

Literature Review: Enhancing Technological Carbon Capture to Mitigate the Impact of Climate Change

Abstract. The release of carbon dioxide into the atmosphere is a significant factor contributing to the escalation of global temperatures and the exacerbation of climate change. Efforts to mitigate carbon dioxide emissions have been undertaken through the implementation of Carbon Capture technology, which encompasses various approaches such as Carbon Capture and Utilization (CCU), Carbon Capture and Storage/Sequestration (CCS), and Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS). These methods involve the utilization of physical techniques such as absorption, gas separation, and temperature suppression, as well as chemical approaches like adsorption using amine compounds and membranes, and biological processes such as biofixation. The operational framework of Carbon Capture technology encompasses three primary approaches, namely pre-combustion, combustion, and oxy-combustion. One potentially interesting approach in the field of Carbon Capture technology is the utilization of microalgae cultivation as a technique of biofixation. This method exhibits ecologically benign characteristics and holds significant potential for future applications. By employing microalgae, it becomes possible to capture a substantial amount of carbon dioxide while simultaneously requiring minimal nutritional resources. There are several notable advantages associated with the utilization of microalgae. Firstly, it is worth noting that microalgae exhibit better effectiveness in fixing carbon dioxide (CO₂) compared to traditional plants. Additionally, the utilization of microalgae is associated with minimal levels of pollutants. Lastly, it is important to highlight that the notion of employing microalgae is quite straightforward. Undoubtedly, the utilization of technology is poised to escalate in the forthcoming years, given the ongoing climate change phenomena.

Keywords: Carbon Capture and Storage; Climate Change; Low Carbon Society; Microalgae; Renewable Energy

1. INTRODUCTION

Perkembangan zaman semakin meningkatkan risiko perubahan iklim dan timbulnya pencemaran lingkungan. Mobilitas warga di seluruh dunia meningkat pesat yang diikuti oleh modernisasi dan globalisasi. Penggunaan kendaraan menggunakan BBM (Bahan Bakar Minyak) dan menghasilkan polutan gas CO₂ (karbondioksida) yang tinggi dibandingkan

1 aktivitas lainnya. Industrialisasi bertanggung jawab atas sekitar 30% emisi CO₂ global yang
2 mana bisa terjadi melalui reaksi kimia berupa produksi logam seperti besi dan baja, serta bahan
3 kimia. China dan Amerika Serikat adalah dua negara dengan emisi CO₂ terbanyak. Menurut
4 US Energy Information Administration (2016), emisi gas CO₂ diprediksi mengalami
5 peningkatan dari 35,6 miliar metrik ton pada tahun 2020 menjadi 43,2 miliar metrik ton pada
6 tahun 2050 yang makin memperparah kenaikan suhu bumi. Sehingga, risiko dari emisi
7 karbondioksida perlu diminimalisir dampaknya terhadap kenaikan suhu global.

8 Pencemaran udara di kota besar mengancam kualitas udara dan kesehatan warga
9 sekitarnya. Menurut WHO (2021), batas partikulat atmosfer udara yang masuk ke jaringan
10 tubuh yaitu PM 10 (berukuran 10 µg) dan PM 2,5 (berukuran 2,5 µg) adalah kurang dari 45
11 µg/m³ dan 15 µg/m³ per hari beserta 15 µg/m³ dan 5 µg/m³ per tahun. Indonesia sebagai negara
12 kepulauan memiliki tingkat kerentanan yang tinggi terhadap dampak perubahan iklim. Sejak
13 ratifikasi Protokol Kyoto tahun 1997, Indonesia berupaya mengurangi emisi GRK (Gas
14 Rumah Kaca) nasional khususnya di sektor-sektor penyumbang emisi terbesar yaitu
15 kehutanan, energi, transportasi, industri dan limbah. Selain itu, diketahui juga bahwa bahan
16 bakar fosil akan tetap menjadi sumber energi utama setidaknya selama 50 tahun ke depan, dan
17 emisi CO₂ yang berasal dari sumber energi tersebut berkontribusi besar terhadap perubahan
18 iklim global yang mana rata-rata kenaikan suhu global sekitar ± 1°C [3]. Komitmen Indonesia
19 dalam penurunan emisi GRK nasional diperkuat melalui Undang-Undang Nomor 16 Tahun
20 2016, dan dalam dokumen Nationally Determined Contribution (NDC) yang dilaporkan ke
21 UNFCCC. Komitmen tersebut berupa target penurunan emisi karbon sebesar 29% pada tahun
22 2030 berdasarkan skenario *business as usual* atau 41% dengan bantuan internasional.
23 Sehingga diperlukan sejumlah strategi yang berkelanjutan dalam mendukung penurunan emisi
24 karbondioksida selaku penyumbang emisi gas rumah kaca terbesar di lapisan ozon.

25 Teknologi mitigasi yang memiliki potensi digunakan dalam upaya penurunan emisi
26 gas rumah kaca diantaranya adalah teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS,
27 *carbon capture and storage*). Berbeda dengan teknologi mitigasi lain seperti teknologi rendah
28 karbon yang dimulai dari pemilihan bahan baku atau sumber energi untuk menekan jumlah
29 karbon yang dikonsumsi dan yang dikeluarkan, teknologi CCS ini bekerja dengan cara
30 menangkap karbon yang dihasilkan dari suatu proses industri kemudian disimpan dan
31 dimanfaatkan untuk proses produksi lain. Adapun teknologi CCS ini dapat menggunakan
32 metode fisik (absorpsi pressurize water, Rectisol, Selexol, etc), kimia, (chemical absorption,
33 and membranes) dan biologis (pemanfaatan budidaya mikroalga). Lalu, berbagai metode
34 carbon-capture banyak ditemukan, yang salah satunya adalah CCU (*Carbon Capture and*

1 *Utilization*) dan CCUS (Carbon-capture Utilization and Storage) yang banyak diterapkan di
2 wilayah Indonesia bagian tengah dan mulai diluncurkan oleh Kementerian ESDM Republik
3 Indonesia. Selain itu, teknologi *carbon capture* mampu menangkap karbon di udara menjadi
4 sumber tenaga listrik sebagai energi ramah lingkungan.

5 Dalam penangkapan karbon yang ramah lingkungan, para peneliti mulai tertarik untuk
6 mengembangkan budidaya mikroalga sebagai CCS dan CCUS. Teknologi ini secara umum
7 prinsipnya memanfaatkan dan menangkap karbon di udara untuk dijadikan sebagai energi lain
8 dan diproduksi menjadi barang yang bernilai. Saat ini, budidaya mikroalga mulai menjadi
9 perhatian para peneliti karena tingkat pertumbuhannya yang cepat, kemampuan beradaptasi
10 yang kuat terhadap lingkungan yang ekstrim, dan biaya produksi yang rendah. Selain itu,
11 mikroalga juga memiliki peran sebagai pemecah CO₂ yang sangat penting dalam ekologi yang
12 mampu memperbaiki karbon sebagai biomassa melalui fotosintesis [4]. Adapun tujuan dari
13 penulisan *literature review* ini untuk menjelaskan beragam jenis teknologi carbon capture
14 yang ada saat ini dalam mengurangi kenaikan suhu bumi secara global. Sehingga, dalam
15 literature review ini akan dibahas mengenai strategi, skema, cara kerja, serta pengembangan
16 teknologi CCS dalam meminimalisir risiko dari efek GRK (Gas Rumah kaca) secara spesifik.

19 2. MATERIALS AND METHODS

20
21 2.1. *Materials*. Beberapa sumber referensi terkait teknologi Carbon Capture dikumpulkan
22 oleh peneliti yang berasal dari Elsevier, Springer, Wiley, Taylor and Francis, Hindawi, dan
23 lain sebagainya. Lalu dikelompokkan menjadi beberapa sub-materi yang akan dijelaskan dalam
24 literatur review ini yang meliputi: (1) berbagai macam dan pendekatan dari teknologi Carbon
25 Capture, (2) proses/mechanisme teknologi Carbon-Capture, (3) pemanfaatan mikroalga sebagai
26 teknologi Carbon Capture, serta (4) perkembangan terbaru dari pemanfaatan teknologi carbon
27 capture.

28
29 2.2. *Methods*. Melalui pendekatan literature review dengan metode SLR (Systematic
30 Literature Review) dengan cara mencari data atau bahan literatur dari jurnal atau artikel dan
31 buku sehingga dapat dijadikan suatu landasan yang kuat dalam isi atau pembahasan. Lalu
32 dibandingkan serta diringkas dengan satu dan yang lain sehingga memunculkan sintesis atas
33 hasil penelitian yang diharapkan dengan tema yang saling berkaitan.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. *Beragam dan Pendekatan Teknologi Carbon Capture.* Adapun secara umum teknologi CCS dapat dilihat pada gambar sebagai berikut.

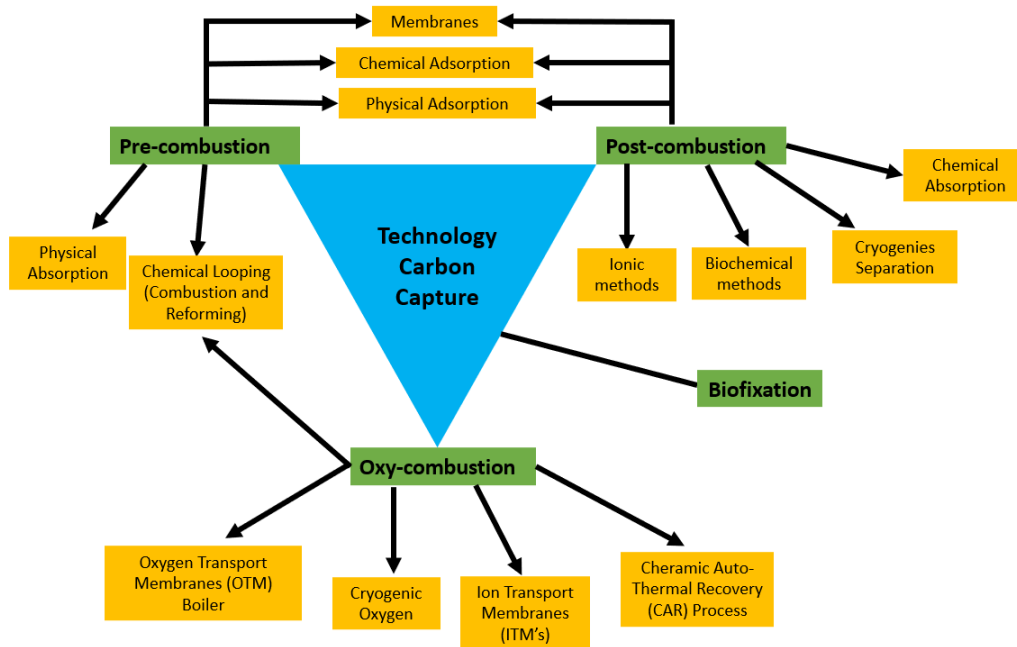


Figure 1. Beragam Teknologi Carbon Capture

Cara kerja dari teknologi Carbon Capture (CC) ini meliputi penangkapan CO₂ dari proses industri, lalu ditransfer dan diangkut melalui pipa atau saluran ke penyimpanan, serta diinjeksi pada formasi batuan jauh di bawah tanah untuk penyimpanan permanen. Tempat penyimpanan CO₂ berupa akuifer garam atau reservoir minyak dan gas yang terletak di bawah tanah dan lapisan batu bara dengan kedalaman minimal 0,62 mil (1 km) serta reservoir salin/garam yang terletak di dasar laut dengan kedalaman minimal 1 mil (1,6 km). Terdapat pula istilah CCS (Carbon Capture Storage) dan CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage) yang mana perbedaannya adalah selain disimpan, karbon tersebut bisa digunakan kembali untuk menunjang proses produksi di industri tertentu, misalnya dalam industri biofuel dan atau minyak, karbon dimanfaatkan untuk peningkatan pemulihan minyak (EOR), metode ekstraksi minyak yang menggunakan CO₂ dan air untuk mendorong minyak ke atas sumur, dan mengasingkan CO₂ di bawah tanah. Penggunaan CO₂ yang berbeda menyebabkan tingkat pengurangan emisi yang berbeda, tergantung pada penggunaan spesifik dan bahan bakar apa atau bahan lain jika ada yang menggantikan CO₂.

Sampai saat ini, menurut laporan Global CCS Institute (2022), terdapat 194 fasilitas teknologi CCS di dunia yang mana 30 diantaranya masih beroperasi, 11 sedang dibangun, serta sisanya masih dalam tahap pengembangan. Dari total jumlah proyek, 94 berada di Amerika (80 di AS), 73 di Eropa (27 di Inggris), 21 di Asia-Pasifik, dan 6 di Timur Tengah dengan kapasitas penangkapan karbon sebesar 244 juta ton per tahun (meningkat 44% dibandingkan tahun sebelumnya). Teknologi CCS berdasarkan sumber yang memancarkan karbon terbagi ke dalam tiga pendekatan utama yaitu pre-combustion (proses industri), oxy-combustion, and post-combustion (biasanya digunakan dalam pembangkit listrik), serta satu pendekatan biologis melalui biofiksasi (menggunakan mikroorganisme dan atau organisme). Pendekatan pre-combustion terjadi dengan melibatkan gasifikasi bahan bakar dan memisahkan CO₂ yang mana untuk memperbaiki cara pendekatan ini sangat mahal. Lalu, pendekatan oxy-combustion terjadi dengan pembakaran bahan bakar di lingkungan oksigen yang hampir murni, bukan di udara biasa, yang menghasilkan aliran emisi CO₂ yang lebih pekat dan mudah untuk ditangkap. Lalu, pendekatan post-combustion terjadi melalui CO₂ dipisahkan dari pembuangan proses pembakaran. Serta biofiksasi melibatkan mikroorganisme dan atau organisme untuk menangkap karbon sebagai sumber energi. Penjelasan secara lebih detail terkait tiga pendekatan akan dijelaskan sebagai berikut.

Pre-combustion

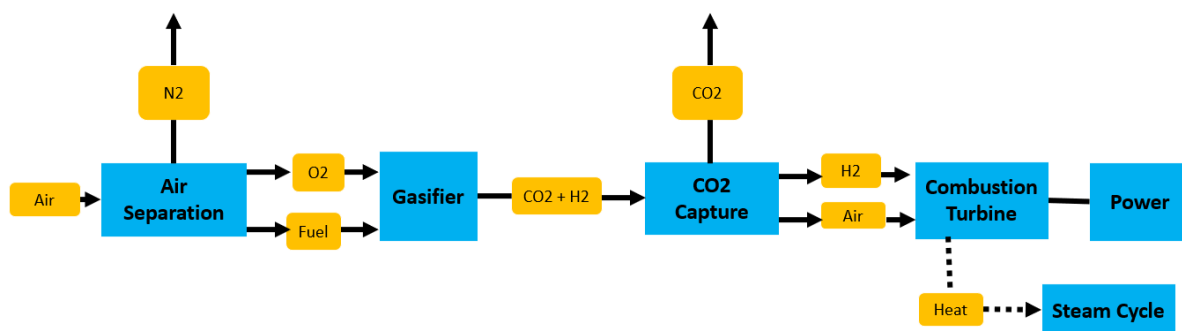
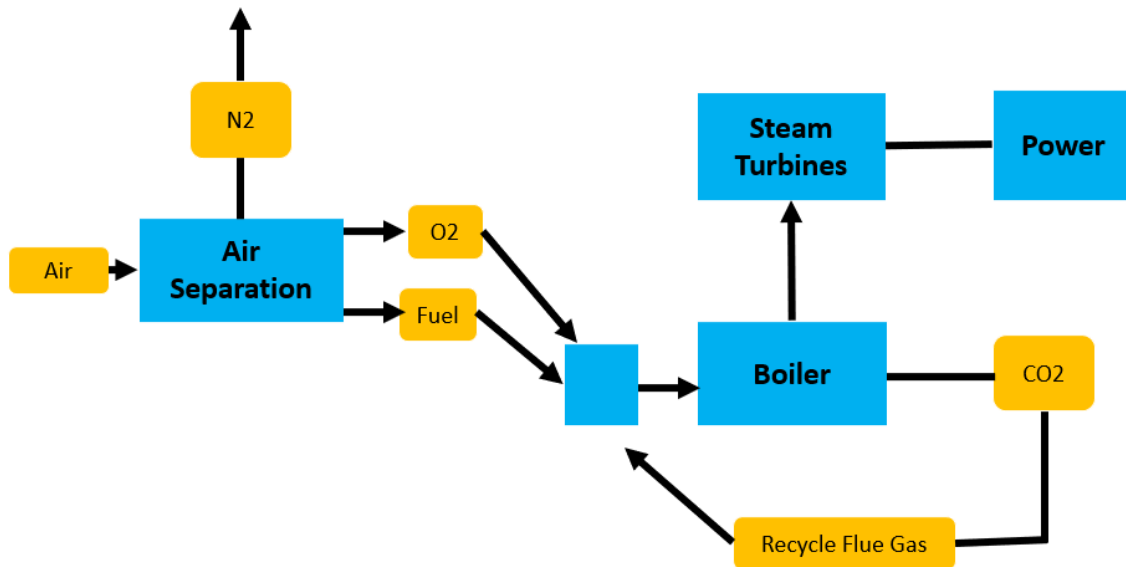


Figure 2. Skema Carbon Capture Pendekatan Pre-Combustion

Dalam metode ini terjadi reaksi antara bahan bakar dan oksigen atau udara dan/atau uap untuk menghasilkan terutama gas sintetik (syngas) atau gas bahan bakar, umumnya CO (karbonmonoksida) dan H₂ (Hidrogen). CO direaksikan dengan uap dalam reaktor katalitik, yang disebut shift converter, untuk menghasilkan CO₂ dan lebih banyak H₂. Lalu, karbon dioksida dihilangkan dalam proses penyerapan fisik atau kimiawi yang menghasilkan aliran bahan bakar kaya H₂. Pendekatan teknologi ini dapat diterapkan pada pembangkit listrik baru,

1 teknologinya belum mencapai tingkat kematangan komersial dan memerlukan investasi modal
2 yang tinggi karena perubahan besar yang harus diterapkan pada sistem boiler dan gas buang
3 [6].

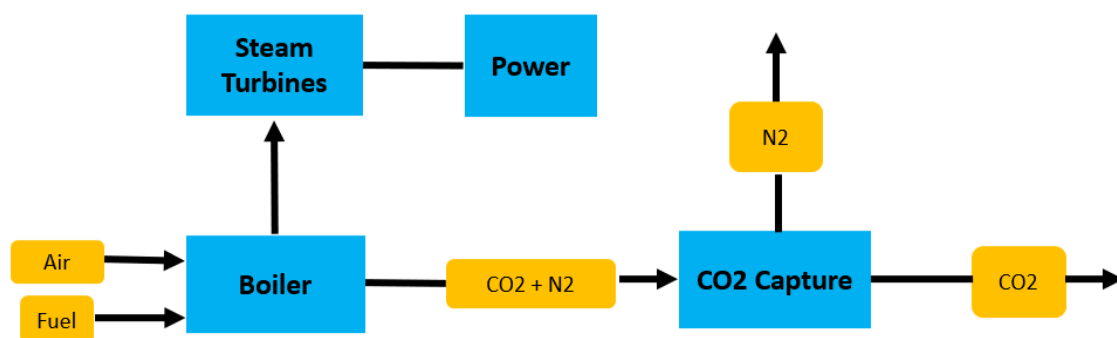
4 Oxy-combustion



5 **Figure 3.** Skema Carbon Capture Pendekatan Oxy-Combustion

6 Dalam metode ini, oksigen dipisahkan dari udara sebelum pembakaran dan bahan bakar
7 dibakar dalam oksigen yang diencerkan dengan gas buang daur ulang daripada udara. Atmosfer
8 yang kaya oksigen dan bebas N₂ (Nitrogen) ini menghasilkan gas buang akhir yang sebagian
9 besar terdiri dari CO₂ dan H₂O, menghasilkan aliran CO₂ yang lebih pekat untuk pemurnian
10 yang lebih mudah.

11 Post-combustion



12 **Figure 4.** Skema Carbon Capture Pendekatan Post-Combustion

Dalam metode ini, oksigen dipisahkan dari udara sebelum pembakaran dan bahan bakar dibakar dalam oksigen yang diencerkan dengan gas buang daur ulang daripada udara. Atmosfer yang kaya oksigen dan bebas N_2 ini menghasilkan gas buang akhir yang sebagian besar terdiri dari CO_2 dan H_2O , menghasilkan aliran CO_2 yang lebih pekat untuk pemurnian yang lebih mudah. Selain itu, CO_2 dipisahkan dari gas buang pembakaran dengan menggunakan penyerapan, adsorpsi, pemisahan membran dan pilihan lain untuk pembangkit listrik tenaga panas berbasis batu bara, gas dan bahan bakar fosil lainnya dengan cara retrofit [6]. Mereka belum didirikan secara komersial kecuali dalam hal opsi penyerapan. CO_2 dalam gas buang berada dalam konsentrasi yang cukup encer (10–15%) sehingga memerlukan biaya pemulihan dan modal yang tinggi serta 25–30% energi tambahan untuk pengoperasian pembangkit listrik.

Biofiksasi

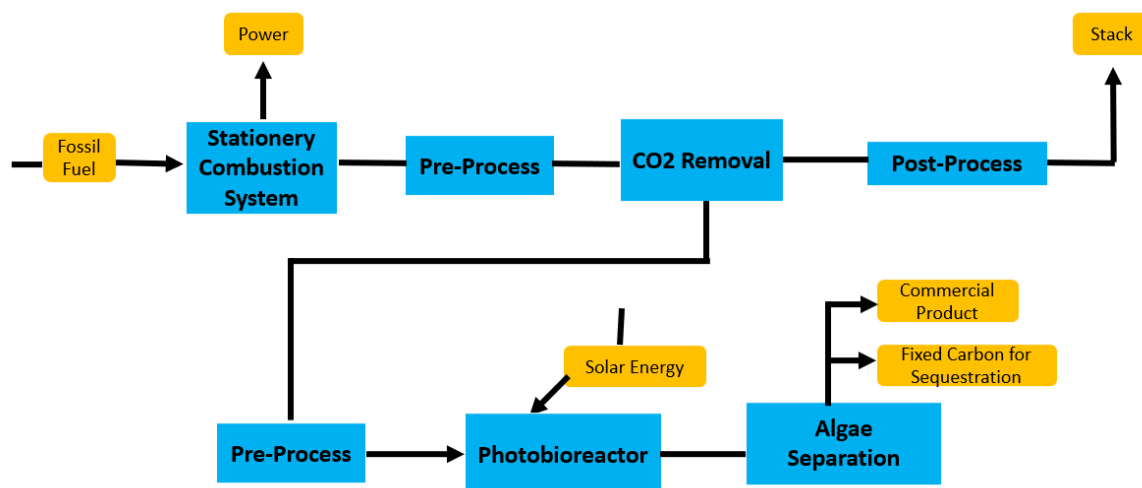


Figure 5. Skema Carbon Capture Pendekatan Biofiksasi

Biofiksasi mikroba terhadap karbon dioksida (CO_2) menggunakan kapasitas mikroorganisme autotrofik, termasuk fotoautotrof dan kemoautotrof, untuk memfiksasi CO_2 untuk pertumbuhan sel guna mengurangi emisi karbondioksida. Secara umum, ada dua pendekatan terhadap sekuestrasi CO_2 mikroba: meningkatkan produktivitas biologis autotrof di habitat alaminya (misalnya pemupukan di laut) dan membudidayakan mikroorganisme autotrofik dalam sistem terkontrol (misalnya budidaya mikroalga) [7]. Selain itu, lipid dari biomassa mikroalga dapat diubah menjadi biodiesel; bahan bakar terbarukan yang memancarkan lebih sedikit CO_2 dibandingkan dengan solar fosil saat dibakar [8].

3.1. Strategi Carbon Capture secara Fisik. Berbagai metode secara fisik secara umum berupa metode adsorpsi fisik (berbahan baku zeolit, Alumina, dan sejenis bahan karbon),

teknologi kriogenik (pendinginan dan kondensasi komponen multigas pada suhu kondensasi yang berbeda), dan absorpsi fisik (berbahan baku Selexol, Rectisol, dan Purisol) [9], [10]. Metode lain adalah pemisahan berbasis hidrat, di mana hidrat yang terbentuk dengan injeksi tekanan tinggi dari aliran gas mendorong gas CO₂ masuk ke dalam air. Setelah itu, hidrat dipisahkan dengan melepaskan CO₂. Pemilihan metode penangkapan CO₂ yang tepat sangat bergantung pada jenis pembangkit penghasil CO₂ dan bahan bakar yang digunakan [11]. Sebagian besar dari strategi CC secara fisik lebih banyak diterapkan pada pendekatan oxy-combustion.

3.3. Strategi Carbon Capture secara Kimia. Berbagai macam metode pemisahan dapat diterapkan yang mana kebanyakan menggunakan pendekatan pre-combustion dan post-combustion termasuk pemisahan fasa gas, absorpsi dalam pelarut (amina, kalium karbonat, amonia, natrium hidroksida, dll.), adsorpsi pada sorben (saringan molekul, keranjang molekul, dan adsorpsi karbon aktif, adsorpsi pada komponen litium, dll.), dan membran serta proses hibrid seperti kombinasi penyerapan kimia dan membran. Pembakaran looping kimia (CLC) dan pemisahan berbasis hidrat adalah dua metode utama. CLC juga dikenal sebagai pembakaran tidak tercampur karena dalam metode ini terjadi kontak tidak langsung antara bahan bakar dan udara. Pembawa oksigen (oksida logam seperti Fe₂O₃ (bijih besi), NiO (Nikel Oksida), CuO (Tembaga Oksida), dan Mn₂O₃ (Mangan Trioksida) menyediakan oksigen untuk pembakaran. Proses ini memiliki satu reaktor untuk udara dan satu lagi untuk bahan bakar, dan pembawa oksigen bersirkulasi di antara dua reaktor.

Pemisahan membran biasanya dioperasikan di bawah kondisi yang kontinyu, dan perbedaan tekanan melintasi membran mendorong proses perembesan [12]. Bahan membran selain konfigurasi, morfologi, komposisi, dan kondisi operasinya adalah faktor kunci yang mendikte kinerja pemisahan gas untuk sebagian besar. Opsi CLC dengan oksida logam yang dapat digunakan kembali yang berasal dari bijih yang tidak dimanfaatkan, limbah industri atau agro merupakan pilihan yang jauh lebih berkelanjutan dibandingkan pembakaran oxy-fuel [6].

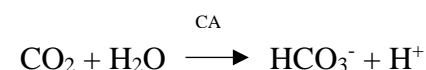
3.4. Strategi Carbon Capture secara Biologi. Teknologi Carbon Capture secara biologis memanfaatkan aktivitas fotosintesis dari autotrof. Salah satunya melalui proses biofiksasi karbondioksida yang melibatkan mikroalga. Dari ketiga bentuk teknologi carbon capture, potensi besar yang menggunakan kembali karbon sebagai bahan penunjang produksi melalui CCU (Carbon capture and Utilization) yang dapat mendaur ulang CO₂ yang ditangkap dan memanfaatkannya sebagai sumber daya untuk menghasilkan produk bernilai tambah (VAP) yang netral emisi atau negatif. Selain itu, dalam metodologi CCU yang dimediasi secara

1 biologis (bio-CCU) oleh mikroalga merupakan bioteknologi yang menjanjikan untuk
2 mengurangi emisi karbon secara drastis [13]. Strategi peningkatan budidaya mikroalga sebagai
3 *Carbon Capture* melalui mutagenesis, rekayasa genetik, dan penggunaan bahan nano.
4 Mutagenesis UV, Nuclear, dan Chemical adalah upaya meningkatkan fiksasi CO₂
5 (karbondioksida) mikroalga. Bahan nano dapat sangat meningkatkan laju transpor elektron
6 relatif dalam sistem fotosintesis II serta tingkat spesies oksigen reaktif dalam mikroalga,
7 sehingga meningkatkan fotosintesis umum menuju karotenoid [4]. Pemilihan teknologi CCS
8 menggunakan mikroalga berpengaruh terhadap hasil biomassa yang diperoleh sehingga akan
9 mempengaruhi jumlah karbon yang difiksasi. Selain itu, terdapat pula perbedaan dalam hal
10 kebutuhan energi, nutrien, air dan material bangunan, yang pada akhirnya akan berpengaruh
11 terhadap jumlah karbon yang digunakan/diemisikan [14]. Di Indonesia, teknologi CCS
12 (*Carbon Capture and Storage*) masih dalam tahap pengembangan yang secara umum terdiri
13 dari dua jenis yaitu fotobioreaktor (FBR) dan kolam terbuka (*open pond*) [14]. Pemilihan
14 teknologi CCS menggunakan mikroalga berpengaruh terhadap hasil biomassa yang diperoleh
15 sehingga akan mempengaruhi jumlah karbon yang difiksasi.

16 Pemilihan budidaya mikroalga sebagai CCS didasari pada kemampuannya menyerap
17 gas CO₂ sebagai bahan baku proses fotosintesis dan mengubahnya menjadi biomassa.
18 Kemampuan ini menjadi salah satu daya tarik mikroalga untuk digunakan sebagai penangkap
19 karbon dalam skala besar, khususnya yang diemisikan dari cerobong industri [13], [15].
20 Mikroalga umumnya berupa ganggang hijau biru prokariotik (Cyanobacteria) dan mikroalga
21 eukariotik termasuk ganggang hijau, ganggang merah, dan diatom. Mikroorganisme ini
22 mengungguli bahan baku lainnya dalam hal kemampuan mereka untuk tumbuh subur di
23 lingkungan yang ekstrim dan kebutuhan nutrisi yang sederhana namun serba guna. struktur
24 seluler yang tidak rumit dan pertumbuhan mikroalga yang cepat memberi mereka efisiensi
25 fiksasi CO₂ lebih tinggi 10-50 kali lipat daripada tanaman terestrial [16]. Fotosintesis
26 prokariotik berevolusi miliaran tahun yang lalu (akhirnya memunculkan fotosintesis
27 eukariotik) dan secara alami mereformasi seluruh atmosfer bumi dengan mengonsumsi CO₂
28 dan memperkayanya dengan oksigen. Kelompok mikroorganisme yang sangat beragam ini
29 telah digunakan untuk mengubah karbon anorganik (Ci) menjadi senyawa berbasis karbon
30 organik melalui fotosintesis. Ganggang hijau eukariotik, diatom, dan euglenoid, serta
31 cyanobacteria prokariotik (selanjutnya, secara kolektif dijelaskan dengan istilah umum
32 'mikroalga') menggabungkan CO₂ untuk mensintesis berbagai senyawa biokimia, termasuk
33 lipid, protein, karbohidrat, pigmen, dan fenol [13].

Mikroalga dapat mengikat CO₂ dari berbagai sumber yaitu dari atmosfer, gas buang industri (misalnya gas buang dan gas pembakaran), dan terfiksasi dalam bentuk karbonat anorganik terlarut (misalnya NaHCO₃ dan Na₂CO₃) [7]. Penangkapan karbon melalui budidaya mikroalga dapat dilakukan di habitat alaminya seperti sungai, danau, dan laut serta difasilitasi budidaya mikroalga. Strategi penangkapan karbon menggunakan mikroalga di habitat alami seperti laut dapat ditingkatkan melalui pemupukan laut, yang mana dilakukan dengan memperkaya nutrisi perairan dan membatasi nutrisi zat besi (makronutrien) yang dikenal penghambat produktivitas biomassa. Akan tetapi dalam praktiknya masih perlu mengatasi ketidakpastian efek sampingnya yang mungkin dapat mengubah ekologi dan biokimia perairan [17]. Sedangkan, budidaya mikroalga di lingkungan terfasilitasi meliputi fotobioreaktor dan kolam terbuka dengan menambah sumber nutrisi karbonat (Na₂CO₃/Natrium Karbonat dan NaHCO₃/Natrium Bikarbonat) yang terbukti dapat meningkatkan pertumbuhan sel. Selain itu, biomassa yang dihasilkan dalam budidaya mikroalga dapat dikonsumsi sebagai pupuk, pakan ternak, makanan kesehatan atau/dan diubah menjadi biofuel untuk menghasilkan siklus karbon yang lengkap serta agrichar sebagai bentuk bio-sekuestrasi CO₂ permanen. Sehingga, fiksasi CO₂ pada fotosintesis dianggap sebagai teknologi yang layak karena hemat energi, berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Proses penyerapan CO₂ dari atmosfer oleh sel melibatkan peran dari zinc metalloenzyme carbonic anhydrase (CA) ekstraseluler serta sistem transpor aktif yang menyerap nutrisi tambahan (karbonat). Adapun enzim Carbonat-anhydrase (CA) berupa metallo-enzyme yang memfasilitasi fiksasi CO₂ melalui serangan nukleofilik oleh ion hidroksida yang terikat pada atom seng (Zn) serta berperan dalam fiksasi karbon dengan mengubah CO₂ menjadi bikarbonat yang merupakan substrat untuk RuBisCO [10]. Lalu, bergantung pada spesies mikroalga CO₂ dapat disimpan sebagai lipid, karbohidrat, atau protein. CO₂ yang tergabung sebagai lipid dalam mikroalga dapat diekstraksi dan digunakan sebagai biofuel, biodiesel, dan bioetanol. Adapun reaksi kimia yang dikatalisis oleh enzim karbonat anhidrase melalui persamaan sebagai berikut:



Cyanobacteria dan alga telah mengembangkan mekanisme pemekatan karbon fotosintetik edisi eksklusif mereka sendiri (CCM) untuk membantu ribulosa-1,5-bisfosfat karboksilase/oksigenase (RuBisCO) dalam penangkapan CO₂ yang efisien. Karbonat anhidrase (CA), enzim metallo yang mengandung seng telah diamati memainkan peran kunci dalam CCM dengan mengkatalisis hidrasi reversibel CO₂ menjadi bikarbonat dan proton sehingga

membantu dalam fiksasi CO² atmosfer [18]. Adapun sejumlah spesies mikroalga yang diaplikasikan dalam teknologi carbon capture yaitu *Scenedesmus obliquus*, *Chlorella kessleri* [19], *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella tertiolecta*, *Botryococcus braunii*, *Spirulina platensis* [20], *Chlorocuccum littorale* [21], *Nannochloropsis okulata* [22], dan *Anabaena* sp. CH1 [23]. Studi-studi ini terutama berfokus pada pengaruh berbagai konsentrasi CO₂ pada produksi biomassa. Pendekatan ini menciptakan siklus karbon yang berkelanjutan karena CO₂ yang dipancarkan dari pembakaran biodiesel atau bioetanol diserap kembali oleh mikroalga untuk tumbuh dan oleh karena itu, secara terus-menerus menjaga tingkat CO₂ di atmosfer. Adapun keunggulan dari pemanfaatan mikroalga sebagai carbon capture adalah laju fotosintesis yang lebih tinggi, teknologi yang bersih dan berbiaya rendah serta produksi berbagai produk samping bernilai tinggi seperti biodiesel, pigmen dengan nilai pengobatan, pakan ternak untuk akuakultur, biomassa, pupuk, dan produk kosmetik lainnya.

3.5. Potensi Pengembangan Teknologi Carbon Capture di Masa Depan. Salah satu hambatan dalam pengembangan teknologi *carbon capture* secara signifikan dan luas adalah biaya operasional dan perawatan tinggi. Meskipun perkiraan biaya sangat bervariasi, biaya terbesar biasanya terkait dengan peralatan dan energi yang dibutuhkan untuk fase penangkapan dan kompresi. Pada tahap penangkapan CO₂ dapat menurunkan daya dan efisiensi pabrik industri serta meningkatkan penggunaan airnya dan biaya tambahan yang ditimbulkan oleh faktor ini dan lainnya pada akhirnya dapat membuat proyek carbon capture belum layak secara finansial [12]. Kendala utama lainnya yang dihadapi adalah tingginya kebutuhan energi dalam pengoperasian teknologi tersebut, khususnya dari penggunaan listrik untuk pompa, dan kebutuhan nutrisi. Guna mengurangi kebutuhan energi tersebut maka diperlukan rekayasa desain dari teknologi ini, sedangkan untuk mengurangi emisi karbon, maka diperlukan pemanfaatan sumberdaya energi terbarukan. Namun mengingat pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia masih sedikit, maka masih perlu peninjauan dan pengkajian lebih lanjut dalam optimalisasi teknologi *carbon capture* di industri.

Dilihat dari segi biaya, tentu penggunaan teknologi *carbon capture* secara fisik dan kimia lebih banyak memakan biaya dibandingkan cara biologis. Hal ini didukung oleh penelitian Daneshvar et al., (2022) dan NTEL (*National Energy Technology Laboratory*) bahwa pemanfaatan karbon (CCUS) di USA yang hemat biaya, dengan mempertimbangkan harga CO₂ rata-rata global sekitar \$62,65/ton CO₂. Strategi tersebut membutuhkan hampir \$8,20 triliun investasi keuangan yang, bahkan jika diimbangi dengan manfaat penangkapan karbon tradisional (peningkatan pemulihan minyak) menghasilkan total biaya sebesar \$5,76

1 triliun hingga tahun 2050. Biaya yang luar biasa ini secara teknis dapat dipenuhi melalui upaya
2 kerjasama dan kolaboratif antar pemerintah, pihak swasta, dan warga setempat. Keberhasilan
3 industri komersial dalam mereduksi gas karbondioksida jauh lebih dapat dicapai jika biaya ini
4 diturunkan dengan mengadopsi teknik penghematan biaya baru, seperti bio-CCU pada skala
5 industri. Dalam pengaplikasiannya, teknologi biofiksasi mikroalga dikolaborasikan dengan
6 teknologi CCU industri (fisik dan kimia) guna mewujudkan pemanfaatan energi yang bersih,
7 hijau, rendah karbon dan efisien.

8 Teknologi fiksasi mikroalga karbon dioksida (CO_2) adalah salah satu cara efektif untuk
9 perlindungan lingkungan dan pemanfaatan sumber daya, yang dapat dikombinasikan dengan
10 pengolahan air limbah dan gas buang, persiapan biofuel dan teknologi lainnya, dengan manfaat
11 ekonomi yang tinggi. Namun, dalam aplikasi industri, mikroalga masih memiliki masalah
12 seperti efisiensi fotosintesis yang buruk, biaya input yang tinggi, dan investasi modal yang
13 besar [24]. Strategi terpadu seperti kombinasi mitigasi gas buang CO_2 dengan produksi produk
14 sampingan bernilai tinggi, pengolahan air limbah dan/atau pemanfaatan limbah diharapkan
15 dapat meningkatkan kelayakan ekonomi dari strategi biofiksasi CO_2 budidaya mikroalga [7].
16 Selain itu, aplikasi teknologi carbon capture melalui pemanfaatan budidaya mikroalga masih
17 memerlukan pengembangan lebih lanjut dalam hal desain, bahan baku maupun proses
18 produksi. Beberapa hal yang perlu dikembangkan dalam upaya peningkatan efisiensi pada
19 *upstream process* seperti seleksi jenis mikroalga yang tepat, optimalisasi pasokan nutrisi dan
20 sumber nutrisi alternatif yang lebih murah dan ramah lingkungan (misalnya memanfaatkan air
21 limbah organik), optimalisasi kondisi operasi kultur (intensitas cahaya, pH dan pengadukan),
22 menggunakan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan (*renewable energy*); maupun
23 *down stream process* seperti teknik pemanenan dan pemanfaatan biomassa masih perlu
24 dilakukan [14]. Selain itu produksi biomassa perlu ditingkatkan, misalnya dari 20% ke 60%
25 dapat mengurangi emisi GRK (gas rumah kaca) per kg biomassa yang dihasilkan melalui
26 pemilihan jenis mikroalga yang tepat dan desain teknologi yang cocok untuk jenis mikroalga
27 yang terpilih. Sehingga, pengembangan teknologi carbon capture harus berfokus pada
28 kebutuhan dasar lingkungan, yaitu minimalisasi emisi GRK untuk kesehatan dan keselamatan
29 makhluk hidup dengan memperhitungkan segi ekonomis.

30 31 4. CONCLUSIONS 32

33 Kenaikan suhu global berbanding lurus dengan jumlah karbon dioksida di atmosfer.
34 Sumber emisi gas CO_2 dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil, yang sering digunakan

1 sebagai sumber energi di banyak industri. Adapun guna meminimalisir karbondioksida di
2 udara, maka sejumlah besar perhatian telah difokuskan pada teknologi carbon capture guna
3 mengurangi emisi dengan cara menyimpan CO₂ di dalam bumi sehingga tidak terlepas ke
4 atmosfer. Bentuk teknologi *carbon capture* yang paling umum adalah CCS (Carbon Capture
5 and Storage) yang memiliki prinsip kerja dengan menangkap CO₂ dan menyuntikkannya ke
6 lapisan batuan bawah tanah di reservoir minyak dan gas yang telah habis atau mendekati habis,
7 dan CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage) yang menggunakan kembali CO₂ untuk
8 menunjang proses industri seperti industri minyak atau biofuel. Berdasarkan cara
9 penangkapannya, maka dapat dikategorikan menjadi pre-combustion, oxy-combustion, dan
10 post-combustion yang banyak menggunakan metode secara fisik dan kimia. Selain itu, melalui
11 pemanfaatan budidaya mikroalga sebagai Carbon Capture and Storage (CCS) emisi CO₂
12 (karbondioksida) melalui metode biologis (biofiksasi) berperan penting dalam menjaga
13 keseimbangan suhu bumi. Penangkapan karbon melalui budidaya mikroalga dapat
14 dikelompokkan dalam sistem terbuka (kolam retensi) dan sistem tertutup (fotobioreaktor atau
15 FBR). Selain itu, fiksasi mikroalga dapat ditingkatkan melalui pengontrolan faktor eksternal
16 seperti pH, intensitas penyinaran, nutrisi, suhu, dan lain sebagainya. Prospek pemanfaatan
17 teknologi carbon capture di masa yang akan datang memberikan tantangan bagi para peneliti
18 dalam mengembangkan teknologi carbon capture yang produktivitas dan daya tangkap
19 karbonnya tinggi, kemudahan dalam perawatan dan biaya operasional. Mengingat negara
20 Indonesia terletak di daerah tropis dengan biodiversitas mikroalga yang berlimpah
21 menjadikannya sebagai potensi yang besar dalam pengembangan teknologi ini. Karena itu,
22 Indonesia diharapkan dapat menjadi pemain aktif dalam pengembangan teknologi ini dan tidak
23 hanya menjadi pasar bagi teknologi sejenis yang dikembangkan di luar negeri.

24 25 REFERENCES

- 26
- 27 [1] US Energy Information Administration, (2016). "International Energy Outlook 2016".
28 USA.
- 29 [2] WHO, (2021). "WHO Global Air Quality Guidelines". New York, USA: WHO
30 Publications.
- 31 [3] R. M. Cuéllar-Franca and A. Azapagic. (2015) "Carbon capture, storage and utilisation
32 technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental
33 impacts," *J. CO2 Util.*, **9**: 82–102. 10.1016/j.jcou.2014.12.001.

- [4] S. Li, X. Li, and S.-H. Ho. (2022) “How to enhance carbon capture by evolution of microalgal photosynthesis?,” *Sep. Purif. Technol.*, **291**: 120951. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120951>.
- [5] Global CCS Institute, (2022). “Global Status of CCS 2022 : Global CCS Institute Report,” New York, USA.
- [6] B. Sreenivasulu, D. V. Gayatri, I. Sreedhar, and K. V. Raghavan, (2015) “A journey into the process and engineering aspects of carbon capture technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **41**: 1324–1350. 10.1016/j.rser.2014.09.029.
- [7] B. Wang and C. Q. Lan, (2010) “Biofixation of carbon dioxide (CO₂) by microorganisms,” *Dev. Innov. Carbon Dioxide*, **2**: 411–432. 10.1533/9781845699581.4.411.
- [8] M. K. Lam, K. T. Lee, and A. R. Mohamed, (2012) “Current status and challenges on microalgae-based carbon capture,” *Int. J. Greenh. Gas Control*, **10**: 456–469. 10.1016/j.ijggc.2012.07.010.
- [9] R. Ben-Mansour *et al.*, (2016) “Carbon capture by physical adsorption: Materials, experimental investigations and numerical modeling and simulations - A review,” *Appl. Energy*, **161**: 225–255. 10.1016/j.apenergy.2015.10.011.
- [10] M. Mondal *et al.*, (2017) “Production of biodiesel from microalgae through biological carbon capture: a review,” *3 Biotech*, **7**(2): 1–21. 10.1007/s13205-017-0727-4.
- [11] Z. Zhang, T. N. G. Borhani, and M. H. El-Naas, (2018). *Carbon Capture*. Elsevier. 10.1016/B978-0-12-813734-5.00056-1.
- [12] A. Al-Mamoori, A. Krishnamurthy, A. A. Rownaghi, and F. Rezaei, (2017) “Carbon Capture and Utilization Update,” *Energy Technol.*, **5**(6): 834–849. 10.1002/ente.201600747.
- [13] E. Daneshvar, R. J. Wicker, P. L. Show, and A. Bhatnagar, (2021) “Biologically-mediated carbon capture and utilization by microalgae towards sustainable CO₂ biofixation and biomass valorization – A review,” *Chem. Eng. J.*, **427**(April 2021): 130884. 10.1016/j.cej.2021.130884.
- [14] J. Prayitno, R. Admirasari, T. W. Sudinda, and W. S. Winanti, (2021) “Teknologi Penangkapan Karbon dengan Mikroalga: Peluang dan Tantangan dalam Mitigasi Perubahan Iklim,” *J. Rekayasa Lingkungan*, **14**(2): 91–101.
- [15] M. Olaizola and T. Bridges, (2004) “Microalga removal of CO₂ from flue gases: CO₂ capture from a coal combustor,” *Biotechnol. Bio-process Eng.* **8**(October): 360–367.
- [16] J. Singh and D. W. Dhar, (2019) “Overview of carbon capture technology: Microalgal

- biorefinery concept and state-of-the-art,” *Front. Mar. Sci.*, **6**(FEB): 1–9. 10.3389/fmars.2019.00029.
- [17] O. Amount and L. Bopp, (2006) “Globalizing results from ocean in situ iron fertilization studies,” *Glob. Biogeochem. Cycle*, **20**(2): 20. <https://doi.org/10.1029/2005GB002591>.
- [18] M. Mondal, S. Khanra, O. N. Iwari, K. Gayen, and G. N. Halder, (2016) “Role of Carbonic Anhydrase on the Way to Biological Carbon Capture Through Microalgae - A Mini Review,” *Environ. Prog. Sustain. Energy*, **33**(3):676–680. 10.1002/ep.
- [19] M. G. De Morais, J. Alberto, and V. Costa, (2007) “Isolation and selection of microalgae from coal fired thermoelectric power plant for biofixation of carbon dioxide,” *Energy Convers. Manag.*, **48**(7): 2169–2173. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.12.011>.
- [20] E. B. Sydney *et al.*, (2010) “Potential carbon dioxide fixation by industrially important microalgae,” *Bioresour. Technol.*, **101**(15): 5892–5896. 10.1016/j.biortech.2010.02.088.
- [21] M. Ota *et al.*, (2009) “Fatty acid production from a highly CO₂ tolerant alga, *Chlorocuccum littorale*, in the presence of inorganic carbon and nitrate,” *Bioresour. Technol.*, **100**(21): 5237–5242. 10.1016/j.biortech.2009.05.048.
- [22] S. Y. Chiu, C. Y. Kao, M. T. Tsai, S. C. Ong, C. H. Chen, and C. S. Lin, (2009) “Lipid accumulation and CO₂ utilization of *Nannochloropsis oculata* in response to CO₂ aeration,” *Bioresour. Technol.*, **100**(2):833–838. 10.1016/j.biortech.2008.06.061.
- [23] C. L. Chiang, C. M. Lee, and P. C. Chen, (2011) “Utilization of the Cyanobacteria *Anabaena* sp. CH1 in Biological Carbon Dioxide Mitigation Processes,” *Bioresour. Technol.*, **102**(9): 5400–5405. 10.1016/j.biortech.2010.10.089.
- [24] G. Li, W. Xiao, T. Yang, and T. Lyu, (2023) “Optimization and Process Effect for Microalgae Carbon Dioxide Fixation Technology Applications Based on Carbon Capture: A Comprehensive Review,” *C J. Carbon Res.*, **9**(1): 35. 10.3390/c9010035.