinggi karena belum dapat digunakan pada skala yang relatif besar yang dipengaruhi oleh kuantitas kebutuhan teknologi terbaru (Setiawan & Cuppen, 2013). Sehingga, pelaksanaan CCS dianggap kurang relevan untuk dilaksanakan pada daerah yang masih krisis ekonomi karena instalasi komponen CCS memerlukan energi listrik, Akses sumber energi listrik pun masih sulit dijangkau pada area rural di Indonesia, khususnya kawasan Indonesia Timur.

Keterbatasan data pembangunan proyek CCS pada reservoir di Indonesia Timur juga menjadi salah satu hal yang harus diselesaikan agar analisis biaya CCS dari sektor industri dapat diestimasi.

Pola kehidupan sosial pada sebagian masyarakat Indonesia memberikan peran dalam menambah emisi karbon. Pelaksanaan CCS perlu diimbangi dengan optimalisasi oleh pemerintah terhadap penggunaan energi bersih yang terhadap masyarakat secara andal dan berkelanjutan. Hal ini berakibat pada aksi peduli lingkungan yang semakin digerakkan oleh sebagian masyarakat sebagai bentuk ekspresi

terhadap kondisi kesehatan lingkungan yang semakin memburuk.

Penangkapan karbon, atau penangkapan dan penyimpanan karbon dioksida (CCS), mengacu pada serangkaian teknologi yang mengurangi emisi CO₂ dengan "menangkap" CO₂ sebelum dilepaskan ke atmosfer dan kemudian mengangkutnya ke tempat yang akan disimpan atau digunakan (Herzog, 2018). Teknologi memegang peranan yang penting dalam mendukung proses pelaksanaan CCS dengan integrasi dari berbagai data dan konsep pengetahuan. Teknologi yang digunakan tidak seluruhnya menggunakan energi bersih. Di Indonesia, identifikasi untuk mencegah adanya kebocoran dari berbagai tipe migrasi karbon pada formasi litologi yang ada di lapangan belum sepenuhnya dilakukan. Selanjutnya, perlu dilakukan analisis oleh para ahli geologi untuk memahami struktur geologi yang menjadi potensi pelaksanaan *Carbon Storage* serta analisis kaitannya terhadap ekonomi dan legalitas.

Unsur legalitas dari rencana pelaksanaan CCS di dunia telah disetujui sejak tahun 2010. SDGs digunakan sebagai tolok ukur dari dibuatnya regulasi nasional maupun internasional dalam penilaian kelayakan CCS serta berbagai faktor yang dipengaruhinya. Hingga saat ini, Indonesia telah mengatur Kebijakan Energi Nasional yang memerlukan kontribusi dari pemerintah, pegiat industri, pakar di bidang yang terkait dengan CCS serta masyarakat untuk mengevaluasi ketercapaian Kebijakan Energi Nasional yang berfokus pada lingkungan dan iklim.

Aspek lingkungan menjadi aspek utama dalam keberhasilan CCS. Adanya potensi lapangan bekas eksplorasi gas di Indonesia yang dapat dilakukan CCS menjadi target dari sebagian besar isu nasional terkait emisi karbon. Besarnya nilai volume CO₂ yang diinjeksikan pada proyek *Carbon Storage* menjadi salah satu hal menjadi permasalahan kuantitatif dan dapat menyebabkan dampak kualitatif maupun kuantitatif terhadap lingkungan. Adanya pemasangan pipa pada formasi geologi melalui jalur *onshore* yang memerlukan analisis sekuestrasi karbon harus

memastikan potensi dan risiko secara kuantitatif dan kualitatif.

Sedangkan, analisis penyekat patahan menjadi salah satu aspek yang penting untuk dianalisis dalam mengurangi ketidakpastian terjadinya kebocoran penyimpanan CO₂ dari hasil migrasinya di bawah permukaan. Meskipun ketidakpastian menjadi hal yang pada studi bawah permukaan, analisis kuantitatif dalam bentuk analisis petrofisika dan pendekatan statistik menjadi hal yang penting untuk mengurangi ketidakpastian akibat heterogenitas struktur bawah permukaan.

5. KESIMPULAN

Dari analisis yang dilakukan, didapatkan hasil bahwa:

- a. *Fault seal* di Lapangan Ubadari memiliki kapasitas yang potensial untuk dijadikan prospek *Carbon Capture Storage*. Ketidakpastian potensinya dikarenakan oleh *fault seal* pada formasi litologi yang memiliki pori dapat menyebabkan bermigrasinya CO₂. Ketidakpastian tersebut dapat diidentifikasi secara kuantitatif maupun kualitatif.
- b. Penelitian untuk karakteristik *fault seal* di Indonesia belum banyak dilakukan, sehingga pemodelan kapasitas masih belum pasti (*matched capacity*), melainkan hanya menggunakan pendekatan/estimasi (*theoretical capacity*). Integritas dari *caprock* pada patahan dapat berperan untuk penyimpanan CO₂ dengan pendekatan kuantitatif terkait *migration pathway* dan *seal* (penyekat).
- c. Identifikasi kualitatif mengenai litologi mempengaruhi potensi penyimpanan CO₂. Identifikasi dilakukan dengan mengintegrasikan analisis sekuestrasi karbon yang tepat sesuai formasi susunan litologi pada *basic petroleum system* yang telah teridentifikasi.
- d. Peran dari *Carbon Capture Storage* dalam mencapai *Sustainable Development Goals* sangat berpengaruh untuk meningkatkan kesejahteraan manusia di berbagai bidang seperti politik, ekonomi, sosial, teknologi, hukum, dan lingkungan. Ketercapaian utama yaitu berdampak

pada keberhasilan target SDGs nomor 3, 7, dan 13.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala limpahan Rahmatnya sehingga kami dapat menyelesaikan penyusunan karya ilmiah dengan baik. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada Bapak Prof. Dr. Ardian Nengkoda yang sudah membimbing kami. Semoga karya ilmiah ini dapat dipergunakan sebagai salah satu acuan, petunjuk maupun pedoman bagi pembaca dalam memahami Analisis Carbon Capture Storage Dari Eksplorasi Migas Dalam Mencapai *Sustainable Development Goals*. Harapan kami semoga karya ilmiah ini dapat membantu menambah pengetahuan ilmiah dan pengalaman bagi para pembaca.

DAFTAR PUSTAKA

- Bachu, S. (2015). Review of CO₂ Storage Efficiency in Deep Saline Aquifers. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, 188–202. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.01.007>
- Collettini, C., & Viti, C. (2009). Growth and Deformation Mechanisms of Talc Along a Natural Fault: A Micro/Nanostructural Investigation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(4), 529–542. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00410-009-0395-4>
- CCUS Cost Challenge Taskforce. (2018). *Delivering Clean Growth: CCUS Cost Challenge Taskforce Report. Technical Report. Richmond: Government of the United Kingdom*. <https://www.gov.uk/government/groups/ccus-cost-challenge-taskforce>
- De Silva, G., Ranjith, P., & Perera, M. (2015). Geochemical Aspects of CO₂ Sequestration in Deep Saline Aquifers: A Review. *Fuel*, 155, 128–143. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.045>
- Directorate, N. P. (1996). *Geology and Petroleum Resources in The Barent Sea: NPD, Stavanger*.
- Fitriana, E. (2017). *Geologi Indonesia*. Universitas PGRI Palangkaraya.
- Gao, S., Wei, N., Li, X. C., Lei, H. W., & Liu, M. Z. (2017). Effect of Layered Heterogeneity on CO₂ Migration and Leakage Mechanism in The Cap Rock. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, 38(11), 3287–3294.
- Ginanjari, W. C. B., Haris, A., & Riyanto, A. (2017). *Fault Seal Analysis to Predict The Compartmentalization of Gas Reservoir: Case Study of Steenkool Formation Bintuni Basin*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/1.4991276>
- Gluyas, J., & Swarbrick, R. (2006). *Petroleum Geoscience*. Blackwell Science Ltd.
- Gonzales, V., Krupnick, A., & Dunlap, L. (2020). *Carbon Capture and Storage 101*. Resources for The Future.
- Griffith, C. A., Dzombak, D. A., & Lowry, G. V. (2011). Physical and Chemical Characteristics of Potential Seal Strata in Regions Considered for Demonstrating Geological Saline CO₂ Sequestration. *Environmental Earth Sciences*, 64(4), 925–948.
- Handyarso, & Padmawidjaja. (2017). Subsurface Geological Structures of the Bintuni Basin Based on Gravity Data Analysis. *Journal of Geology and Mineral Resources*.
- Haris, A., Pradana, G. S., & Riyanto, A. (2017). *Delineating Gas Bearing Reservoir by Using Spectral Decomposition Attribute: Case Study of Steenkool Formation, Bintuni Basin*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/1.4991267>
- Herzog, H. J. (2018). *Carbon Capture*. The MIT Press.
- IEA. (2020). *Energy Technology Perspectives 2020 – Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage: CCUS in Clean Energy Transitions*. OECD Publishing.
- Jones, R. M., & Hillis, R. R. (2003). An Integrated, Quantitative Approach To Assessing Fault-Seal Risk. *American Association Petroleum Geology Bulletin*, 87, 507–524.
- Kaldi, J., Daniel, R., Tenthorey, E., Michae, K., Schacht, U., Nicol, A., Underschultz, J., & Backe, G. (2013). Containment of CO₂ in CCS: Role of Caprocks and Faults. *Energy Procedia*, 5403–5410.
- LEMIGAS. (2009). *Paleogeografi dan Potensi HC Cekungan Pratersier Daerah Kepala Burung*. Program Penelitian dan Pengembangan Teknologi Eksplorasi Migas LEMIGAS.
- Metz, B., Davidson, O., Coninck, H. D., Loos, M., & Meyer, L. (2005). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Misra, S. (2021). *Machine Learning Tools for Fossil and Geothermal Energy Production and Carbon Geo-sequestration—a Step Towards*

- Energy Digitization and Geoscientific Digitalization*. Circ.Econ.Sust. <https://remote-lib.ui.ac.id:2075/10.1007/s43615-021-00105-1>
- Nicol, A., Seebeck, H., Field, B., McNamara, D., Childs, C., Craig, J., & Rolland, A. (2017). Fault Permeability and CO₂ Storage. *Energy Procedia*, 114 (November 2016), 3229–3236.
- Nicot. (2006). *Development of Science-Based Permitting Guidance for Geological Sequestration of CO₂ in Deep Saline Aquifers Based on Modelling and Risk Assessment*. Pacific Northwest National Laboratories.
- Page, B. (2019). *Global Status of CCS 2019. Technical Report*. <https://globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>
- Patra Nusa Data, P. (2006). *Indonesian Basin Summaries (IBS)*. Inameta Series, Indonesia Metadata Base.
- Rütters, Moller, I., May, F., Flornes, K. M., Hladik, V., Arvanitis, A., Gulec, Bakiler, Dudu, A., Kucharic, L., Juhojuntti, Shogenova, Georgiev, Stead, K. A., & Jensen, F. B. (2013). *State of The Art of Monitoring Methods to Evaluate Storage Site Performance*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5108.5288>
- Setiawan, A., & Cuppen, E. (2013). Stakeholder Perspectives on Carbon Capture and Storage in Indonesia. *Energy Policy* 61, 1188–1199. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.057>
- Sydney, U. of. (2022). *PESTLE Analysis*. <https://libguides.library.usyd.edu.au/market-ing>
- Teoli, D., Sanvictores, T., & An, J. (2020). *SWOT Analysis*. StatPearls.
- UNFCCC. (2015). *Paris Agreement*. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- Vo, T. H., Sugai, Y., Nguele, R., & Sasaki, K. (2019). *Integrated Workflow in 3D Geological Model Construction for Evaluation of CO₂ Storage Capacity of a Fractured Basement Reservoir in Cuu Long Basin, Vietnam*. *Int J Greenh Gas Control*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102826>
- Vo, T. H., Sugai, Y., Nguele, R., & Sasaki, K. (2020). Robust Optimization of CO₂ Sequestration Through a Water Alternating Gas Process Under Geological Uncertainties in Cuu Long Basin, Vietnam. *J Nat Gas Sci Eng*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jnase.2020.103208>
- World Bank. (2015). *The Indonesia Carbon Capture Storage (CCS) Capacity Building Program: CCS for Coal-fired Power Plants in Indonesia*. International Bank for Reconstruction and Development.
- Zhong, Z., & Carr, R. (2019). Geostatistical 3D Geological Model Construction to Estimate The Capacity of Commercial Scale Injection and Storage of CO₂ in Jacksonburg-Stringtown Oil Field, West Virginia, USA. *Int J Greenh Gas Control West Virginia Int J Greenh Gas Control*, 80, 61–75.