

JRL	Vol.14	No.2	Hal. 91 - 100	Jakarta, Desember 2021	p-ISSN : 2085.38616 e-ISSN : 2580-0442
-----	--------	------	---------------	---------------------------	---

TEKNOLOGI PENANGKAPAN KARBON DENGAN MIKROALGA: PELUANG DAN TANTANGAN DALAM MITIGASI PERUBAHAN IKLIM

Joko Prayitno, Rahmania Admirasari, Teddy W. Sudinda, Widiatmini Sih Winanti
Pusat Teknologi Lingkungan, OR PPT Badan Riset dan Inovasi Nasional, Gedung 820
Geostech, Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan, Banten
Email : Joko016@brin.go.id

Abstrak

Teknologi penangkapan karbon dengan mikroalga (CCS Mikroalga) merupakan salah satu teknologi mitigasi yang memiliki potensi digunakan dalam upaya penurunan emisi GRK. Teknologi CCS mikroalga bekerja dengan cara menangkap karbon yang dihasilkan dari suatu proses industri kemudian disimpan dan dimanfaatkan untuk proses produksi lain. Teknologi CCS mikroalga terdiri dari dua jenis yaitu fotobioreaktor dan kolam terbuka (*open pond*). Tulisan ini membahas sejauh mana kontribusi teknologi CCS menggunakan mikroalga dalam upaya penurunan emisi karbon, prospek aplikasinya di masa depan dan kendala dalam aplikasinya. Dalam tulisan ini dijelaskan tentang konsep dan jenis-jenis teknologi CCS menggunakan mikroalga, potensi serapan karbon dari masing-masing teknologi, dan kendala dalam aplikasinya, dan beberapa alternatif untuk meningkatkan peran teknologi ini pada tataran nasional.

kata kunci : penangkapan karbon, mikroalga, fotobioreaktor, kolam kultur, serapan CO₂.

CARBON CAPTURE TECHNOLOGY USING MICROALGAE: CURRENT OPPORTUNITY AND CHALLENGES FOR CLIMATE CHANGE MITIGATION

Abstract

Carbon capture technology with microalgae (CCS Mikroalga) is one of the mitigation technologies that has the potential to be used in efforts to reduce GHG emissions. Microalgae CCS technology works by capturing carbon produced from an industrial process and then stored and utilized for other production processes. Microalgae CCS technology consists of two types, namely photobioreactors and open ponds. This paper discusses the contribution of CCS technology using microalgae in an effort to reduce carbon emissions, the prospects for its application in the future and the obstacles in its application. This paper describes the concepts and types of CCS technology using microalgae, the potential for carbon sequestration of each technology, and the constraints in its application, and several alternatives to increase the role of this technology at the national level.

keywords : carbon capture, microalgae, photobioreactor, open pond, CO₂ sequestration

I. PENDAHULUAN

Perubahan iklim akibat peningkatan emisi gas rumah kaca (GRK) dari aktivitas manusia menjadi masalah global saat ini. Total emisi GRK pada tahun 2018 tercatat sebesar 55.3 GtCO₂e (Edo et al., 2019). Dampak perubahan iklim yang dirasakan di berbagai wilayah dunia diantaranya peningkatan kejadian bencana hidrometeorologi akibat peningkatan cuaca yang ekstrem, seperti peningkatan frekuensi dan durasi kekeringan, banjir dan tanah longsor di beberapa wilayah dunia, dan peningkatan suhu dan muka air laut (Nerem et al., 2018; Wobus et al., 2017; Zhao et al., 2020). Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki tingkat kerentanan yang tinggi terhadap dampak perubahan iklim. Sejak ratifikasi Protokol Kyoto tahun 1997, Indonesia berupaya mengurangi emisi GRK nasional khususnya di sektor-sektor penyumbang emisi terbesar yaitu kehutanan, energi, transportasi, industri dan limbah.

Komitmen Indonesia dalam penurunan emisi GRK nasional diperkuat melalui Undang-Undang Nomor 16 Tahun 2016, dan dalam dokumen Nationally Determined Contribution (NDC) yang dilaporkan ke UNFCCC. Komitmen tersebut berupa target penurunan emisi karbon sebesar 29% pada tahun 2030 berdasarkan skenario *business as usual* atau 41% dengan bantuan internasional. Untuk mencapai target yang telah ditetapkan tersebut, selain diperlukan perangkat hukum, ekonomi dan kelembagaan, juga dibutuhkan teknologi mitigasi yang sesuai dengan kondisi di Indonesia.

Teknologi mitigasi yang memiliki potensi digunakan dalam upaya penurunan emisi GRK diantaranya adalah teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS, *carbon capture and storage*). Berbeda dengan teknologi mitigasi lain seperti teknologi rendah karbon yang dimulai dari pemilihan bahan baku atau sumber energi untuk menekan jumlah karbon yang dikonsumsi dan yang dikeluarkan, teknologi CCS bekerja di hilir

dengan cara menangkap karbon yang dihasilkan dari suatu proses industri kemudian disimpan dan dimanfaatkan untuk proses produksi lain. Teknologi CCS yang mulai banyak dilirik adalah teknologi CCS secara biologis menggunakan mikroalga. Teknologi CCS dengan mikroalga terdiri dari dua jenis yaitu fotobioreaktor dan kolam terbuka (*open pond*). Manfaat dan peluang teknologi tersebut dalam menurunkan konsentrasi gas CO₂ dari udara telah diulas dalam beberapa literatur (Adamczyk et al., 2016; Gaber et al., 2021; Mohler et al., 2019; Valdovinos-García et al., 2020), namun ulasan terkait peluang teknologi ini di Indonesia masih langka.

Pemilihan teknologi CCS menggunakan mikroalga berpengaruh terhadap hasil biomassa yang diperoleh sehingga akan mempengaruhi jumlah karbon yang difiksasi. Selain itu, terdapat pula perbedaan dalam hal kebutuhan energi, nutrien, air dan material bangunan, yang pada akhirnya akan berpengaruh terhadap jumlah karbon yang digunakan/diemisikan.

Tulisan ini bertujuan untuk membahas sejauh mana kontribusi teknologi CCS yang menggunakan mikroalga dalam upaya penurunan emisi karbon, prospek aplikasinya di masa depan dan kendala dalam aplikasinya. Dalam tulisan ini dijelaskan terlebih dahulu tentang konsep dan jenis-jenis teknologi CCS menggunakan mikroalga, potensi serapan karbon dari masing-masing teknologi, dan kendala dalam aplikasinya, dan beberapa alternatif untuk meningkatkan peran teknologi ini pada tataran nasional.

II. KONSEP TEKNOLOGI PENANGKAPAN KARBON DENGAN MIKROALGA

Mikroalga memiliki kemampuan menyerap gas CO₂ sebagai bahan baku proses fotosintesis dan mengubahnya menjadi biomassa. Kemampuan ini menjadi salah satu daya tarik mikroalga untuk digunakan sebagai penangkap karbon dalam skala besar, khususnya yang diemisikan dari cerobong industri. Proses

penangkapan karbon oleh mikroalga melalui proses fotosintesis berlangsung di dalam organel sel mikroalga yang disebut dengan kloroplas, dimana gas CO₂ dikonversi menjadi senyawa-senyawa organik sederhana melalui serangkaian reaksi biokimia yang kompleks (Daneshvar et al., 2022). Di dalam sel mikroalga, senyawa-senyawa organik tersebut kemudian digunakan sebagai bahan baku sintesis senyawa-senyawa lainnya termasuk lipid. Secara sederhana reaksi fotosintesis tersebut dapat dijelaskan dengan rumus sebagai berikut.



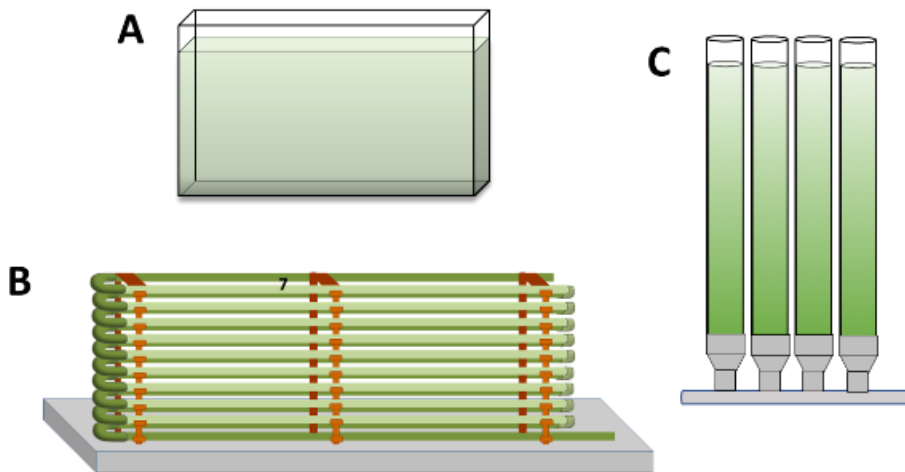
Secara alami, proses penangkapan CO₂ di udara oleh mikroalga dan selanjutnya dikonversi menjadi biomassa dan lipid telah berlangsung selama jutaan tahun. Biomassa dari mikroalga yang mati dan mengendap di dasar perairan kemudian mengalami proses geologis dan diyakini menjadi salah satu sumber terbentuknya minyak bumi (Eneh, 2011). Dengan kata lain, CO₂ yang difiksasi oleh mikroalga selama jutaan tahun disimpan salah satunya dalam bentuk minyak bumi.

Beberapa kelebihan mikroalga dibandingkan dengan tanaman untuk penangkapan karbon telah dibahas dalam banyak literatur, diantaranya laju pertumbuhan dan produksi biomassa yang lebih besar, serta tidak berkompetisi dengan tanaman budidaya karena tidak membutuhkan lahan yang subur (Klinthong et al., 2015; Kumar et al., 2018; Singh and Dhar, 2019). Biomassa mikroalga yang dihasilkan juga dapat dimanfaatkan sebagai sumber bahan baku biofuel, pakan dan produksi senyawa-senyawa bernilai ekonomis lainnya.

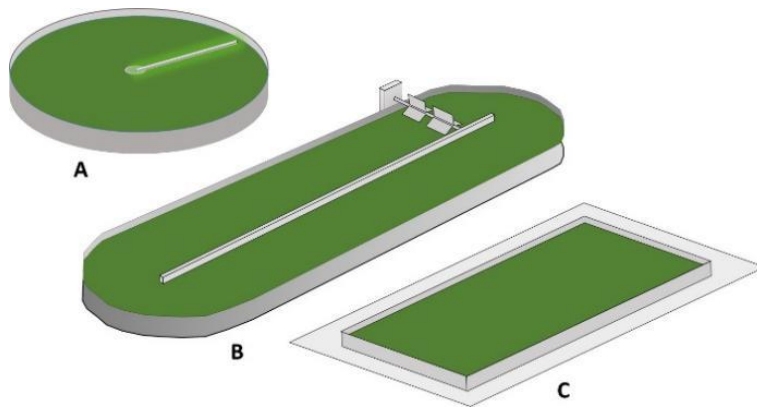
Penangkapan karbon oleh mikroalga dalam skala besar dilakukan secara khusus dalam sistem tertutup yaitu fotobioreaktor (FBR), ataupun dalam sistem terbuka yaitu kolam kultur (*open pond culture*). Beberapa jenis teknologi FBR diantaranya adalah flat panel, FBR kolom horizontal dan FBR kolom vertikal

(Gambar 1), yang dilengkapi dengan sistem pemberian nutrisi, sistem injeksi gas CO₂, dan sistem sirkulasi media. Sedangkan jenis teknologi kolam terbuka diantaranya berupa kolam lingkaran, *raceway pond*, atau kolam persegi (Gambar 2) yang juga memiliki sistem pemberian nutrisi, sistem pengaduk dan sistem injeksi gas CO₂ seperti halnya teknologi FBR. Kedua teknologi ini memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, sehingga pemilihan jenis teknologi ini untuk penangkapan karbon tergantung dari kebutuhan dan sumberdaya yang tersedia. Keunggulan dan kendala dari kedua teknologi tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Dalam sistem FBR, CO₂ yang dialirkan ke dalam sistem memiliki waktu kontak dengan mikroalga yang lebih lama di dalam air sesuai dengan disain fotobioreaktornya, sedangkan dalam sistem kolam kultur waktu kontak lebih singkat karena ketinggian permukaan air hanya sekitar 30-40 cm. Sistem FBR yang tertutup mengurangi peluang mikroalga yang dikulturkan terkontaminasi dengan organisme lain yang dapat mengganggu pertumbuhan mikroalga tersebut. Selain itu, dalam sistem yang tertutup kondisi kultur dapat lebih mudah diatur sesuai dengan kebutuhan mikroalga. Sebaliknya, karena sistem kolam kultur yang terbuka maka peluang mikroalga terkontaminasi dengan organisme lain seperti parasit, protozoa, mikroalga jenis lain, larva serangga, hewan amfibi dan lainnya lebih tinggi. Karena hal tersebut, ditambah dengan faktor-faktor lain seperti difusi CO₂ yang lebih cepat ke udara dari dalam media kultur, tingkat serapan cahaya dan transfer massa (akibat sistem pengadukan kurang efisien) yang lebih rendah, maka produktivitas mikroalga dengan menggunakan kolam kultur menjadi lebih rendah dibandingkan dengan FBR. Namun demikian biaya investasi dan operasional FBR lebih mahal dibandingkan kolam kultur karena konstruksi dan sistem FBR yang lebih kompleks.



Gambar 1. Jenis-jenis teknologi FBR. (A) *flat panel*, (B) kolom horizontal, dan (C) kolom vertikal.



Gambar 2. Teknologi kolam kultur. (A) kolam lingkaran, (B) raceway pond, (C) kolam persegi

Tabel 1. Keunggulan Dan Kendala Teknologi Penangkapan Karbon Dengan Fotobioreaktor (FBR) Dan Kolam Kultur Mikroalga.

Karakteristik	Jenis Teknologi				
	FBR panel	FBR vertikal	FBR horizontal	Raceway pond	Kolam tradisional
Produktivitas biomassa	tinggi	tinggi	tinggi	sedang	rendah
Kemudahan operasional	sedang	rendah	rendah	tinggi	tinggi
Kemudahan pemeliharaan	rendah	rendah	rendah	sedang	tinggi
Konsumsi energi	tinggi	tinggi	tinggi	sedang	rendah
Kontrol kondisi lingkungan kultur	ya	ya	ya	tidak	tidak
Biaya investasi	tinggi	tinggi	tinggi	sedang	rendah
Biaya operasional	tinggi	tinggi	tinggi	sedang	rendah
Kebutuhan lahan	rendah	rendah	rendah	tinggi	tinggi

III. PENANGKAPAN KARBON OLEH MIKROALGA

Kemampuan fiksasi CO₂ oleh mikroalga dalam FBR atau kolam kultur secara umum diukur berdasarkan efisiensi serapan CO₂ dan tingkat produksi biomassa mikroalga dalam FBR atau kolam kultur. Efisiensi serapan CO₂ oleh mikroalga dalam FBR atau kolam kultur dapat ditentukan berdasarkan perbedaan antara CO₂ yang masuk ke dalam sistem FBR atau kolam kultur dengan CO₂ yang keluar dari sistem, yang dinyatakan dengan rumus :

$$E = \frac{CO_{2in} - CO_{2out}}{CO_{2in}}$$

Dimana :

E = Efisiensi serapan (%)

CO_{2in} = CO₂ yang masuk ke sistem FBR/kolam

CO_{2out} = CO₂ yang keluar dari sistem FBR/kolam

Efisiensi serapan CO₂ dalam sistem FBR ataupun kolam kultur dipengaruhi oleh jenis mikroalga yang digunakan, disain FBR/kolam kultur dan kondisi operasi. Efisiensi serapan CO₂ dari mikroalga *Tetraselmis* sp. dengan

menggunakan teknologi FBR skala 100.000 liter dapat mencapai 80% (Pereira et al., 2018). Demikian pula efisiensi serapan CO₂ oleh mikroalga *Scenedesmus* sp. dalam kolam kultur dapat mencapai hingga 94% menggunakan sumber CO₂ dari cerobong industri (de Godos et al., 2014).

Jumlah CO₂ yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1 ton biomassa mikroalga adalah 1,83 ton (Pereira et al., 2018; Putt et al., 2011), sedangkan kandungan C dalam biomassa mikroalga adalah 49% (Pereira et al., 2018). Produktivitas biomassa maksimum dari sistem FBR dan kolam kultur dapat dilihat pada Tabel 2. Berdasarkan jumlah CO₂ yang dibutuhkan untuk menghasilkan biomassa mikroalga dan nilai produktivitas biomassa mikroalga, maka dapat dihitung potensi karbon yang diserap oleh mikroalga dalam sistem FBR/kolam kultur dengan rumus sebagai berikut:

$$T_{CO_2} = \mu_L \times 365 \times 1,83 \times V / 1000$$

Dimana :

T_{CO2} = total fiksasi CO₂ (ton/m³/tahun)

μ_L = produktivitas biomassa (g berat kering/L/hari)

V = kapasitas FBR (m³)

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa serapan karbon dengan menggunakan FBR lebih

tinggi dibandingkan dengan serapan karbon dengan menggunakan kolam kultur. Teknologi penangkapan karbon dengan fotobioreaktor mikroalga hingga saat ini telah diaplikasikan pada skala hingga 100 m³

dengan jumlah karbon yang diserap mencapai 111,7 kg CO₂/m³/tahun (Pereira et al., 2018).

Tabel 2. Efisiensi Serapan Beberapa Jenis Mikroalga

Species	Sistem	Kapasitas (Liter) [*] (m ²) ^{**}	Efisiensi serapan CO ₂ (%)	Produksi Biomass (g/L)	Produktivitas biomass maksimum (g/L/hari) [*] (g/m ² /hari)	Jumlah karbon yang diserap (kg/m ³ /tahun) (kg/m ² /tahun) ^{**}	Referensi
<i>Chlorella sp.</i>	FBR	1,5 L	--	4,0	0,94	617,6	(Adamczyk et al. 2016)
<i>Nanochloropsis gaditana</i>	FBR	1,5 L	--	4,0	0,84	551,9	(Doucha et al., 2005)
<i>Spirulina sp.</i>	FBR	3.850 L	--	--	0,025	16,4	(Torzillo et al., 1986)
<i>Scenedesmus sp.</i>	Kolam kultur	100 m ² (20.000 L)	98	--	17	11,2 ^{**}	(de Godos et al., 2014)
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	FBR	4,27	64,3	1,55-4,79	0,44	289,1	(Arroyo et al., 2019)
	FBR	100.000	60-75	0,8	0,17 (37,2)	111,7	(Pereira et al., 2018)

Keterangan : *) berdasarkan volume kultur
**) berdasarkan luas area kultur

Tingkat serapan CO₂ oleh mikroalga juga dapat diperkirakan dari kandungan senyawa karbon dalam sel (Yun et al., 1997) berdasarkan rumus sebagai berikut :

$$R_{CO_2} = C_c \times \mu_L \times \left(\frac{M_{CO_2}}{M_C} \right)$$

Dimana :

R_{CO_2} = laju fiksasi CO₂ (g CO₂/m³/jam)

C_c = kandungan karbon (%)

μ_L = laju pertumbuhan sel (g berat kering/m³/jam)

M_{CO_2} = Berat molekul CO₂

M_C = berat molekul C

Bila ditinjau dari emisi GRK, teknologi FBR panel lebih sedikit mengemisikan karbon dibandingkan dengan kolam terbuka

ataupun FBR tabung dengan menggunakan mikroalga jenis *Nannochloropsis gaditana*, karena kebutuhan energi yang lebih rendah (Dufour et al., 2010). Sedangkan dalam produksi biodiesel dari *Scenedesmus dimorphus*, FBR panel mengemisikan karbon tidak jauh berbeda dengan kolam terbuka.

IV. NILAI EMISI TEKNOLOGI PENANGKAPAN KARBON DENGAN MIKROALGA

Jumlah karbon yang diserap oleh mikroalga seperti yang dibahas di atas merupakan satu parameter penting untuk mengukur efektivitas teknologi ini. Namun demikian, parameter lain yang lebih diperhitungkan adalah nilai emisi (CO₂-equivalent emission value) dari teknologi

yang digunakan. Nilai emisi merupakan selisih antara karbon yang dikeluarkan atau dihasilkan dengan jumlah karbon yang ditangkap atau disimpan dari keseluruhan proses produksi menggunakan teknologi yang dimaksud. Nilai emisi dari teknologi FBR atau kolam kultur dihitung dengan menggunakan *life cycle analysis* (LCA), mulai dari proses awal input bahan baku, hingga diperoleh produk. Metode LCA digunakan pula untuk melihat pengaruh dari aplikasi teknologi CCS dengan mikroalga terhadap lingkungan dan keberlanjutan dari teknologi ini di masa mendatang khususnya terkait emisi karbon.

Metode LCA dipandang sebagai metode perhitungan yang cukup lengkap, detil dan transparan. Metode ini telah juga banyak dipakai untuk menganalisis keunggulan dan kelemahan teknologi produksi biomassa mikroalga sebelum aplikasi skala besar di lapang (Gaber et al., 2021; Valdovinos-García et al., 2020).

Proses penangkapan karbon dari mikroalga dan konversinya menjadi produk-produk seperti biofuel, baik dengan menggunakan teknik kolam terbuka maupun FBR tabung dan panel, telah banyak dipublikasi dalam dua dekade terakhir. Perbedaan hasil perhitungan LCA dari teknologi yang digunakan lebih disebabkan bernilai positif (*net emitter*), meskipun emisi karbon dari kolam terbuka lebih kecil dibandingkan dengan yang dari FBR. Hasil perhitungan Gaber et al (2021) menunjukkan bahwa komponen terbesar penyumbang emisi di FBR adalah listrik (40 dan 45%), infrastruktur (32 dan 24%) dan nutrisi (10%).

Hal yang perlu mendapat perhatian dalam perhitungan LCA adalah lingkup penghitungan dan sumber bahan-bahan yang dijadikan perhitungan. Dalam kasus FBR, Gaber et al (2021) menunjukkan bahwa penggunaan listrik yang berasal dari grid energi terbarukan dapat menurunkan nilai emisi karbon dari 20,24 dan 17,93 kg CO₂e/kg biodiesel menjadi 11,44 dan 9,33 kg CO₂e/kg biodiesel, dan persentase kontribusi listrik turun dari 40 dan 45% menjadi 4%.

Hasil studi Gaber et al. (2021) juga

karena perbedaan disain. Perbedaan disain tersebut mempengaruhi perhitungan LCA yang diperoleh, karena perbedaan dalam produksi biomassa, kebutuhan energi, air, dan nutrisi, dan material bangunan. Hal lain yang mempengaruhi hasil perhitungan adalah perbedaan jenis mikroalga yang digunakan.

Informasi terkait LCA dari aplikasi teknologi kolam kultur dan FBR mikroalga telah banyak tersedia, khususnya dalam menghitung emisi CO₂ dari kegiatan produksi biodiesel (Gaber et al., 2021; Uctug et al., 2017; Valdovinos-García et al., 2020). Salah satu parameter yang diukur dalam LCA tersebut adalah *global warming potential* (GWP) yang dinyatakan dalam kg CO₂e per kg lipid atau pun per kg biodiesel. Beberapa hasil studi LCA tersebut dibahas sebagai berikut.

Emisi karbon dari produksi biodiesel dengan menggunakan teknologi kolam terbuka adalah 2,19 kg CO₂e/kg biodiesel (Uctug et al., 2017). Sedangkan emisi karbon dari produksi biodiesel dengan menggunakan teknologi FBR panel di dua lokasi berbeda (Tuscany dan Sicily) adalah sebesar 17,93 dan 20,24 kg CO₂e/kg biodiesel (Gaber et al., 2021). Hasil dari LCA tersebut menunjukkan bahwa emisi karbon yang dihasilkan dari kegiatan produksi biodiesel baik di kolam terbuka maupun FBR menunjukkan bahwa optimasi pertumbuhan yang mengakibatkan peningkatan produktivitas biomassa, menyebabkan penurunan GWP sebesar 15%. Daur ulang nutrisi dapat menjadi alternatif untuk menurunkan kontribusi nutrisi terhadap emisi karbon, namun efeknya terhadap produktivitas biomassa masih perlu dikaji lebih jauh.

Pendekatan lain dalam menghitung nilai emisi dari teknologi CCS dengan mikroalga adalah dengan menghitung nilai *carbon footprint*-nya. Studi lain menunjukkan bahwa nilai *carbon footprint* biomassa mikroalga yang dikultur dalam FBR adalah sebesar 68,34 kg CO₂e/kg berat kering, dengan kontributor terbesar adalah penggunaan listrik (53%) dan nutrisi (14%) (Mata et al., 2018). Hasil tersebut konsisten dengan perhitungan LCA seperti yang dibahas

sebelumnya.

V. PELUANG TEKNOLOGI CCS MIKROALGA

Teknologi CCS mikroalga mendapat banyak perhatian karena produk biomassa yang diperoleh dapat diproses lebih lanjut untuk berbagai macam pemanfaatan. Teknologi kolam kultur dan FBR telah banyak diaplikasikan dalam menghasilkan produk-produk suplemen pangan dan pakan (Molino et al., 2018; Neves et al., 2021; Zanella and Vianello, 2020), kosmetik dan bahan baku obat (Ricchio dan Lauritano, 2020). Berdasarkan hasil studi tekno-ekonomi dari keseluruhan proses produksi biomassa (tanpa proses lanjut), diketahui bahwa biaya produksi per unit biomassa di area seluas 100 ha adalah Euro 3,4/kg berat kering (Ruiz et al., 2016). Berdasarkan hasil studi tersebut, pemanfaatan biomassa untuk produk bernilai tinggi seperti pigmen akan menguntungkan, sedangkan pemanfaatan untuk komoditas pangan dan kimia perlu penurunan biaya operasi supaya bisa bersaing. Dengan demikian, dari sisi tekno-ekonomi, aplikasi teknologi CCS mikroalga harus dipadukan dengan pemanfaatan biomassa menjadi produk bernilai tinggi, disamping perlu pengembangan lebih lanjut agar biaya produksi dapat diturunkan.

Dalam konteks penangkapan karbon untuk mitigasi perubahan iklim, aplikasi teknologi CCS mikroalga juga perlu pengembangan lebih lanjut agar diperoleh emisi negatif dari keseluruhan proses. Kendala utama yang dihadapi adalah tingginya kebutuhan energi dalam pengoperasian teknologi tersebut, khususnya dari penggunaan listrik untuk pompa, dan kebutuhan nutrisi. Untuk 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

diperlukan waktu agar skenario ini dapat berjalan. Upaya lain yang dapat dilakukan untuk menurunkan nilai emisi adalah dengan menggunakan air limbah organik sebagai media tumbuh dan daur ulang media berisi nutrisi. Selain itu produksi biomassa perlu ditingkatkan, misalnya dari 20% ke 60% dapat mengurangi emisi GRK per kg biomassa yang dihasilkan. Peningkatan produktivitas biomassa diantaranya melalui pemilihan jenis mikroalga yang tepat dan desain teknologi yang cocok untuk jenis mikroalga yang terpilih.

VI. KESIMPULAN

Teknologi kultivasi mikroalga dengan sistem kolam terbuka maupun FBR telah banyak dikaji dan dikembangkan hingga pada tingkat komersialisasi. Terkait dengan emisi GRK, hasil studi LCA dan Carbon footprint menunjukkan bahwa teknologi ini masih bersifat positif emisi, sehingga teknologi ini belum dapat digunakan untuk semata-mata untuk tujuan penangkapan karbon dalam waktu dekat. Aplikasi teknologi ini untuk penangkapan karbon masih memerlukan pengembangan lebih lanjut, baik dalam hal desain, bahan baku maupun proses produksi. Selain itu peningkatan efisiensi pada *upstream process* seperti seleksi jenis mikroalga yang tepat, optimasi pasokan nutrisi dan sumber nutrisi alternatif yang lebih murah dan ramah lingkungan (misalnya memanfaatkan air limbah organik), optimasi kondisi operasi kultur (intensitas cahaya, pH dan pengadukan), menggunakan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan (*renewable energy*); maupun *down stream process* seperti teknik pemanenan dan pemanfaatan biomassa masih perlu dilakukan. Aplikasi teknologi ini lebih memungkinkan bila ditujukan untuk menghasilkan produksi senyawa yang memiliki nilai ekonomi tinggi, sedangkan penangkapan karbon menjadi bagian tambahan dari kegiatan produksi tersebut.

Meskipun teknologi ini belum memungkinkan untuk diterapkan pada

masa sekarang, namun peluang pemanfaatan teknologi ini untuk tujuan penangkapan karbon masih terbuka di masa mendatang, seiring dengan berkembangnya teknologi lain yang ramah lingkungan. Letak Indonesia di daerah tropis dengan sinar matahari yang tersedia sepanjang tahun dan biodiversitas mikroalga yang berlimpah merupakan nilai tambah untuk pengembangan teknologi ini di Indonesia. Karena itu, Indonesia diharapkan dapat menjadi pemain aktif dalam pengembangan teknologi ini dan tidak hanya menjadi pasar bagi teknologi sejenis yang dikembangkan di luar negeri.

DAFTAR PUSTAKA

- Adamczyk, M., Lasek, J., Skawińska, A., 2016. CO₂ Biofixation and growth kinetics of *Chlorella vulgaris* and *Nannochloropsis gaditana*. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 179, 1248–1261. <https://doi.org/10.1007/s12010-016-2062-3>
- Arroyo, C.A., Contreras, J.L., Zeifert, B., Ramírez, C.C., 2019. CO₂ capture of the gas emission, using a catalytic converter and airlift bioreactors with the microalga *Scenedesmus dimorphus*. *Appl. Sci.* 9. <https://doi.org/10.3390/app9163212>
- Daneshvar, E., Wicker, R.J., Show, P.L., Bhatnagar, A., 2022. Biologically-mediated carbon capture and utilization by microalgae towards sustainable CO₂ biofixation and biomass valorization – A review. *Chem. Eng. J.* 427, 130884. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130884>
- de Godos, I., Mendoza, J.L., Acien, F.G., Molina, E., Banks, C.J., Heaven, S., Rogalla, F., 2014. Evaluation of carbon dioxide mass transfer in raceway reactors for microalgae culture using flue gases. *Bioresour. Technol.* 153, 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.087>
- Doucha, J., Straka, F., Lívanský, K., 2005. Utilization of flue gas for cultivation of microalgae (*Chlorella* sp.) in an outdoor open thin-layer photobioreactor. *J. Appl. Phycol.* 17, 403–412. <https://doi.org/10.1007/s10811-005-8701-7>
- Edo, A., Hertwich, E., Heeren, N., 2019. Emissions Gap Report 2019, United Nations Environment Programme.
- Eneh, O. C. (2011). A review on petroleum: source, uses, processing, products, and the environment. *Journal of Applied Sciences*, 11(12), 2084-2091.
- Gaber, K., Rösch, C., Biondi, N., 2021. Life Cycle Assessment of Total Fatty Acid (TFA) production from microalgae *Nannochloropsis oceanica* at different sites and under different sustainability scenarios. *Bioenergy Res.* <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10279-z>
- Klinthong, W., Yang, Y., Huang, C., Tan, C., 2015. A Review : Microalgae and their applications in CO₂ capture and renewable energy. *Aerosol Air Qual. Res.* 15, 712–742. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2014.11.0299>
- Kumar, M., Enamala, S., Chavali, M., Donepudi, J., 2018. Production of biofuels from microalgae - A review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 94, 49–68. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.012>
- Mata, T.M., Cameira, M., Costa, L., 2018. Assessing the feasibility of using the carbon footprint of microalgae production in photobioreactor. *Energy Procedia* 153, 432–437. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.039>
- Mohler, D.T., Wilson, M.H., Fan, Z., Groppo, J.G., Crocker, M., 2019. Beneficial reuse of industrial CO₂ emissions using a microalgae photobioreactor: Waste heat utilization assessment. *Energies* 12, 18–21. <https://doi.org/10.3390/en12132634>
- Molino, A., Iovine, A., Casella, P., Mehariya, S., Chianese, S., Cerbone, A. &

- Musmarra, D. (2018). Microalgae characterization for consolidated and new application in human food, animal feed and nutraceuticals. *International Journal of Environmental Research And Public Health*, 15(11), 2436.
- Nerem, R.S., Beckley, B.D., Fasullo, J.T., Hamlington, B.D., Masters, D., Mitchum, G.T., 2018. Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 115, 2022–2025. <https://doi.org/10.1073/pnas.1717312115>.
- Neves, M., Ferreira, A., Antunes, M., Laranjeira Silva, J., Mendes, S., Gil, M. M., & Tecelão, C. (2021). *Nannochloropsis oceanica* as a sustainable source of n-3 polyunsaturated fatty acids for enrichment of hen eggs. *Applied Sciences*, 11(18), 8747.
- Pereira, H., Páramo, J., Silva, J., Marques, A., Barros, A., Maurício, D., Santos, T., Schulze, P., Barros, R., Gouveia, L., Barreira, L., Varela, J., 2018. Scale-up and large-scale production of *Tetraselmis* sp. CTP4 (Chlorophyta) for CO₂ mitigation: From an agar plate to 100-m³ industrial photobioreactors. *Sci. Rep.* 8, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23340-3>
- Putt, R., Singh, M., Chinnasamy, S., Das, K.C., 2011. An efficient system for carbonation of high-rate algae pond water to enhance CO₂ mass transfer. *Bioresour. Technol.* 102. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.029>.
- Riccio, G., Lauritano, C., 2020. Microalgae with immunomodulatory activities. *Mar. Drugs* 18. <https://doi.org/10.3390/md18010002>.
- Ruiz, J., Olivieri, G., De Vree, J., Bosma, R., Willems, P., Reith, J. H., Eppink, MHM., Kleinegris, DMM., Wijffels, RH. & Barbosa, M. J. (2016). Towards industrial products from microalgae. *Energy & Environmental Science*, 9(10), 3036-3043.
- Singh, J., Dhar, D.W., 2019. Overview of Carbon Capture Technology: Microalgal Biorefinery Concept and State-of-the-Art 6, 1–9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00029>
- Torzillo, G., Pushparaj, B., Bocci, F., Balloni, W., Materassi, R., Florenzano, G., 1986. Production of *Spirulina* biomass in closed photobioreactors. *Biomass* 11, 61–74. [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(86\)90021-1](https://doi.org/10.1016/0144-4565(86)90021-1)
- Uctug, G., Modi, D.N., Mavituna, F., 2017. life cycle assessment of biodiesel production from microalgae: a mass and energy balance approach in order to compare conventional with *in situ* transesterification. 8. <https://doi.org/10.18178/ijcea.2017.8.6.683>
- Valdovinos-García, E.M., Juan Barajas-Fernández, María de los Ángeles Olán-Acosta, Moisés Abraham Petriz-Prieto, Adriana Guzmán-López, Micael Gerardo Bravo-Sánchez, 2020. Techno-economic study of CO₂ capture of a thermoelectric plant using microalgae *Chlorella*. *Energies* 13, 1–19.
- Wobus, C., Gutmann, E., Jones, R., Rissing, M., Mizukami, N., Lorie, M., Mahoney, H., Wood, A.W., Mills, D., Martinich, J., 2017. Climate change impacts on flood risk and asset damages within mapped 100-year floodplains of the contiguous United States. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 17, 2199–2211. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/nhess-17-2199-2017>.
- Zanella, L., & Vianello, F. (2020). Microalgae of the genus *Nannochloropsis*: Chemical composition and functional implications for human nutrition. *Journal of Functional Foods*, 68, 103919.
- Zhao, Y., Weng, Z., Chen, H., 2020. Analysis of the Evolution of Drought, Flood, and Drought-Flood Abrupt Alternation Events under Climate Change Using the Daily SWAP Index. *Water* 12. doi.org/10.3390/w12071969.