

Perkembangan Metode Penangkapan Karbon, Dahulu Hingga Kini

Fanny Leastiana, Rahmat Widodo
PPSDM Migas, Cepu

INFORMASI NASKAH

Diterima : 19 April 2024
Direvisi : 7 Oktober 2024
Disetujui : 11 November 2024
Terbit : 25 November 2024

Email korespondensi:
fanny.leestiana@esdm.go.id

Laman daring:
<https://doi.org/10.37525/mz/2024-2/599>

ABSTRAK

Pemanasan global menjadi isu yang sangat sensitif belakangan ini. Hal ini dikarenakan pemanasan global menimbulkan dampak yang luar biasa bagi manusia, seperti perubahan iklim yang sudah tidak dapat diprediksi, mencairnya es di Kutub Utara dan Kutub Selatan serta naiknya permukaan air laut. Pemicu dari pemanasan global adalah tingginya konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer bumi. Salah satu jenis gas rumah kaca yang terus meningkat konsentrasinya dalam 50 tahun terakhir adalah CO₂. Salah satu cara menanggulangi hal tersebut adalah dengan cara penangkapan gas CO₂ yang dapat dimanfaatkan secara langsung maupun disimpan terlebih dahulu. Terdapat empat metode carbon capture hingga saat ini yaitu *post combustion*, *pre-combustion*, *oxyfuel* dan gabungan antara *Direct Air Capture* dan *Biological Capture*. Metode *post combustion* menggunakan adsorber/absorber dan *stripper* untuk menangkap CO₂ pada gas hasil pembakaran. Metode *pre-combustion* menerapkan prinsip dekarbonisasi pada bahan bakar sebelum digunakan, jadi pada metode ini akan dipisahkan CO dan H₂ sehingga yang digunakan untuk pembakaran adalah H₂. Metode ketiga adalah metode *oxyfuel*, pada metode ini dilakukan pemisahan komponen N₂ dan O₂ pada udara yang akan digunakan untuk pembakaran, sehingga yang digunakan untuk pembakaran adalah O₂ murni. Metode yang terakhir yang merupakan salah satu inovasi baru adalah metode yang menggabungkan *Direct Air Capture* dan *Biological Capture* menjadi metode baru yaitu *CityCapt* yang digunakan untuk menangkap karbon pada udara ambien. Metode ini memanfaatkan mikroalga untuk menangkap CO₂ pada udara ambien. Walaupun metode yang digunakan telah ada sejak lama, namun material yang digunakan terus diperbaharui sesuai perkembangan jaman untuk meningkatkan efisiensi proses dan hasil.

Kata kunci: Karbon dioksida, *Carbon capture*, Pemanasan global, Gas Rumah Kaca

ABSTRACT

Global warming become sensitive issue lately. This is because it has an extraordinary impact on humans, such as climate change, the melting of ice at the North and South Poles, also rising sea levels. One of the trigger is the greenhouse gases in the Earth's atmosphere that has been increasing in over the last 50 years, CO₂. One way to address this problem is by capturing CO₂ gases, then utilized directly or stored before used. There are four carbon capture methods which will be discussed: post-combustion, pre-combustion, oxyfuel, and a combination of Direct Air Capture and Biological Capture. The post-combustion method uses adsorbers/absorbers and strippers to capture CO₂ from combustion gases. The pre-combustion method applies the principle of decarbonization to the fuel before use, so in this method, CO and H₂ are separated, and only H₂ gas is used for combustion. The third method is the oxyfuel method, which separates the N₂ and O₂ components in the air that will be used for combustion, so that pure O₂ is used for combustion. The last method, which is one of the new innovations, is a method that combines Direct Air Capture and Biological Capture into a new method called CityCapt, which is used to capture carbon in ambient air. This method utilizes microalgae to capture CO₂ in ambient air. Even though the method used has been around for a long time, the materials used in process is developed to be updated over time to increase the efficiency in process and results.

Keywords: Carbon dioxide, Carbon capture, Global warming, greenhouse gases

PENDAHULUAN

Pemanasan global telah menjadi isu sensitif belakangan ini bagi seluruh penduduk dunia. Dampak langsung dari pemanasan global yang dapat kita rasakan langsung diantaranya adalah perubahan musim yang tidak semestinya, kenaikan permukaan air laut, peristiwa mencairnya es di kutub utara dan selatan, serta masih banyak lagi fenomena alam lainnya (Wahyuni & Suranto, 2021).

Pemanasana global merupakan salah satu akibat dari adanya peningkatan temperatur benda di permukaan bumi secara drastis karena ketidakmampuan untuk memantulkan kembali pancaran panas dari radiasi matahari atau yang sering dikenal dengan efek rumah kaca (Rahmadania, 2022).

Seiring berjalannya waktu, perkembangan teknologi semakin maju pesat. Kebutuhan akan energi sebagai sumber penggerak semakin tidak terelakan. Hingga saat ini, di tahun 2024, sumber energi utama yang masih banyak digunakan manusia di seluruh dunia adalah energi yang berbahan dasar fosil dengan persentase sebesar 85% (Mondal et al., 2012). Hasil penggunaan energi fosil tersebut memiliki produk sampingan,

diantaranya adalah gas karbon dioksida (CO₂) yang sangat berperan dalam efek rumah kaca. Bahkan menurut penelitian yang sudah dilakukan, konsentrasi gas CO₂ ini makin meningkat dalam kurun waktu 50 tahun terakhir ini, yakni dari sekitar 310 menjadi lebih dari 415 ppm (Wu et al., 2023) atau sekitar 2 ppm per tahun (Bhavsar et al., 2023).

Adanya kondisi yang membahayakan serta membuat manusia tidak nyaman inilah yang akhirnya mendorong terciptanya aksi untuk melakukan perubahan. Berangkat dari motivasi inilah, maka diselenggarakan pertemuan bagi seluruh pemimpin negara, baik negara maju maupun berkembang untuk bersama – sama mengatasi permasalahan efek rumah kaca ini.

Salah satu solusi yang sudah dilakukan sejak lama adalah usaha untuk menangkap karbon dioksida yang dihasilkan tersebut untuk digunakan atau dimanfaatkan kembali. Hal ini didukung pula oleh badan PBB melalui *Sustainable Development Goals* (SDG) Nomor 13 tentang *climat action* (Mikunda et al., 2021).

Pada pembahasan kali ini, akan berfokus pada metode atau cara yang digunakan, baik dalam skala laboratorium ataupun yang telah diterapkan, untuk menangkap dan memanfaatkan karbon dioksida

tersebut dari waktu ke waktu, serta tantangan yang dimiliki oleh setiap metoda tersebut. Hal ini dikarenakan proses penangkapan CO₂ ini sendiri menghabiskan sekitar 70-80% dari total biaya proyek mulai dari penangkapan, transportasi, hingga penyimpanannya (Blomen et al., 2009).

Selain membahas perkembangan metode atau cara yang telah banyak digunakan, pada pembahasan kali ini juga bertujuan untuk menunjukkan kelebihan dan kekurangan pada setiap metode dari penelitian yang sudah dilakukan tersebut. Pembahasan yang dilakukan lebih berfokus pada metode penangkapan karbon dioksida hasil dari pembakaran bahan bakar yang menjadi sumber utama produksi CO₂ khususnya pada skala industri dan pembangkit listrik.

METODE PENELITIAN

Penulisan karya ilmiah ini menggunakan pendekatan non empiris yang bersumber dari studi pustaka, analisa data dari penelitian yang telah dilakukan, serta membandingkan hasil dari beberapa penelitian tersebut. Beberapa parameter yang digunakan saat mengumpulkan data sebagai pembanding diantaranya adalah efisiensi dari masing – masing proses yang telah dilakukan dari jaman ke jaman, kelebihan dan kekurangan masing – masing metode yang beberapa diantaranya merupakan hasil perbaikan dari metode sebelumnya, serta dampak yang ditimbulkan dari penggunaan metode tersebut, khususnya terhadap lingkungan. Hal ini dikarenakan tujuan penggunaan metode *carbon capture* ini adalah untuk mengurangi emisi gas karbon dioksida di permukaan bumi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gas karbon dioksida yang dihasilkan oleh aktivitas manusia atau yang sering disebut *carbon foot print* (Markewitz et al., 2012), bisa bersumber dari banyak hal, diantaranya proyek pembangkit, pabrik manufaktur, bahkan hingga penggunaan kendaraan serta makanan kita sehari – hari. Dilaporkan dalam penelitian bahwa penyumbang emisi gas karbon dioksida terbesar berasal dari proyek pembangkit (*power plant*) yakni sekitar 40% dari total emisi yang dihasilkan di dunia (Mondal et al., 2012). Hal ini tidak dapat dihindari karena seluruh aspek kehidupan manusia masih

bergantung pada energi yang bersumber dari fosil tersebut.

Namun, dalam rangka memenuhi kesepakatan Paris tahun 2016, berbagai upaya terus dilakukan untuk mengurangi dampak rumah kaca. Salah satu usaha tersebut adalah dengan menangkap dan menyimpan ataupun langsung memanfaatkan hasil tangkapan tersebut untuk kepentingan lain, sehingga meminimalisir jumlah karbon dioksida di udara bebas.

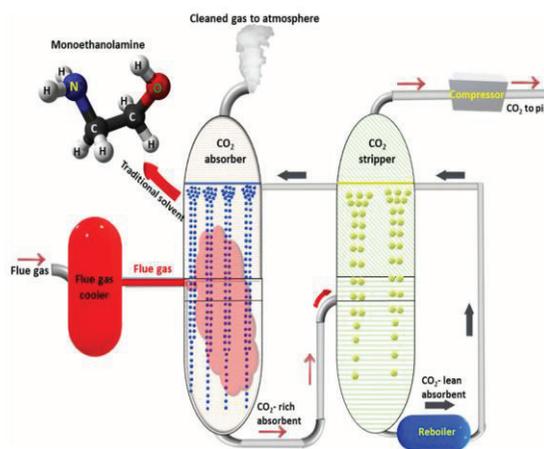
Proyek pertama tentang *carbon capture* ini sebenarnya telah dimulai sekitar tahun 1960 an oleh Chevron di Amerika dan Kanada. Namun, konsep penangkapan karbon yang akan disimpan maupun diberdayakan seperti yang kita kenal sekarang ini di inisiasi oleh Marchetti, dengan proyek *The Sleipner CCS* pada tahun 1996 (Ma et al., 2022). Seiring berkembangnya teknologi, ternyata metode yang digunakan untuk menangkap karbon dioksida tersebut masih belum berkembang terlalu jauh. Pada pembahasan ini, akan dibahas perkembangan metode penangkapan karbon dioksida yang bersumber dari produk sampingan pembangkit energi (*power plant*) atau proses industri, karena dua bidang itu merupakan penyumbang terbesar saat ini. Secara prinsip, metode yang digunakan untuk menangkap karbon tersebut dibagi menjadi tiga, yaitu: pre-combustion, post combustion, dan Oxyfuel (Markewitz et al., 2012; Mondal et al., 2012; Wu et al., 2023). Metode *Pre-* dan *Post combustion* sejauh ini merupakan dua metode yang paling banyak diteliti yaitu sekitar 96.6%, sedangkan metode *oxyfuel* masih jarang dibahas. Hanya sekitar 3.4% literatur yang menuliskan tentang *oxyfuel* ini (Osman et al., 2021).

A. *Post Combustion Process*

Metode *post combustion* sesuai dengan arti harafiah istilah tersebut, berarti metode yang digunakan untuk menangkap CO₂ saat bahan bakar *fossil* atau sejenisnya selesai dibakar (Rubin et al., 2012). Setelah gas hasil pembakaran dihasilkan, gas tersebut tidak bisa langsung ditangkap, melainkan harus melewati beberapa tahapan terlebih dahulu, diantaranya: denitrifikasi, desulfurisasi, *dust removal*, sekaligus pendinginan. Kemudian *flue gas* yang sebagian besar terdiri dari CO₂, N₂, dan H₂O tersebut akan diproses lebih lanjut di absorber atau adsorber dan dikirim

ke *stripper*, untuk memurnikan CO₂ yang telah terikat tadi. CO₂ yang telah terkonsentrasi tersebut dapat dikirim atau dimanfaatkan kembali untuk keperluan lain (Osman et al., 2021). Proses ini seperti yang diilustrasikan di Gambar 1. Ilustrasi Proses *Post Combustion*.

Metode adsorpsi maupun absorpsi tersebut dapat terjadi secara kimia maupun fisik. Namun dari sejumlah penelitian yang telah dilakukan, metode absorpsi secara kimia dengan *solvent* berbasis *amine*, atau yang mengandung *ammonia* atau alkali merupakan metode yang paling menjanjikan (Markewitz et al., 2012).



Gambar 1. Ilustrasi Proses *Post Combustion* (Osman et al., 2021)

Kekurangan atau kelemahan dari proses ini diantaranya adalah rawan terjadinya korosi karena penggunaan amine, membutuhkan energi tinggi saat proses regenerasi *solvent* maupun adanya *solvent* yang hilang karena menguap ataupun terdegradasi saat proses berlangsung, dampak lingkungan yang cukup besar, serta modal yang besar untuk pengaplikasiannya. Ditambah, walaupun *post combustion* merupakan metode yang paling menjanjikan dalam skala lapangan, metode pengoperasian yang fleksibel masih belum dapat dibuktikan. (Markewitz et al., 2012; Osman et al., 2021). Sedangkan dari CO₂ yang berhasil ditangkap, tekanannya lebih kecil jika dibandingkan dengan metode *pre-combustion*, selain itu masih terdapat banyak mengandung impurities seperti SO_x, NO_x, serta gas lain yang

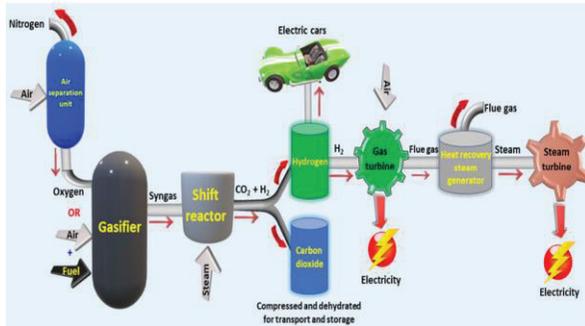
tidak dapat terkondensasi (Mondal et al., 2012).

Keuntungan dari penggunaan metode ini yang utama adalah: efisiensi proses penangkapan gas CO₂ merupakan yang paling tinggi dari berbagai metode lainnya yakni dapat mencapai 85-95% CO₂ (Rubin et al., 2012). Selain itu, keuntungan lainnya adalah: peralatan untuk metode ini dapat dipasang kembali di lokasi power plant lain yang sudah ada ataupun industri lain yang berlokasi sesuai (Blomen et al., 2009), dapat digunakan pada tekanan gas masuk yang rendah (tekanan atmosferis) dengan konsentrasi hanya sekitar 15% atau kurang, memiliki efisiensi thermal yang tinggi dalam prosesnya (Mondal et al., 2012).

Pengembangan yang masih dapat dilakukan hingga kini adalah pemilihan material dalam proses adsorpsi maupun absorpsi yang masih dapat terus diteliti untuk meningkatkan efisiensi dan menekan biaya saat diaplikasikan.

B. *Pre-Combustion*

Pre-combustion adalah metode yang digunakan dengan cara memberi perlakuan berupa dekarbonisasi pada bahan bakar tradisional (batu bara atau gas alam), sebelum digunakan dalam proses (Osman et al., 2021; Rubin et al., 2012). Gas *feeding* yang telah diberi perlakuan ini disebut sebagai *syngas*, yang merupakan campuran antara CO dan H₂ (Mondal et al., 2012; Osman et al., 2021) Proses ini dilakukan menggunakan tekanan dan konsentrasi gas CO₂ tinggi (Wu et al., 2023). Campuran *syngas* ini kemudian didinginkan dan dibersihkan dari pengotor yang mungkin ada seperti hidrogen sulfida, asam klorida, merkuri, dan karbon disulfida. Hasil purifikasi *syngas* tersebut kemudian direaksikan dengan *steam* untuk meningkatkan persentase CO₂ dan membantu dalam proses pemisahan pada proses berikutnya. Tahapan akhirnya adalah pemisahan CO₂ yang telah terbentuk melalui absorpsi fisik maupun kimia (Osman et al., 2021; Yang et al., 2008). Proses *Pre-combustion* ini seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. Ilustrasi proses *Pre-Combustion* oleh Osman et al., 2021.



Gambar 2. Ilustrasi Proses Pre- Combustion (Osman et al., 2021)

Kekurangan dari proses ini diantaranya adalah sulitnya menentukan jenis solvent yang sesuai karena harus dapat diregenerasi dengan temperatur yang lebih rendah daripada saat digunakan untuk menghindari berkurangnya solvent (Osman et al., 2021). Jumlah karbon dioksida yang dapat ditangkap dengan metode ini tergantung pada faktor *flow rate syngas*, produksi hidrogen, *power* yang dihasilkan, *flow rate* hidrokarbon, juga efisiensi *thermal* dari keseluruhan sistem (Wu et al., 2023). Dengan kata lain, dalam menggunakan metode ini, ada banyak parameter yang harus diperhatikan dan ditentukan dengan baik agar dapat mencapai hasil yang optimal. Selain hal tersebut, dilaporkan pula bahwa bisa terjadi penurunan efisiensi. Hal ini dilaporkan terjadi pada pembangkit batu bara dengan metode *scrubbing* secara fisik, dengan *losses* yang terjadi sekitar 9-12%. Namun jika metode *physical scrubbing* tersebut diganti dengan membran *polymeric*, *losses* yang terjadi dilaporkan menjadi hanya 8% (Markewitz et al., 2012).

Keuntungan dalam penggunaan metode ini diantaranya adalah tidak memiliki dampak negatif untuk lingkungan, sosial, maupun ekonomi (Wu et al., 2023), nilai efisiensi proses penangkapan CO₂ dengan metode ini juga masih dapat ditingkatkan (Markewitz et al., 2012). Walaupun juga disebutkan bahwa biaya yang besar merupakan salah satu kekurangan dari metode pre-combustion ini, namun jika dibandingkan dengan metode *post combustion* maka metode ini berpotensi memerlukan biaya yang relatif lebih rendah (Yang et al., 2008).

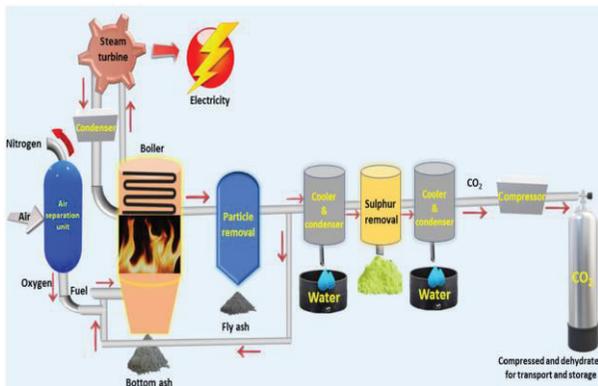
C. Oxyfuel

Sesuai dengan namanya, metode *oxyfuel* ini merupakan gambaran dari proses yang terjadi dalam metode ini. Secara garis besar, proses ini berlangsung saat pembakaran bahan bakar berbasis *fossil* menggunakan oksigen murni. Kandungan CO₂ pada *plant* dalam proses ini berkisar pada 89V% (Markewitz et al., 2012). Proses ini seperti yang diilustrasikan pada gambar 3. Ilustrasi Proses *Oxyfuel*.

Dari definisi proses tersebut, sudah tergambar bahwa biaya yang diperlukan untuk metode pemisahan CO₂ ini sangat besar, karena harus menyediakan gas oksigen murni, dengan kemurnian >95% (Mondal et al., 2012). Namun sejatinya, jika dibandingkan dengan kedua metode yang lain, biaya yang diperlukan untuk menggunakan teknologi ini relatif rendah, karena konsentrasi gas CO₂ yang dihasilkan dengan metode ini relatif lebih tinggi (Mondal et al., 2012).

Keuntungan dari metode ini diantaranya adalah karena menggunakan gas oksigen murni, maka tidak akan terbentuk senyawa NO_x dalam prosesnya, sehingga konsentrasinya dalam *flue gas* akan berkurang hingga 60-70%. Selain itu dalam prosesnya, metode ini memerlukan energi lebih sedikit untuk mengompres CO₂ (Mondal et al., 2012). Hal lain yang menjadikan daya tarik utama penggunaan metode ini adalah tidak perlunya membangun instalasi penangkap gas CO₂ setelah proses pembakaran (*post combustion metode*) yang berbiaya besar. Metode ini juga dapat digunakan pada pembangkit yang sederhana maupun dikombinasikan dengan metode lainnya (Rubin et al., 2012), dapat pula digunakan pada pembangkit baru atau yang sudah beroperasi dengan segala jenis bahan bakarnya (Osman et al., 2021). Karena gas yang digunakan dalam prosesnya hanya oksigen murni, maka ukuran beberapa alat dapat dikurangi sehingga menghemat biaya pengadaan, misalnya seperti boiler dan SO₂ *scrubber* (Yang et al., 2008).

Kelemahan dalam metode ini selain metode separasi gas CO₂ yang berbiaya mahal, juga desain boiler dan burner harus dimodifikasi sedemikian rupa sehingga sesuai dengan kebutuhan metode ini, sekaligus kemungkinan dapat retrofit sangat kecil atau hampir tidak ada (Markewitz et al., 2012).



Gambar 3. Ilustrasi Proses *Oxyfuel* (Osman et al., 2021)

D. *CityCapt*

Tiga pembahasan sebelumnya telah dijelaskan tentang metode untuk *carbon capture* pada hasil pembakaran bahan bakar secara langsung, baik yang dilakukan sebelum bahan bakar digunakan atau pun setelah dilakukan pembakaran. Pada pembahasan kali ini akan dilakukan pembahasan tentang metode *carbon capture* untuk udara ambien khususnya pada wilayah perkotaan. Gas CO₂ dapat dihasilkan dari berbagai aktivitas manusia di wilayah perkotaan, khususnya dari aktivitas kendaraan bermotor.

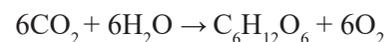
Salah satu teknologi untuk mengurangi kadar CO₂ di udara ambien yang telah diteliti sebelumnya adalah *CityCapt*. Teknologi ini menggunakan alga sebagai fotobioreaktor yang akan mengurangi kandungan CO₂ dari udara ambien. *CityCapt* menggunakan panel surya sebagai sumber energi untuk penggerak fan, selain itu mikroalga yang digunakan dapat dipanen yang nantinya dapat digunakan sebagai biomasa. Desain alat *CityCapt* seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4. Skema alat *CityCapt*. Dengan rincian komponen diantaranya adalah panel surya yang digunakan sebagai sumber energi penggerak, *input fan* digunakan sebagai penangkap udara dari luar, *air and dust filter* digunakan sebagai penyaring udara, *output fan* digunakan untuk menyalurkan udara keluar, *bioreactor* dan *air suction* yang berguna untuk memproses CO₂ menjadi mikroalga dan *algae output* digunakan untuk proses panen mikroalga (Khusniawati et al., 2023).



Gambar 4. Skema Alat *CityCapt* (Khusniawati et al., 2023)

CityCapt adalah teknologi *carbon capture* yang menggabungkan dua metode yaitu *Direct Air Capture* (DAC) dan *Biological Capture* (BC). Proses pada *CityCapt* diawali dengan masuknya udara ambien dari *input fan*. Metode DAC terjadi pada *dust and air filter*, dimana pada bagian ini menggunakan sorben padat pada proses filtrasi. Sorben padat yang digunakan dapat berupa zeolit, karbon aktif, *Metal Organic Frameworks*, bahan amina yang dimodifikasi, bahan silika, polimer organik berpori, tabung nano karbon, dan saringan molekul karbon (Khusniawati et al., 2023). Udara tanpa CO₂ yang sudah mengalami proses filtrasi akan dialirkan lewat *output fan*. Sedangkan CO₂ akan diteruskan ke fotobioreaktor untuk proses selanjutnya (Rezazadeh et al., 2021).

Metode selanjutnya yang terjadi adalah metode *biological capture* pada fotobioreaktor. Mikroalga yang digunakan pada sistem ini adalah *Chlorella vulgaris* yang memiliki kapasitas penyerapan CO₂ sebesar 617,6 kg per tahun. Proses yang terjadi pada fotobioreaktor adalah reaksi fotosintesis dengan reaksi sebagai berikut:



Mikroalga yang ada pada fotobioreaktor ini selanjutnya akan berkembang sehingga akan membentuk biomasa yang memiliki volume dan massa yang lebih besar. Biomasa ini nantinya bisa dimanfaatkan sebagai pewarna bio (*biopigment*), bahan bakar bio (*biofuel*) dan produk berbasis alga lainnya (Suciati & Aviantara, 2019).

KESIMPULAN

Proses penangkapan gas karbon dioksida sudah lama dilakukan sebagai bagian dari upaya untuk mengurangi pencemaran alam akibat aktivitas yang dilakukan manusia dalam proses bertahan hidup. Sejak awal dilakukan proses penangkapan gas karbon dioksida ini, banyak penelitian yang telah dilakukan baik dalam skala laboratorium maupun yang telah berhasil diterapkan secara *full scale*.

Secara garis besar, metode konvensional yang dikenal dalam proses penangkapan gas karbon dioksida ini terdiri dari metode *post combustion*, *pre- combustion*, dan *oxyfuel*. Dalam penerapan ketiga metode ini, seiring berkembangnya ilmu pengetahuan, metode ataupun material yang digunakan dalam prosesnya juga ikut mengalami perkembangan. Perkembangan ini semakin membantu dalam meningkatkan efisiensi dari masing – masing metode tersebut.

Masing-masing metode tersebut mengalami kelebihan dan kekurangan jika dibandingkan satu sama lain. Dimana dari segi biaya, yang membutuhkan biaya paling tinggi adalah metode *post combustion*, sedangkan metode yang membutuhkan biaya terendah adalah metode *oxyfuel*. Meskipun memiliki biaya yang paling tinggi, metode *post combustion* yang paling menjanjikan dalam skala lapangan dengan efisiensi penangkapan sebesar 85-95% CO₂. Sedangkan kekurangan dari metode *pre- combustion* adalah sulitnya menentukan jenis solvent yang sesuai dan banyaknya parameter yang harus diperhatikan dan ditentukan dengan baik untuk mendapatkan hasil yang optimal. Sedangkan kekurangan dari metode *oxyfuel* adalah perlunya modifikasi alat pembakaran yang sudah ada, jadi tidak hanya penambahan komponen baru tapi juga modifikasi alat yang sudah ada.

Selain ketiga metode konvensional tersebut, beberapa penelitian telah berhasil dilakukan, khususnya di Indonesia, yaitu dengan cara menggabungkan metode *Direct Air Capture* (DAC) dengan *Biological Capture* (BC) untuk menangkap gas karbon dioksida di udara *ambient*. Metode semacam ini juga masih perlu terus dikembangkan lagi untuk meningkatkan efisiensi hasilnya.

Untuk pengembangan lebih lanjut masih

banyak tantangan inovasi yang bisa dilakukan, diantaranya adalah pengembangan material pendukung dalam metode – metode penangkapan karbon dioksida yang sudah ada, dengan satu tujuan akhir yang masih sama, yaitu untuk meningkatkan efisiensi proses dan hasil gas karbon dioksida yang dapat ditangkap untuk mengurangi efek pemanasan global dan untuk bumi yang lebih baik.

Yang tak kalah pentingnya, faktor keekonomian menjadi hal penting yang juga perlu diperhatikan untuk mengurangi biaya pada penggunaan masing-masing teknologi yang akan dikembangkan kedepannya. Sehingga di masa depan perlu dikembangkan metode penangkapan karbon yang memiliki biaya yang lebih rendah dengan efisiensi penangkapan karbon dioksida yang lebih tinggi. Terlebih jika metode tersebut dapat diterapkan di kehidupan sehari – hari manusia yang banyak menghasilkan gas karbon dioksida.

DAFTAR PUSTAKA

- Bhavsar, A., Hingar, D., Ostwal, S., Thakkar, I., Jadeja, S., & Shah, M. (2023). The current scope and stand of carbon capture storage and utilization ~ A comprehensive review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2023.100368>
- Blomen, E., Hendriks, C., & Neele, F. (2009). Capture technologies: Improvements and promising developments. *Energy Procedia*, 1(1), 1505–1512. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.197>
- Khusniawati, R., Al Ghifari, M. S., Malik, W. M., Umar, Y. P., & Kunci, K. (2023). ESEC PROCEEDING CityCapt: Inovasi Teknologi Carbon Capture Direct Air and Biological Capture Guna Mendukung Pencapaian SDGs 2030. In *Environmental Science and Engineering Conference* (Vol. 4, Issue 1).
- Ma, J., Li, L., Wang, H., Du, Y., Ma, J., Zhang, X., & Wang, Z. (2022). Carbon Capture and Storage: History and the Road Ahead. In *Engineering* (Vol. 14, pp. 33–43). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.11.024>
- Markewitz, P., Kuckshinrichs, W., Leitner, W., Linssen, J., Zapp, P., Bongartz, R., Schreiber,

- A., & Müller, T. E. (2012). Worldwide innovations in the development of carbon capture technologies and the utilization of CO₂. In *Energy and Environmental Science* (Vol. 5, Issue 6, pp. 7281–7305). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c2ee03403d>
- Mikunda, T., Brunner, L., Skylogianni, E., Monteiro, J., Rycroft, L., & Kemper, J. (2021). Carbon capture and storage and the sustainable development goals. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 108. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103318>
- Mondal, M. K., Balsora, H. K., & Varshney, P. (2012). Progress and trends in CO₂ capture/separation technologies: A review. *Energy*, 46(1), 431–441. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.08.006>
- Osman, A. I., Hefny, M., Abdel Maksoud, M. I. A., Elgarahy, A. M., & Rooney, D. W. (2021). Recent advances in carbon capture storage and utilisation technologies: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 19, Issue 2, pp. 797–849). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01133-3>
- Rahmadania, N. (2022). View of Pemanasan Global Penyebab Efek Rumah Kaca dan Penanggulangannya. *Ilmuteknik.Org*, 2(3).
- Rezazadeh, H., Kordjamshidi, M., Ahmadi, F., & Eskandarinejad, A. (2021). Use of double-glazed window as a photobioreactor for CO₂ removal from air. *Environmental Engineering Research*, 26(2). <https://doi.org/10.4491/eer.2020.122>
- Rubin, E. S., Mantripragada, H., Marks, A., Versteeg, P., & Kitchin, J. (2012). The outlook for improved carbon capture technology. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 38, Issue 5, pp. 630–671). <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2012.03.003>
- Suciati, F., & Aviantara, D. B. (2019). GREEN TECHNOLOGY UNTUK GREEN COMPANY DENGAN PENERAPAN SISTEM FOTOBIOREAKTOR PENYERAP KARBON DIOKSIDA. *Green Technology Untuk.... JRL*, 12(1), 15–40.
- Wahyuni, H., & Suranto, S. (2021). Dampak Deforestasi Hutan Skala Besar terhadap Pemanasan Global di Indonesia. *JHIP: Jurnal Ilmiah Ilmu Pemerintahan*, 6(1), 148–162. <https://doi.org/10.14710/jiip.v6i1.10083>
- Wu, C., Huang, Q., Xu, Z., Sipra, A. T., Gao, N., Vandenberghe, L. P. de S., Vieira, S., Soccol, C. R., Zhao, R., Deng, S., Boetcher, S. K. S., Lu, S., Shi, H., Zhao, D., Xing, Y., Chen, Y., Zhu, J., Feng, D., Zhang, Y., ... Zhou, H. (2023). A comprehensive review of carbon capture science and technologies. *Carbon Capture Science & Technology*, 100178. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100178>
- Yang, H., Xu, Z., Fan, M., Gupta, R., Slimane, R. B., Bland, A. E., & Wright, I. (2008). Progress in carbon dioxide separation and capture: A review. *Journal of Environmental Sciences*, 20, 14–27.