

CityCapt: Inovasi Teknologi Carbon Capture Direct Air and Biological Capture Guna Mendukung Pencapaian SDGs 2030

Rahma Khusniawati*, Muhammad S. Al Ghifari, Wafi M. Malik, dan Yasa P. Umar

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Brawijaya

Email Korespondensi : rahmakhusniaa@gmail.com

Kata Kunci:

biological capture, carbon capture utilization and storage, direct air capture, emisi gas rumah kaca, perubahan iklim

ABSTRAK

Beberapa opsi mitigasi, Teknologi *Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS)* diperkirakan memiliki potensi keberlanjutan guna mengurangi emisi CO₂. Berbagai macam teknologi CCUS yang telah berkembang di antaranya adalah DAC (*Direct Air Capture*) dan BC (*Biological Capture*). Namun, teknologi eksisting tersebut memiliki kekurangan di antaranya efisiensi teknologi yang tidak sejalan dengan rancangan awal dan harga untuk teknologinya terbilang mahal. *CityCapt* merupakan inovasi dari teknologi DAC yang diintegrasikan dengan BC untuk penyerapan CO₂ pada ruang terbuka seperti balai kota, taman, dan tempat umum lainnya. Teknologi ini dioperasikan dengan bahan bakar yang berasal dari panel surya dengan prinsip penangkapan CO₂ dari udara ambien, kemudian disalurkan ke wadah mikroalga untuk pengolahan secara biologis. CO₂ yang masuk dalam wadah mikroalga akan menjadi sumber energi untuk mikroalga yang kemudian mikroalga tersebut dapat dipanen untuk dimanfaatkan menjadi biomassa sehingga dapat mengoptimalkan teknologi dan menekan biaya operasional. Dengan adanya teknologi ini, CO₂ yang dihasilkan dari kegiatan perkotaan dapat ditangkap, dikelola dan dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan.

Keyword:

biological capture, carbon utilization and storage, carbon capture and storage, direct air capture, greenhouse gas emission, climate change

ABSTRACT

Several mitigation options, Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) technology is estimated to have sustainable potential to reduce CO₂ emissions. Various CCUS technologies that have been developed include DAC (Direct Air Capture) and BC (Biological Capture). However, these existing technologies have shortcomings including technological efficiency that is not in line with the initial design and the price for the technology is quite expensive. CityCapt is an innovation of DAC technology integrated with BC for CO₂ absorption in open spaces such as city halls, parks and other public places. This technology is operated with fuel from solar panels with the principle of capturing CO₂ from ambient air, then channeled to microalgae containers for biological processing. CO₂ that enters the microalgae container will become a source of energy for microalgae which can then be harvested to be used as biomass so as to optimize technology and reduce operational costs. With this technology, CO₂ generated from urban activities can be captured, managed and utilized as a renewable energy source.

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim disebabkan oleh emisi gas rumah kaca (GRK) dari aktivitas manusia, berdampak pada kerugian dan kerusakan yang sangat luas, masyarakat dan alam terpapar pada risiko besar yang tidak dapat ditoleransi dan tidak dapat dipulihkan (IPCC, 2022). Saat ini aksi iklim yang ada masih jauh dari target untuk membatasi kenaikan suhu di bawah

1,5°C atau bahkan 2°C yang merupakan tujuan Perjanjian Paris (Ghaniyyu & Husnita, 2021). Kontribusi Indonesia untuk menekan laju perubahan iklim global adalah meratifikasi *Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change* melalui Undang-Undang No. 16 Tahun 2016 dan menyampaikan target penurunan emisi GRK melalui *Enhanced Nationally Determined Contribution (ENDC)* sebesar 31,89% dengan usaha sendiri dan 43,2% dengan bantuan internasional pada tahun 2030 (KLHK, 2022).

Pertumbuhan penduduk yang terus berkembang mengakibatkan konversi lahan untuk memenuhi kebutuhan perkembangan ekonomi, pemukiman, pendidikan, dan budaya di perkotaan. Pertumbuhan populasi penduduk kota memicu isu-isu lingkungan yang umumnya dibahas mengenai pemanasan global. Aktifitas penduduk kota yang turut memberikan kontribusi terhadap kenaikan emisi CO₂ diantaranya transportasi, permukiman, komersial, dan perkantoran (Rawung, 2015). Cara untuk mengurangi emisi CO₂ secara global diantaranya adalah meningkatkan efisiensi energi, meningkatkan produksi energi terbarukan, menerapkan pajak karbon, menambah ruang terbuka hijau, melestarikan sumber energi yang ada dan menangkap CO₂ dari sumbernya (Hong, 2022). Ruang terbuka hijau (RTH) juga dapat menjadi solusi untuk mereduksi CO₂ di area perkotaan namun daya serap CO₂ oleh pohon belum efektif untuk menghilangkan keseluruhan emisi CO₂.

Dari beberapa opsi mitigasi, Teknologi *Carbon Capture Utilization and Storage* (CCUS) diperkirakan memiliki potensi keberlanjutan guna mengurangi emisi CO₂ (Zaemi dan Rohmana, 2021). Berbagai macam teknologi CCUS yang telah berkembang diantaranya adalah DAC (*Direct Air Capture*) dan BC (*Biological Capture*). Namun, teknologi eksisting tersebut memiliki kekurangan di antaranya efisiensi teknologi yang tidak sejalan dengan rancangan awal dan harga untuk teknologinya terbilang mahal (Isya dkk., 2020). Dengan demikian, penelitian mengenai teknologi *carbon capture* ini perlu dikembangkan untuk memperoleh teknologi yang optimal dan terjangkau. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui cara mereduksi karbon di ruang terbuka serta mampu menerapkan teknologi *carbon capture* secara optimal

2. METODE PENELITIAN

2.1 Waktu Penulisan

Penulisan karya ilmiah ini menggunakan pendekatan riset secara non-empiris, melalui studi literatur, pengumpulan data dan analisis dari hasil penelitian terdahulu, dan penyimpulan hasil yang didapatkan. Adapun waktu penelitian dan penulisan karya ilmiah ini selama 3 bulan dari Agustus 2023 hingga Oktober 2023.

2.2 Tahap Penulisan

Karya tulis ini terdiri dari beberapa tahap penulisan untuk menggali informasi dan data tertentu. Adapun tahapan tersebut sebagai berikut:

1. Mengamati dan merumuskan permasalahan terkait pengembangan teknologi untuk mereduksi CO₂ yang ada di udara, mengoptimalkan fungsi teknologi *carbon capture* di ruang terbuka beserta potensi penggunaan energi terbarukan serta pengolahan limbah menjadi produk bernilai guna tinggi.
2. Melakukan riset literatur terkait pengembangan material
3. Menentukan teknik pengumpulan pustaka beserta batasannya.
4. Melakukan pengumpulan dan analisis pustaka
5. Menyusun saran dan kesimpulan yang didapatkan.

2.3 Sumber Data

Karya tulis ilmiah ini tidak menggunakan data yang diambil secara langsung atau data primer. Sumber data yang dipakai pada penelitian ini adalah data sekunder di mana data sekunder ini adalah data yang digunakan untuk mendukung penelitian yang didapatkan dengan studi pustaka baik dalam bentuk pustaka cetak maupun elektronik serta studi-studi terdahulu yang memiliki keterkaitan.

2.4 Tahap Studi Pustaka

Metode studi pustaka digunakan untuk mempelajari teori-teori yang berhubungan dengan penelitian dan pembuatan alat. Pustaka yang digunakan berhubungan dengan *carbon capture*, *biological capture*, *direct air capture*. Pustaka yang dijadikan rujukan dalam hal ini dapat berupa jurnal yang berupa *soft file*. Tahap studi pustaka/ *literature review* menggunakan metode pemaparan cara dan sistematika pencarian data yang dilakukan melalui penelusuran pustaka. Dalam hal ini kata-kata kunci yang digunakan dalam pencarian adalah *carbon capture*, *biological capture*, *direct air capture*.

2.5 Teknik Pengumpulan Data

Teknologi pengumpulan data yang digunakan dalam penulisan artikel ini adalah *literature review*. Penulis mengumpulkan data dari berbagai sumber, termasuk jurnal dan dokumen elektronik yang mendukung riset terkait dengan potensi *carbon capture* berbasis integrasi dari teknologi *direct and biological capture*. Selanjutnya dilakukan analisis dokumen dan data dari sumber yang relevan tersebut untuk mendapatkan hasil dan kesimpulan yang akan menjawab rumusan masalah.

2.6 Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan metode deskriptif kuantitatif atas data yang telah didapatkan dan disusun. Data yang telah disusun kemudian diolah dan dibahas dengan adanya pemusatan bahasan dari data yang mendukung kerangka berpikir mengenai potensi penggunaan teknologi *carbon capture* berbasis *direct and biological capture* sehingga output dari *carbon capture* ini dapat dimanfaatkan untuk produk biomassa. Pengambilan kesimpulan dilakukan dengan membandingkan tafsiran yang telah dirumuskan dengan hasil analisa data yang telah diperoleh sehingga hasil penulisan karya ilmiah ini dapat menjadi acuan rekomendasi masyarakat umum.

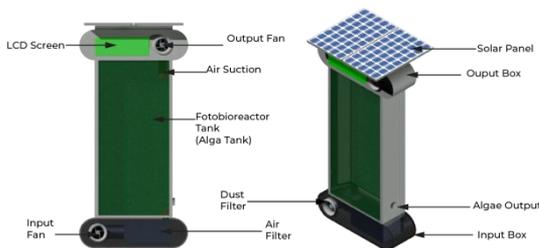
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Deskripsi Alat

CityCapt merupakan teknologi untuk mengurangi kadar CO₂ di udara ambien dengan memanfaatkan alga sebagai fotobioreaktor. Keunggulan dari *CityCapt* ini adalah dapat meminimalisir kadar CO₂ di udara ambien pada daerah perkotaan dengan menempatkan pada daerah yang strategis. CO₂ di udara ambien ini perlu dikurangi dikarenakan CO₂

merupakan salah satu pencemar gas rumah kaca, yang dapat menimbulkan efek rumah kaca yang menyebabkan energi dari sinar matahari tertahan di dalam bumi. Normalnya, energi matahari seharusnya bisa terabsorpsi sendiri dan memantulkan kembali dalam bentuk infrared oleh awan dan permukaan bumi. Tetapi, adanya gas rumah kaca ini menyebabkan sebagian besar infrared yang dipancarkan terpantul kembali ke permukaan bumi dan menyebabkan terjadinya peningkatan suhu permukaan bumi sehingga terjadi pemanasan global (Sutrisno *et al.*, 2016).

CityCapt yang digunakan untuk mengurangi CO₂ ini juga dilengkapi dengan panel surya sebagai sumber energi lebih ramah lingkungan, selain itu mikroalga yang digunakan dapat dilakukan pemanenan dan dapat dimanfaatkan sebagai biomassa. Komponen alat pada CityCapt di antaranya adalah panel surya sebagai sumber energi; *input fan* untuk menangkap udara ambien; *air filter* dan *dust filter* untuk menyaring udara ambien yang masuk; *output fan* untuk mengeluarkan partikel kecil hasil filtrasi; *bioreactor* dan *air suction* untuk memproses CO₂ menjadi mikroalga; *algae output* untuk proses pemanenan mikroalga. Adapun desain alat CityCapt dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Alat CityCapt.

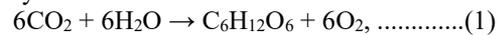
3.2 Mekanisme CityCapt

3.2.1 Penangkapan dan Penyaluran CO₂

CityCapt merupakan teknologi *carbon capture* yang mengintegrasikan DAC dengan BC. Setelah proses penyerapan udara ambien melalui *input fan*, udara akan masuk dalam metode *Direct Air Capture* pada CityCapt berupa *dust and air filter* yang memanfaatkan sorben padat seperti zeolit, karbon aktif, MOF (*Metal Organic-Frameworks*), bahan yang dimodifikasi amina, bahan silika, polimer organik berpori, tabung nano karbon, dan saringan molekuler karbon. Penggunaan sorben padat ini dapat meminimalkan konsumsi energi (Mcqueen *et al.*, 2021). Setelah melalui proses filtrasi sorben padat, selain CO₂ yang terserap, hasil filtrasi lainnya akan dialirkan dan dikeluarkan kembali melalui *output fan*, sedangkan CO₂ akan masuk ke dalam fotobioreaktor untuk proses selanjutnya (Rezazadeh *et al.*, 2021). Dengan mengintegrasikan DAC dan BC dalam satu sistem, CityCapt menawarkan solusi yang menjanjikan untuk mengurangi emisi CO₂ di lingkungan. Proses penangkapan CO₂ yang efisien dan penggunaan teknologi inovatif dalam CityCapt dapat menjadi salah satu langkah penting dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dan menciptakan dunia yang lebih berkelanjutan.

3.2.2 Proses Pembuatan Mikroalga

CO₂ yang telah dialirkan kedalam fotobioreaktor akan lanjut pada metode *Biological Capture*. CityCapt didesain dengan sistem tertutup dikarenakan sistem tertutup dapat meningkatkan waktu retensi CO₂ dan meningkatkan efisiensi transfer CO₂ dari gas ke cairan hingga 95% (Li *et al.*, 2013; Hong 2022). Mikroalga yang digunakan dalam CityCapt adalah mikroalga dengan nama spesies *Chlorella vulgaris* yang dapat menyerap hingga 617,6 kg CO₂ pertahunnya (Prayitno *et al.*, 2021). Reaksi kimia yang terjadi juga sederhana hanya menggunakan reaksi fotosintesis pada umumnya yaitu



Proses penangkapan CO₂ di udara oleh mikroalga dan selanjutnya dikonversi menjadi biomassa dan lipid. Perhitungan yang digunakan untuk mengetahui seberapa besar efisiensi dari sistem ini adalah menggunakan persamaan:

$$E = \frac{\text{CO}_2\text{in} - \text{CO}_2\text{out}}{\text{CO}_2\text{in}} \dots\dots\dots(2)$$

3.2.3 Pemanenan Biomassa

Mikroalga yang bertumbuh dan berkembang dalam sistem fotobioreaktor akan membentuk biomassa yang lebih besar volume dan massa mikroalga hingga terjadi kesetaraan karbon dioksida yang diserapnya (Suci dan Aviantara, 2019). Pemanenan mikroalga dilakukan dengan membuka katup pada bagian bawah *photobioreactor tank*. Potensi dari hasil pemanenan mikroalga ini dari aspek ekonomis jika diproses lebih lanjut dapat menghasilkan pewarna bio (*biopigment*), bahan bakar bio (*biofuel*), maupun produk lainnya yang berbasis mikroalga (Suci dan Aviantara, 2019). Mikroalga dapat dilakukan pemanenan ketika telah mencapai stase stasioner, di mana kecepatan pertumbuhan (*growth rate*) menjadi nol dan tidak ada lagi pertumbuhan mikroalga (Prasadi, 2018). Proses pemanenan mikroalga yang sering digunakan adalah filtrasi dan penyaringan dengan memisahkan mikroalga dari cairan melewati media permeabel yang dapat ditembus oleh suatu cairan dan menahan endapan yang berupa mikroalga (Hardiyanto dan Azim, 2012). Dengan memahami proses pemanenan mikroalga dan potensi ekonomis yang terkait, industri berbasis mikroalga dapat menjadi komponen penting dalam upaya berkelanjutan untuk menghasilkan produk bernilai tinggi sambil mengurangi emisi karbon dioksida di lingkungan.

3.3 Penerapan CityCapt dan Pilot Plant

CityCapt sendiri dapat diterapkan untuk skala perkotaan dan dapat diterapkan dalam jumlah yang banyak untuk mengefisienkan penyerapan CO₂. Pilot plant dari teknologi ini sendiri direncanakan di Kota Surabaya yang menurut Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya (2022) pada tahun 2021, terdapat sebesar 15.209,95 Gg CO₂ eq dan hal ini dapat dikalkulasikan untuk pengurangan maksimal dengan perhitungan sebagai berikut:

Jumlah GRK kota Surabaya 2021	= 15.205,95 Gg CO ₂ eq
Kapasitas CityCapt	= 617,6 Kg CO ₂ eq per tahun
Pengurangan 1 unit	= 1520595 kg - 617,6 kg = 1.519.977,4 kg/tahun
Jumlah GRK/Kapasitas CityCapt	= 1520595 kg/617,6 kg = 2462 unit

Sehingga dalam mengurangi kadar CO₂ di Kota Surabaya hingga mencapai 0 perlu sebanyak 2462 unit yang tersebar di Kota Surabaya.

3.4 Perbandingan Teknologi, Biaya, dan Konsumsi Energi

CityCapt merupakan salah satu teknologi yang mengintegrasikan antara *direct and biological capture* sehingga prosesnya jauh lebih ekonomis dibandingkan teknologi pada umumnya. CityCapt sendiri menggunakan skema *photobioreactor* (FBR) vertikal sehingga jika dibandingkan dengan sesama *biological capture* memiliki produksi biomassa yang tinggi seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Teknologi *Biological Capture*

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

Sumber: Prayitno *et al.*, 2021

Perbandingan dengan teknologi lainnya adalah dari sisi *direct capture*, di mana CityCapt memiliki sisi ekonomis yang lebih rendah karena menggunakan panel surya sebagai sumber energinya. Dengan mengintegrasikan antara *direct air capture dan biological capture*, CityCapt hanya membutuhkan energi listrik berkisar sebesar 34,24 kwh untuk 1 kg CO₂ yang diserap (Slade dan Bauen, 2013; McQueen *et al.*, 2021). Apabila dalam satu tahun CityCapt mampu menyerap sebanyak 617,6 kg CO₂ maka energi listrik yang dibutuhkan sebesar 21.147 kwh/tahun. Kebutuhan energi listrik tersebut tentu saja mampu disediakan oleh panel surya yang dimiliki CityCapt.

3.5 Analisis SWOT

Berdasarkan seluruh tinjauan yang dilakukan, tentunya perlu pula analisis *SWOT* (*Strength, Weakness, Opportunities, Threats*). Analisis ini sendiri berguna untuk menganalisis teknologi CityCapt secara lebih komprehensif dengan mempertimbangkan keunggulan, kekurangan, peluang serta ancaman bagi teknologi ini. Analisis ini sendiri dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. SWOT Teknologi CityCapt

Strengths	Weakness	Opportunity	Threat
1. Sumber energi yang melimpah 2. Proses lebih efektif karena berbasis integrasi antara <i>direct and biological capture</i> 3. Proses lebih ekonomis	Tidak bisa mengontrol kualitas dari biomassa mikroalga	Teknologi <i>carbon capture</i> saat ini tengah dibutuhkan untuk reduksi karbon di atmosfer	Persaingan dengan teknologi lain

Sumber: Data diolah, 2023

3.6 Potensi Pencapaian SDGs

Berdasarkan tinjauan yang telah dilakukan, inovasi teknologi CityCapt sangat berpotensi untuk diterapkan Dalam mendukung serta menunjang pembangunan berkelanjutan, inovasi ini tentu saja dapat turut berkontribusi dalam mewujudkan *Sustainable Development Goals* 2030, terutama pada poin 7 tentang energi bersih dan terjangkau dan 13 tentang aksi iklim.

1. Pada poin ke 7, CityCapt dapat mendukung pencapaian SDGs dengan menjadi teknologi alternatif yang menggunakan tenaga surya atau solar panel, sehingga CityCapt mampu menambah jumlah penggunaan energi bersih terbarukan di Indonesia
2. Pada poin ke 13, CityCapt nantinya dapat dimanfaatkan sebagai teknologi untuk mereduksi CO₂ sehingga dapat meminimalisir pemanasan global akibat efek gas rumah kaca dan juga mencegah adanya perubahan iklim
3. CityCapt juga berkontribusi terhadap carbon life cycle dimana output dari CityCapt berupa biomassa yang dapat dimanfaatkan kembali

4. KESIMPULAN

Berdasarkan tahapan penelitian yang telah dilakukan maka, didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

(1) Daerah perkotaan yang memiliki akses ruang terbuka berpotensi menghasilkan emisi CO₂ dari kegiatan transportasi, permukiman, komersial, dan perkantoran. Emisi CO₂ tersebut dapat berdampak pada pemanasan global dan perubahan iklim. Oleh karena itu, diperlukan langkah mitigasi untuk mengatasi hal tersebut. Langkah mitigasi tersebut salah satunya adalah mengembangkan teknologi carbon capture untuk diaplikasikan di daerah perkotaan.

(2) CityCapt merupakan teknologi *carbon capture* untuk mengurangi kadar CO₂ di udara ambien dengan memanfaatkan alga sebagai fotobioreaktor. Keunggulan dari CityCapt ini adalah dapat meminimalisir kadar CO₂ di udara

ambien pada daerah perkotaan dengan menempatkan pada daerah yang strategis, alat ini memanfaatkan energi berasal dari panel surya sehingga lebih ramah lingkungan, selain itu mikroalga yang digunakan dapat dilakukan pemanenan dan dapat dimanfaatkan sebagai biomassa. *CityCapt* mampu menyerap sebanyak 617,6 kg CO₂ dengan energi listrik yang dibutuhkan sebesar 21.147 kwh/tahun.

(3) *CityCapt* menjadi terobosan teknologi yang dapat dimanfaatkan untuk mereduksi CO₂ penyebab perubahan iklim yang ada di ruang terbuka dengan bahan bakar panel surya sekaligus mendapatkan output berupa biomassa yang dapat dimanfaatkan kembali. Dengan demikian teknologi *CityCapt* telah berkontribusi pada pencapaian SDGs tujuan ke-7 mengenai energi bersih dan terjangkau karena telah menambah penggunaan energi terbarukan. Selain itu, juga pada tujuan ke-13 mengenai aksi perubahan iklim dikarenakan *CityCapt* sebagai bentuk mitigasi perubahan iklim.

UCAPAN TERIMA KASIH

Karya ini didukung oleh seluruh keluarga penulis, dosen-dosen Teknik Lingkungan Universitas Brawijaya, dan seluruh pihak lainnya yang tidak dapat disebutkan satu per satu dan kami ucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang juga sudah terlibat pada penyusunan karya ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, K., Younas, Z. I., Manzoor, N. (2023). *Greenhouse Gas Emissions and Corporate Social Responsibility in USA*. A Comprehensive Study Using Dynamic Panel Model.
- McLaughlin, H., Littlefield, A. A., Menefee, M., Kinzer, A., Hull, T., Sovacool, B. K., Bazilian, M. D., Kim, J., & Griffiths, S. (2023). Carbon Capture Utilization And Storage In Review: Sociotechnical Implications For a Carbon-Reliant World. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 177, 113215.
- Cooper, C.D. & Alley, F.C. (2010). *Air Pollution Control: A Design Approach*. Waveland Press.
- Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya. (2022). *Kajian Inventarisasi Gas Rumah Kaca*. Dinas Lingkungan Hidup Surabaya, Kota Surabaya.
- Ghaniyyu, F. F. & Husnita, N. (2021). Upaya Pengendalian Perubahan Iklim Melalui Pembatasan Kendaraan Berbahan Bakar Minyak di Indonesia Berdasarkan Paris Agreement. *Jurnal Ilmu Hukum*, 7(1), 110-129.
- Hardiyanto & Maulana, A. (2012). *Mikroalga Sumber Pangan dan Energi Masa Depan*. UPT UNDIP Press.
- Hong, W.Y. (2022). A Techno-Economic Review on Carbon Capture, Utilisation, and Storage Systems for Achieving a Net-Zero CO₂ Emissions Future. *Carbon Capture Science & Technology*, 3, 100044.
- Hosseini, N.S., Shang, H. & Scott, J.A. (2018). Biosequestration of Industrial Off-Gas CO₂ for Enhanced Lipid Productivity in Open Microalgae Cultivation Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 458-469.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impact, Adaptation, and Vulnerability. The Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press.
- Isya, A.A., Arman, K.R. & Wintoko, J. (2020). Mini-Review Teknologi Carbon Capture and Utilization (CCU) Berbasis Kombinasi Proses Kimia dan Bioproses. *EQUILIBRIUM*, 4(2).
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). (2022). *Enhanced Nationally Determined Contribution (NDC) Republic of Indonesia*. Jakarta.
- Kurniawan A. (2017). Pengukuran Parameter Kualitas Udara (CO, NO₂, SO₂, O₃ dan PM10) di Bukit Kototabang Berbasis ISPU. *Jurnal Teknosains*, 7(1), 1-13.
- Leung, D.Y., Caramanna, G. & Maroto-Valer, M.M. (2014). An Overview of the Current Status of Carbon Dioxide Capture and Storage Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 426-443.
- McQueen, N., Gomes, K.V., McCormick, C., Blumanthal, K., Pisciotta, M. & Wilcox, J. (2021). A Review of Direct Air Capture (DAC): Scaling Up Commercial Technologies and Innovating for the Future. *Progress in Energy*, 3(3), 032001.
- Ozkan, M. (2021). Direct Air Capture of CO₂: A Response to Meet the Global Climate Targets. *MRS Energy & Sustainability*, 8(2), 51-56.
- Prasadi O. (2018). Pertumbuhan dan Biomasa Spirulina sp. dalam Media Pupuk sebagai Bahan Pangan Fungsional. *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, 10(2), 119-123.
- Purba A. A. (2020). Urgensi Pengetatan Baku Mutu Udara Ambien Indonesia (Studi Kasus Gugatan Pemulihan Udara DKI Jakarta). *Padjajaran Law Review*, 8(1), 99-111.
- Rachmayanti, L. & Mangkoedihardjo, S. (2021). Evaluasi dan Perencanaan Ruang Terbuka Hijau (RTH) Berbasis Serapan Emisi Karbon Dioksida (CO₂) di Zona Tenggara Kota Surabaya (Studi Literatur dan Kasus). *Jurnal Teknik ITS*, 9(2), C107-C114.
- 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), 200122.
- Sodiq, A., Abdullatif, Y., Aissa, B., Ostovar, A., Nassar, N., El-Naas, M. & Amhamed, A. (2022). A Review on Progress Made in Direct Air Capture of CO₂. *Environmental Technology & Innovation*, 102991.
- Suciati F, Aviantara DB. (JRL 2023). Green Technology Untuk Green Company dengan Penerapan Sistem Fotobioreaktor Penyerap Karbon Dioksida, 12(1), 15-40.
- Suwarna, M., Saragih, G.M. & Pratomo, S. (2020). Analisis Kebutuhan Ruang Terbuka Hijau sebagai Penyerap Gas CO₂ (Studi Kasus: Kecamatan Telanaipura Kota Jambi). *Jurnal Daur Lingkungan*, 3(1), 18-22.
- Teong, S.P. & Zhang, Y. (2023). Direct Capture and Separation of CO₂ from Air. *Green Energy & Environment*.
- Undang-Undang Republik Indonesia No. 26 Tahun 2007 tentang Penanaman Modal (2007).
- Undang-Undang Republik Indonesia No. 24 Tahun 1992 tentang Perdagangan Berjangka Komoditi (1992).
- Zaemi, F.F. & Rohmana, R.C. (2021). Carbon Capture,

Utilization, and Storage (CCUS) untuk Pembangunan Berkelanjutan: Potensi dan Tantangan di Industri Migas Indonesia. *Prosiding SATU BUMI*, 3(1).

Sutrisno, A. M., Huboyo, H. S., & Sutrisno, E. (2016). Kajian Prediksi Beban Emisi Pencemar Udara (TSP, NO_x, SO₂, HC, dan CO) dan Gas Rumah Kaca (CO₂, CH₄, dan N₂O) Sektor Transportasi Darat di Kota Surakarta dengan Metode Top Down dan Bottom Up. [Doctoral dissertation, Diponegoro University]. Universitas Diponegoro Repository.