

Mikroalga : Bioenergi dan Lingkungan Berkelanjutan

Fandika Agustiyar^{*)}

Fakultas Teknologi Mineral, UPN Veteran Yogyakarta, Jl. SWK 104 Condong Catur, Depok, Sleman, Yogyakarta

^{*)} Corresponding author: fandikaagustiyar@gmail.com

Abstract

The increase in the world's population has resulted in an increase in energy needs. The fulfillment of energy that still relies on unrenewable resources results in a decrease in environmental support capacity due to the pollution of CO₂ gas produced, in addition to the threat of an energy crisis potentially occurring in the future due to the depletion of fossil fuel reserves. Bioenergy from microalgae is an alternative as a source of fuel in the future. Bioenergy development of microalgae is considered to have many advantages, abundant resources, easy to develop, has a high oil content so that the potential is developed as biofuels, easy to grow in various water and waste conditions, and can reduce CO₂ gas. Literature studies and observations in previous studies became the method used in conducting this research. The results show that microalgae have tremendous potential to be developed as bioenergy and can encourage in solving environmental problems, especially related to the reduction of CO₂ emission gases and reduction of contaminant levels in liquid waste.

Abstrak

Kenaikan populasi penduduk dunia berakibat pada meningkatnya kebutuhan energi. Pemenuhan energi yang masih bergantung pada *unrenewable resource* berakibat pada penurunan daya dukung lingkungan akibat pencemaran gas CO₂ yang dihasilkan, selain itu ancaman krisis energi berpotensi terjadi dimasa yang akan datang karena semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil. Bioenergi dari mikroalga merupakan alternatif sebagai sumber bahan bakar dimasa yang akan datang. Pengembangan bioenergi dari mikroalga dinilai memiliki banyak keuntungan, sumber dayanya yang melimpah, mudah dikembangkan, memiliki kandungan minyak yang tinggi sehingga potensial dikembangkan sebagai *biofuel*, mudah tumbuh diberbagai kondisi perairan dan limbah, serta dapat mereduksi gas CO₂. Kajian *literature* dan observasi pada penelitian terdahulu menjadi metode yang digunakan dalam melakukan penelitian ini. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa mikroalga memiliki potensi yang luar biasa untuk dikembangkan sebagai bioenergi dan dapat mendorong dalam menyelesaikan permasalahan lingkungan, terutama terkait dengan reduksi gas emisi CO₂ dan pengurangan tingkat kontaminan dalam limbah cair.

Kata kunci : *bioenergy, fossil fuels, energy, microalgae.*

PENDAHULUAN

Saat ini pertumbuhan penduduk global mengalami kenaikan dengan pesat, hal itu juga diiringi dengan peningkatan industrilisasi sehingga menyebabkan kebutuhan konsumsi energi per kapita di seluruh dunia meningkat. Dalam pemenuhan konsumsi energi saat ini masih bergantung pada *unrenewable resource*. Lebih dari 80% kebutuhan energi dunia berasal dari bahan bakar fosil [1]. Saat ini, masyarakat global menghadapi tantangan yang signifikan karena menipisnya cadangan minyak mentah, peningkatan konsumsi energi, pertumbuhan populasi, dan krisis alam seperti emisi gas rumah kaca, pemanasan global, dan polusi udara [2]. Tidak hanya dari aktivitas pembakaran bahan bakar fosil, pada saat yang sama kegiatan industri juga berdampak pada pencemaran lingkungan perairan akibat dari pembuangan limbah. Menurut PBB, diprediksi bahwa dalam 30 tahun mendatang populasi penduduk dunia akan mengalami pertumbuhan hingga 2 miliar, pada tahun 2050 akan mencapai 9,7 miliar penduduk [3]. Kota – kota dengan kepadatan penduduk yang tinggi akan mengkonsumsi energi 60% sampai 80% dari energi global dan akibatnya menyumbang sekitar 75% CO₂ di dunia [4], [5].

Menikatnya ketergantungan terhadap bahan bakar fosil menyebabkan kekhawatiran akan krisis energi dan dampak pencemaran lingkungan, alternatif pengembangan bioenergi sekarang ini semakin banyak dikembangkan. Salah satu alternatif pengembangan bioenergi adalah pemanfaatan mikroalga sebagai *biofuel* yang saat ini semakin populer untuk diteliti dan dikembangkan, karena memiliki potensi produktivitas yang tinggi dan bukan merupakan tanaman produksi untuk pangan [6]. Mikroalga telah dianggap sebagai bahan baku yang berkelanjutan untuk menghasilkan *biofuel* untuk memenuhi masalah serius yang timbul dari menipisnya bahan bakar fosil [7]. Mikroalga adalah tumbuhan perairan dengan ukuran mikroskopik yang mempunyai senyawa bioaktif yang memiliki potensi besar untuk diolah menjadi sumber, pangan, pakan, farmasi dan energi [8].

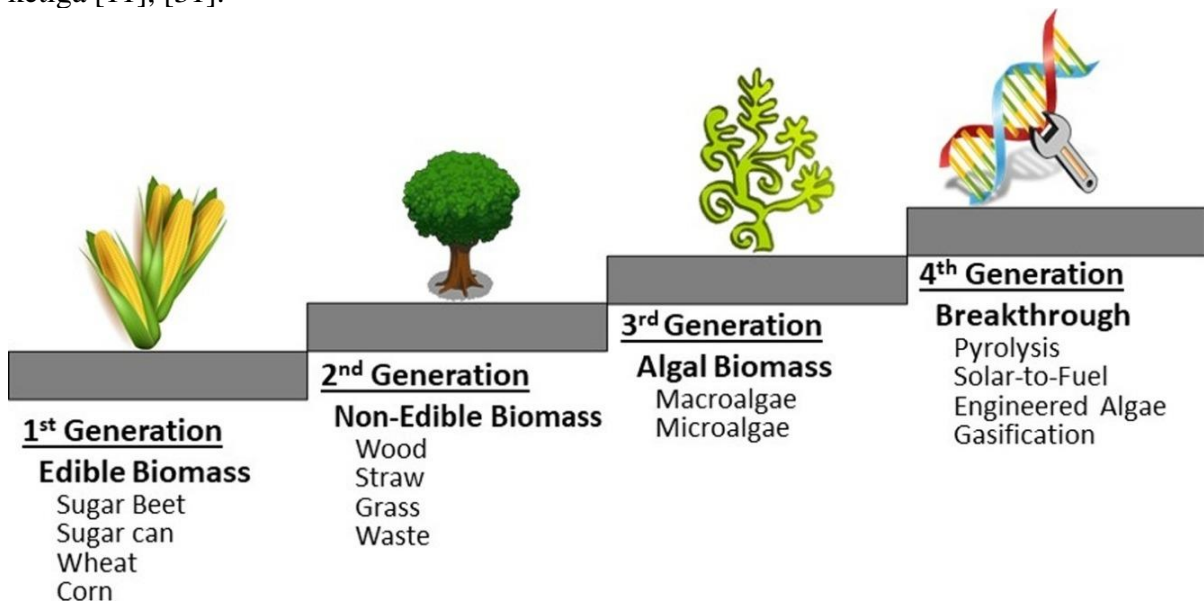
Mikroalga dikenal sebagai *biofuel* generasi tiga yang merupakan sumber non-pangan dengan kemampuan tumbuh lima hingga sepuluh kali lipat dari laju pertumbuhan tanaman terestial [9]–[11]. Dalam perkembangannya *biofuel* generasi pertama berupa tanaman pangan dan pakan untuk ternak seperti, kedelai, jagung dan sawit [12]. *Biofuel* generasi kedua berasal dari tanaman non-pangan [13]. Mikroalga sebagai generasi ketiga memiliki keunggulan dapat memfiksasi CO₂ [14], [15], mikroalga memiliki potensi untuk mengakumulasi nutrisi dalam air limbah, termasuk amonia, fosfor dan logam berat [12], selain itu mikroalga juga dikenal sebagai tanaman kosmopolitan. Mikroalga dapat tumbuh diberbagai lingkungan perairan meliputi, air tawar, air laut dan air limbah [6]. Mikroalga sebagai sumber *biofuel* generasi ketiga berpotensi mengatasi masalah yang ditemukan pada *biofuel* generasi sebelumnya dengan menggunakan teknologi yang ada saat ini [16], [17]. Tujuan dari penelitian ini berfokus pada mengkaji potensi pemanfaatan mikroalga sebagai bioenergi, sekaligus perannya dalam mereduksi CO₂ dan mengurangi kontaminan pada limbah guna mendukung terwujudnya lingkungan yang berkelanjutan.

POTENSI MIKROALGA SEBAGAI BIOFUEL

Mikroalga merupakan organisme tumbuhan purba dengan ukuran renik berdiameter 3-30 µm sering dikenal juga sebagai fitoplankton [18]. Sebagai organisme dengan ukuran mikroskopis, mikroalga menyebar dan dapat ditemukan di banyak lingkungan yang terpapar cahaya matahari, morfologi dan karakteristik yang dimiliki mikroalga sangat beragam [19]–[21]. Mikroalga merupakan produsen primer dalam lingkungan perairan dengan kemampuan fotosintesis seperti tumbuhan tingkat tinggi yang lain [22]. Dalam menangkap gas CO₂ mikroalga adalah tanaman yang paling efisien dibanding tanaman lain [23]. Dibandingkan dengan tumbuhan darat, mikroalga memiliki tingkat efisiensi dalam memfiksasi CO₂ sebesar 10-50 kali lebih tinggi [24],

[25]. Kandungan karbon dalam sel mikroalga sebesar 50 % dimana 1,83 kg CO₂ mampu ditangkap untuk memperoleh 1 kg biomassa mikroalga [4], [26].

Keanekaragaman mikroalga di dunia diperkirakan berada pada kisaran jutaan spesies yang sebagian besar belum dikenali dan tidak dapat dibudidayakan. Diperkirakan 200.000-800.000 spesies hidup di alam, 35.000 spesies dapat diidentifikasi dan 15.000 komponen kimia komposisi biomassa diketahui [27], [28]. Indonesia memiliki sekitar 2/3 wilayahnya berupa laut dan dikenal sebagai salah satu *mega-diversity spot* di dunia [16]. Potensi lahan untuk budidaya mikroalga menyebar di 26 provinsi Indonesia [29], dengan cakupan area sebesar 26.700 ha dengan proyeksi hasil produksi mencapai 462.400 ton/tahun [30]. Potensi pemanfaatan mikroalga sebagai bioenergi dapat dilakukan dengan mengembangkan mikroalga sebagai biofuel. Kandungan lipid yang sangat tinggi pada mikroalga dapat dimanfaatkan untuk *biofuel* generasi ketiga [11], [31].



Gambar 1. Perkembangan Generasi *Biofuel* dan Materialnya [32]

Tabel 1. Komparasi Nilai Ekonomis Dari Beberapa Material Biodiesel [26]

Tanaman	Kandungan Minyak (L/ha)	Kebutuhan Luas Lahan (M ha)	Produktivitas Biodiesel (kg/ha.th)
Jagung	172	1540	152
Kelapa	2689	99	2315
Kelapa Sawit	5366	45	4747
Mikroalga			
Lipid Rendah	58700	5	52927
Lipid Sedang	97800	3	86515
Lipid Tinggi	1369001540	2	121104

Sanchez *et al* [33] dan Ye *et al.* [34] menyatakan bahwa mikroalga mengandung protein, karbohidrat, pigmen (klorofil dan karotenoid), asam amino, lipid, dan hidrokarbon. Mikroalga

memberikan manfaat besar dalam produksi *biofuel* karena memiliki kemampuan yang sangat baik dalam mensintesis lipid [35]. Secara umum mikroalga memiliki kandungan lipid yang bervariasi, berkisar 1,9 % hingga 40 % [35]. Dalam kondisi pertumbuhan normal kandungan lipid mikroalga dalam berat kering sebesar 10 -30 % [36]. Berdasarkan penelitian yang dilakukan sebelumnya, kandungan lipid pada mikroalga dipengaruhi oleh faktor suhu, salinitas dan intensitas cahaya, mikroalga akan menghasilkan lipid yang optimal pada salinitas 20-25 ppt, sedangkan pada kondisi salinitas 10 – 15 ppt untuk memperoleh kandungan lipid maksimal diperlukan perlakuan suhu pada kisaran 20 – 30 °C, sedangkan untuk memperoleh lipid yang maksimal suhu yang ideal adalah 15°C [26], [35]

Umumnya mikroalga yang sering dijumpai terdiri atas kelas *Bacillariophyceae* (Diantom), *Cyanophyceae* (alga biru hijau), *Chlorophyceae* (alga hijau), dan *Chrysophyceae* (alga coklat keemasan) [29]. Berdasarkan jenis spesies mikroalga yang ditemukan di Indonesia, terdapat berbagai jenis spesies dan kandungan lipid yang berpotensi dihasilkan [37].

Tabel 2. Beberapa Jenis Mikroalga dan Kandungan Lipid yang Dimiliki

Spesies Mikroalga	Kandungan Lipid (% biomassa)
<i>Chlorella emersonii</i>	25 - 63
<i>Chlorella minutissima</i>	57
<i>Chlorella sp.</i>	10-48
<i>Chlorella vulgaris</i>	5 - 58
<i>Dunaleilla salina</i>	6 – 25
<i>Dunaleilla primolicta</i>	23
<i>Dunaleilla sp.</i>	17 - 67
<i>Nanochloris sp.</i>	20 – 56
<i>Nanochloropsis sp.</i>	12 - 53
<i>Schizochytrium sp.</i>	50 - 77
<i>Skeletonema costatum</i>	13 - 51
<i>Pavlova salina</i>	30
<i>Pyrossia levis</i>	69
<i>Zithsa sp.</i>	45 - 47

Biodiesel Mikroalga

Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif yang dihasilkan dari minyak nabati dan lemak hewani [38]. Biodiesel dihasilkan melalui proses reaksi transesterifikasi minyak terhadap alkohol monohidrat pada suatu katalis (KOH atau NaOH) [38], [39]. Pemanfaatan biodiesel sebagai alternatif pengganti bahan bakar fosil memiliki beberapa keuntungan, diantaranya (a) bahan baku pembuatan biodiesel yang dapat diperbaharui [40], kontinuitas dari bahan baku yang digunakan [41], lebih aman dalam pendistribusian dan penyimpanan [42], lebih ramah lingkungan [43], memberikan performa mesin yang lebih baik [44] dan dapat mengurangi emisi gas beracun karena bersifat lebih mudah terurai atau *biodegradable*.

Ekstraksi Minyak Mikroalga

Dalam mengekstraksi minyak mikroalga, menurut [45] ada beberapa metode yang dapat digunakan diantaranya :

1. Metode Pelarut Kimia

Larutan kimia dapat digunakan untuk mengambil minyak dari mikroalga, material yang dapat digunakan seperti benzena, ether dan heksana. Umumnya yang digunakan untuk ekstraksi larutan kimia menggunakan heksana disebabkan *cost* yang lebih murah [46].

2. Metode pemisahan fisik

Pemisahan fisik dilakukan dengan perlakuan pengeringan mikroalga terlebih dahulu dan selanjutnya dilakukan proses penekanan pada mikroalga. Proses pemisahan minyak dilakukan menggunakan alat *filter press*, *piston press*, dan *screw press* pada tekanan tertentu. Dalam mempercepat ekstraksi minyak maka proses ini dikombinasikan dengan pemberian bahan kimia dan teknik *mechanical press* yang disarankan.

3. Ekstraksi Enzimatis

Pada metode ini enzim diperlukan untuk memecahkan dinding sel dari mikroalga. Air dapat berperan sebagai media pelarut sekaligus membantu proses pemecahan dinding sel. Proses ekstraksi menggunakan enzim dinilai lebih banyak mengeluarkan biaya ketimbang menggunakan heksana. Proses ekstraksi ini dapat dikolaborasikan dengan proses pemisahan secara ultrasonikasi. Kolaborasi cara ini dikenal dengan *sonoenzymatic treatment*. Cara ini dinilai akan menghasilkan rendeman minyak yang lebih cepat dengan kadar yang lebih tinggi.

4. *Osmotic Shock*

Metode *osmotic shock* dilakukan dengan memberi perlakuan perendaman mikroalga dengan larutan agen *osmotic* dengan konsentrasi tinggi. Metode *osmotic stress* apabila digunakan untuk jenis mikroalga laut yang tidak memiliki dinding sel yang tidak tebal sangat cocok, misalnya seperti *Dubalillella sp* [47]. Pada penelitian terdahulu, metode *osmotic stress* telah digunakan oleh beberapa peneliti. Pada ekstraksi *Botryococcus sp.* metode ini dapat mengekstrak biomassa mikroalga kering dan menghasilkan 10% lipid [48]. Metode ini juga mampu mengekstrak lipid sebanyak 8% dari mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan menggunakan pelarut metanol dan kloroform [48], [49].

5. *Supercritical fluid*

Proses pada metode ini dengan mencairkan CO₂ pada kondisi tekanan normal lalu dipanaskan sampai mencapai titik kesetimbangan pada fase cair dan gas [50]. Larutan yang dihasilkan dari pencairan fluida yang selanjutnya digunakan untuk mengekstraksi minyak alga. Dalam melakukan penahanan tekanan, metode ini memerlukan peralatan khusus. Hasil dari ekstraksi metode ini dalam biomassa diperoleh hampir sekitar 100% minyak [51]. Teknologi untuk memberikan tekanan menggunakan teknik *pressure liquid extraction* (PLE), tekanan tinggi diperlukan pada metode ini sebagai ekstraksi dari bioaktif mikroalga. Hasil senyawa bioaktif digunakan sebagai aplikasi pada antioksidan dan antimikroba [52].

6. Teknik Ultrasonikasi

Dalam metode ini gelembung kultivasi larutan dihasilkan melalui gelombang ultrasonik. Gelembung yang terbentuk selanjutnya akan mengalami pecah dan menimbulkan gelembung kejut dan pancaran cairan, hal tersebut menimbulkan pecahnya dinding sel. Dinding sel yang pecah akan mengeluarkan komponen sel dan akan bercampur dengan larutan. Keuntungan yang diperoleh pada metode ini dapat meningkatkan *yield ekstraksi* dengan waktu yang relative singkat [53].

DAMPAK PEMANFAATAN MIKROALGA TERHADAP LINGKUNGAN

Bahan bakar yang berasal dari biomassa lebih berkelanjutan dibandingkan dengan bahan bakar fosil karena hanya menghasilkan sedikit polusi dan minim menghasilkan emisi rumah kaca

[6]. Dengan pengembangan mikroalga sebagai biodiesel dinilai dapat mengurangi tingkat deforestasi. Target peningkatan penggunaan biodiesel dan bioethanol di tahun 2025 sebanyak 30% dan 50% telah berdampak pada pembukaan lahan baru untuk pengembangan kelapa sawit. Komoditi sawit merupakan faktor penting terhadap peningkatan deforestasi [54]–[56]. Dalam pemenuhan target biodiesel nasional tahun 2025 dengan mikroalga hanya membutuhkan 1,4 juta ha, hal tersebut dapat mengurangi pembukaan lahan seluas 4,6 juta ha, sehingga meminimalisir proses deforestasi[57].

Terkait dengan peningkatan produksi sawit, secara otomatis limbah yang dihasilkan pun juga mengalami kenaikan. Pabrik kelapa sawit biasanya menghasilkan limbah cair hasil proses yang dikenal dengan *palm oil mill effluent* (POME), gas emisi dari boiler, dan abu. Apabila limbah tersebut tidak dikelola secara tepat hal tersebut akan mencemari lingkungan. POME merupakan suspensi koloid yang memiliki kandungan 95-96% air, 4-5% lemak, 0,6-0,7% minyak dan padatan total [58]. POME hasil industri yang keluar dari proses biasanya berwujud cairan coklat, memiliki suhu debit berkisar 80°C - 90°C dengan kadar pH yang cukup asam 4-5. Dalam POME kadar BOD yang terkandung rata-rata sebesar 8200-35000 mg liter⁻¹ dan kadar COD sekitar 15103 – 65100 mg liter⁻¹, hal tersebut menimbulkan pencemaran apabila dibuang dilingkungan bebas [58]. Berdasarkan penelitian yang dilakukan[59], mikroalga dapat berperan dalam mengurangi tingkat kontaminan COD dan BOD, sehingga dapat mengurangi potensi pencemaran. Mikroalga memiliki potensi yang besar untuk dikembangkan di POME dengan memanfaatkan senyawa nitrogen dan fosfor. Selain itu mikroalga dinilai sangat ekonomis ketika dikembangkan dalam POME, karena mikroalga yang dikembangkan dari limbah sawit dapat digunakan untuk bahan bakar nabati [60]–[62]. Mengolah POME dengan mikroalga akan sangat bermanfaat bagi semua produsen minyak sawit karena ramah lingkungan dan sangat ekonomis[63]. Pembudidayaan mikroalga pada POME juga menekan menggunakan air, mengingat kebutuhan akan air yang terbatas. Manfaat lain penggunaan mikroalga adalah dapat menyerap karbon dioksida di atmosfer dan melepaskan oksigen, sehingga meningkatkan konsentrasi oksigen dalam sistem[64].

TANTANGAN

Pemanfaatan mikroalga sebagai komersialisasi bioenergi secara global adalah biaya produksi yang tinggi [65]–[67]. Selain itu penggunaan mikroalga untuk pengolahan POME akan berdampak pada keanekaragaman hayati. Hal ini diakibatkan dari dampak pembuatan kolam untuk kultivasi mikroalga yang menyebabkan adanya peralihan dan kerusakan habitat dari flora dan fauna.

KESIMPULAN

Saat ini pengembangan sumber energi baru dan terbarukan sangat penting untuk dilakukan dalam substitusi bahan bakar fosil. Mikroalga berpotensi untuk dikembangkan menjadi bioenergi seperti biodiesel. Mikroalga dinilai lebih berkelanjutan dibanding dengan energi fosil karena bioenergi dari mikroalga lebih sedikit menghasilkan CO₂, dalam proses budidaya mikroalga dapat berperan sebagai *carbon capture* di atmosfer, sehingga mengurangi kontaminan CO₂ pada atmosfer. Selain itu mikroalga juga dapat dimanfaatkan dalam pengurangan kontaminan COD dan BOD pada limbah, seperti pengolahan pada POME.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Fithriani and S. Melanie, “Potential utilization of *Botriococcus braunii* and *Nannochloropsis microalgae* as a biodiesel source in Indonesia,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 404, no. 1, doi: 10.1088/1755-1315/404/1/012005, 2019.

- [2] A. Aslam, S. Rasul, A. Bahadar, N. Hossain, M. Saleem, and L. Rasool, “Effect of Micronutrient and Hormone on Microalgae Growth Assessment for Biofuel Feedstock,” *Sustainability*, vol. 13, no. 5035, pp. 1–20, doi: <https://doi.org/10.3390/su13095035>. 2021.
- [3] UNESCO, “United Nations World Water Development Report 3 - Facts and Figures,” http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/WWDR3_Facts_and_Figures.pdf. 2019.
- [4] H. Vieira de Mendonça *et al.*, “Microalgae in a global world: New solutions for old problems?,” *Renew. Energy*, vol. 165, pp. 842–862, doi: 10.1016/j.renene.2020.11.014. 2021.
- [5] O. R. Medrano Pérez, “Ciudades sobrecargadas: la sobreexplotación de recursos como limitante del desarrollo sustentable,” *Antípoda. Rev. Antropol. y Arqueol.*, vol. 29, no. 39, pp. 3–12, doi: 10.7440/antipoda39.2020.01. 2020.
- [6] P. Pal, K. W. Chew, H. W. Yen, J. W. Lim, M. K. Lam, and P. L. Show, “Cultivation of oily microalgae for the production of third-generation biofuels,” *Sustain.*, vol. 11, no. 19, pp. 1–16, doi: 10.3390/su11195424. 2019.
- [7] Z. Hu, Y. Qi, L. Zhao, and G. Chen, “Interactions Between Microalgae and Microorganisms for Wastewater Remediation and Biofuel Production,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 10, no. 12, pp. 3907–3919, doi: 10.1007/s12649-018-0325-7. 2019.
- [8] S. Agustini and N. Febrian, “HIDROLISIS BIOMASSA MIKROALGA *Porphyridium cruentum*,” vol. 41, no. 1, pp. 1–10, 2019.
- [9] Lim, D. K., K. Sharma, S. Garg, and P. M. Schenk, “The race for highly productive microalgae strains,” *Biofuels*, vol. 1, no. 6, pp. 835–837, doi: <https://doi.org/10.4155/bfs.10.65>. 2010.
- [10] S. Khan and P. Fu, “Biotechnological perspectives on algae: a viable option for next generation biofuels,” *Curr. Opin. Biotechnol.*, vol. 62, pp. 145–162, doi: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.09.020>. 2020.
- [11] D. A. Wood, “Microalgae to biodiesel - Review of recent progress,” *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 14, no. 2001, pp. 1–13, doi: 10.1016/j.biteb.2021.100665. 2021.
- [12] F. Hussain *et al.*, “Microalgae an ecofriendly and sustainable wastewater treatment option: Biomass application in biofuel and bio-fertilizer production. A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 137, no. November, doi: 10.1016/j.rser.2020.110603. 2021.
- [13] A. Aliyu, J. G. M. Lee, and A. P. Harvey, “Microalgae for biofuels: A review of thermochemical conversion processes and associated opportunities and challenges,” *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 15, no. April, pp. 1–19, doi: 10.1016/j.biteb.2021.100694. 2021.
- [14] J. Fargione, J. Hill, D. Tilman, S. Polasky, and P. Hawthorne, “Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt,” doi: 10.1126/science.1152747. 2008.
- [15] J. M. Melillo *et al.*, “Indirect emissions from biofuels: How important?,” doi: <http://doi.org/10.1126/science.1180251>. 2009.

- [16] U. Zakiyah *et al.*, “Diversity and distribution of microalgae in coastal areas of East Java, Indonesia,” *Biodiversitas*, vol. 21, no. 3, pp. 1149–1159, doi: 10.13057/biodiv/d210340. 2020.
- [17] A. Alaswad, M. Dassisti, T. Prescott, and A. G. Olabi, “Technologies and developments of third generation biofuel production,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1446–1460, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.058>. 2015.
- [18] R. Citra, P. Kusuma, Y. D. Kuntjoro, and N. A. Sasongko, “Potensi Pemanfaatan Mikroalga Untuk Mitigasi Emisi Co₂ (Studi Kasus Di Pltu Cilacap) The Potency Of Microalga To Mitigate Co₂ Emission (Case Study : Cilacap Coal Fired Power Plant),” *Ketahanan Energi*, vol. 4, no. 1, pp. 1–27, 2018.
- [19] R. Sobari, A. . Susanto, D. S, and D. Y.R, “Kandungan Lipid Beberapa Jenis Sianobakteria Laut Sebagai Bahan Sumber Penghasil Biodiesel,” *J. Mar. Res.*, vol. 2, no. 1, pp. 112–119, 2013.
- [20] W. Astuti, S. Suropto, L. J.-J. B. Tropis, and U. 2017, “Komunitas Mikroalga di Perairan Sungai dan Muara Sungai Pelangan Kecamatan Sekotong Kabupaten Lombok Barat,” *J. Biol. Trop.*, vol. 17, no. 1, Accessed: Jul. 19, 2021. [Online]. Available: <http://jurnalfkip.unram.ac.id/index.php/JBT/article/view/401>. 2017.
- [21] M. J. Pelezar and E. C. S. Chan, *Dasar - Dasar Mikrobiologi*. Jakarta: UI Press, 1986.
- [22] Azim, R. Rataningsih, and N. Nacong, “Model Matematika Kendali Optimal Intensitas Cahaya dan Nutrisi Pada Pertumbuhan Mikroalga Dengan Menggunakan Metode Pontryagin,” *J. Ilm. Mat. Dan Terap.*, vol. 17, no. 1, pp. 70–81, doi: <https://doi.org/10.22487/2540766X.2020.v17.i1.15173>. 2020.
- [23] D. Agustina, D. Agustina, E. Purba, and D. Supriyadi, “Kemampuan Penyerapan CO₂ Menggunakan Tetraselmis Chuii Terhadap Intensitas Cahaya,” *Techno (Jurnal Fak. Tek. Univ. Muhammadiyah Purwokerto)*, vol. 19, no. 1, pp. 45–50, May doi: 10.30595/techno.v19i1.2345. 2018.
- [24] B. Wang, Y. Li, N. Wu, and C. Q. Lan, “CO₂ Bio-mitigation Using Microalgae,” *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 79, no. 5, pp. 707–718, doi: 10.1007/s00253-008-1518-y. 2008.
- [25] R. R. Rusdiani, R. Boedisantoso, and M. Hanif, “Optimalisasi Teknologi Fotobioreaktor Mikroalga sebagai Dasar Perencanaan Strategi Mitigasi Gas CO₂,” *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, pp. F188–F192, Dec. doi: 10.12962/J23373539.V5I2.16942. 2016.
- [26] Y. Chisti, “Biodiesel From Microalgae,” *Biotechnol. Adv.*, vol. 25, no. 3, pp. 294–306, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>. 2007.
- [27] A. Rahman and N. B. Prihantini, “Fatty acid of microalgae as a potential feedstock for biodiesel production in Indonesia,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 020059, pp. 1–8, doi: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5086606>. 2019.
- [28] H. Hadiyanto and M. A. Nur, *Mikroalga: Sumber Pangan & Energi Masa Depan*. UNDIP Press, 2012.

- [29] K. Khotimah, “Membangun Ketahanan Energi Pendukung Pertahanan Maritim Melalui Pemanfaatan Mikroalga Sebagai Biodiesel Bagi Masyarakat Pesisir,” *J. Pertahanan Bela Negara*, vol. 8, no. 1, pp. 67–84, doi: 10.33172/jpbh.v8i1.266. 2018.
- [30] R. Dahuri, J. Rais, S. P. Ginting, and D. M. Sitepu, *Pengelolaan Sumberdaya Wilayah Pesisir dan Lautan Secara Terpadu*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita, 2001.
- [31] M. G. Saad, N. S. Dosoky, M. S. Zoromba, and H. M. Shafik, “Algal Biofuels: Current Status and Key Challenges,” *Energies*, vol. 12, no. 10. doi: 10.3390/en12101920. 2019.
- [32] H. A. Alalwan, A. H. Alminshid, and H. A. S. Aljaafari, “Promising evolution of biofuel generations. Subject review,” *Renew. Energy Focus*, vol. 28, pp. 127–139, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2018.12.006>. 2019.
- [33] J. Emilio Sánchez-Moyano, I. García-Asencio, and J. Carlos García-Gómez, “Effects of temporal variation of the seaweed *Caulerpa prolifera* cover on the associated crustacean community,” *Mar. Ecol.*, vol. 28, no. 2, pp. 324–337, Jun. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2006.00141.x>. 2007,
- [34] H. Ye, K. Wang, C. Zhou, J. Liu, and X. Zeng, “Purification, antitumor and antioxidant activities in vitro of polysaccharides from the brown seaweed *Sargassum pallidum*,” *Food Chem.*, vol. 111, no. 2, pp. 428–432, Nov. doi: 10.1016/J.FOODCHEM.2008.04.012. 2008.
- [35] T. B. Saputro, K. I. Purwani, D. Ermavitalini, and A. F. Saifulloh, “Isolation of high lipid content microalgae from wonorejo river, Surabaya, Indonesia and its identification using rbcL marker gene,” *Biodiversitas*, vol. 20, no. 5, pp. 1380–1388, doi: 10.13057/biodiv/d200530. 2019.
- [36] P. M. Schenk *et al.*, “Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production,” *BioEnergy Res.*, vol. 1, no. 1, pp. 20–43, doi: 10.1007/s12155-008-9008-8. 2008.
- [37] T. P. A. S. D. W. S. D. A. Mujizat Kawaroe and D. S. Sardin, *Mikroalga Potensi dan Pemanfaatannya untuk Produksi Bio Bahan Bakar*. PT Penerbit IPB Press, 2019.
- [38] J. Van Gerpen, “Biodiesel processing and production,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 86, no. 10, pp. 1097–1107, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.005>. 2005.
- [39] Y. W. Mirzayanti, “Pemurnian gliserol dari proses transesterifikasi minyak jarak dengan katalis sodium hidroksida. In: Seminar Nasional & Teknologi Terapan,” in *Seminar Nasional & Teknologi Terapan. Jurusan Teknik Kimia Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya*, pp. 267–273. 2013.
- [40] M. Rahayu, “Prospek Pengembangan Bio-fuel sebagai Substitusi Bahan Bakar Minyak Teknologi Proses Produksi Biodiesel.”
- [41] M. Is. Anshary, O. Damayanti, and A. Roesyandi, “□Pembuatan Biodiesel dari Minyak Kelapa Sawit dengan Katalis Padat Berpromotor Ganda Dalam Reaktor Fixed Bed,” *J. Tek. Pomits*, vol. 1, no. 1, pp. 1–4, 2012.
- [42] L. Devita, “Biodiesel Sebagai Bioenergi Alternatif Dan Prospektif,” *Agrica Ekstensia*, vol. 9, no. 2, pp. 23–26, 2015.

- [43] Murtiningrum and A. Firdaus, “Perkembangan Biodiesel Di Indonesia Tinjauan Atas Kondisi Saat Ini, Teknologi Produksi & Analisis Prospektif,” *J. PASTI*, vol. IX, no. 1, pp. 35–45, 2016.
- [44] I. Aziz, “Uji Performance Mesin Diesel Menggunakan Biodiesel Dari Minyak Goreng Bekas Isalmi Aziz,” *J. Kim. Val.*, 2010.
- [45] R. . McMichens, *Algae as a Source for Biodiesel*. Paper of University of Maryland Collage Park Lirary (unpublished), 2009.
- [46] A. T. Soegiharto, S. Kurnia, and D. Ariyanti, “Mikroalga: Biomasa Potensial untuk Produksi Biodiesel,” *Energi Alam Terbarukan*, vol. 3, no. 2, pp. 1–9, 2010.
- [47] Y. Gong and M. Jiang, “Biodiesel production with microalgae as feedstock: from strains to biodiesel,” *Biotechnol. Lett.*, vol. 33, no. 7, pp. 1269–1284, Jul. doi: 10.1007/s10529-011-0574-z. 2011.
- [48] J.-Y. Lee, C. Yoo, S.-Y. Jun, C.-Y. Ahn, and H.-M. Oh, “Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 1, Supplement, pp. S75–S77, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.058>. 2010.
- [49] Dianursanti and P. Religia, “Peningkatan Perolehan Hasil Lipid dari *Nannochloropsis* sp Menggunakan Metode Ekstraksi Kombinasi Bligh-dryer dan Osmotic Stress,” 2013.
- [50] A. T. Soegiharto, S. K. Putri, and D. Ariyanti, “Mikroalga: Biomasa Potensial untuk Produksi Biodiesel,” vol. 3, no. 2, pp. 1–9, 2010.
- [51] R. Andrews, K. L., M. C., C. C., and A. S, “Feasibility of capture and utilization of CO₂ from kentucky power plants by algae systems,” University of Kentucky, 2008.
- [52] S. Agustina and S. Herman, “Potensi Mikroalga Sebagai Bahan Kimia Adi,” *Portal Kim. Kemasan*, vol. 3, no. 1, pp. 107–149, 2016.
- [53] A. Soares, J. Marques, R. Lopes, R. Derner, and N. Antoniosi Filho, “Improvement of the Extraction Process for High Commercial Value Pigments from *Desmodesmus* sp. Microalgae,” *J. Braz. Chem. Soc.*, vol. 27, Jun. doi: 10.5935/0103-5053.20160004. 2016.
- [54] P. Curtis, C. Slay, N. Harris, A. Tyukavina, and M. Hansen, “Classifying drivers of global forest loss,” *Science (80-.)*, vol. 361, pp. 1108–1111, Sep. doi: 10.1126/science.aau3445. 2018.
- [55] B. Wicke, R. Sikkema, V. Dornburg, and A. P. C. Faaij, “Exploring land use changes and the role of palm oil production in Indonesia and Malaysia,” *Land use policy*, vol. 28, pp. 193–206, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.landusepol.2010.06.001.
- [56] H. Hultera, L. Prasetyo, and Y. Setiawan, “Spatial Model Of The Deforestation Potential 2020 & 2024 And The Prevention Approach, Kutai Barat District,” *J. Pengelolaan Sumberd. Alam dan Lingkung. (Journal Nat. Resour. Environ. Manag.*, vol. 10, pp. 294–306, Jul. doi: 10.29244/jpsl.10.2.294-306. 2020.
- [57] N. A. Sasongko and R. Noguchi, “Comprehensive evaluation of integrated energy plantation model of palm oil and microalgae based biofuel for sustainable energy production,” *Energy Procedia*, vol. 68, pp. 226–235, doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.251. 2015.

- [58] H. Satriadi, Widayat, Hadiyanto, U. Irzandi, and R. Yonas, “Proses Pengolahan Limbah Industri Kelapa Sawit Dengan Mikroalga Liar,” 2012.
- [59] M. M. A. Nur and A. G. J. Buma, “Opportunities and Challenges of Microalgal Cultivation on Wastewater, with Special Focus on Palm Oil Mill Effluent and the Production of High Value Compounds,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 10, no. 8, pp. 2079–2097, doi: 10.1007/s12649-018-0256-3. 2019.
- [60] P. L. Show, M. S. Y. Tang, D. Nagarajan, T. C. Ling, C.-W. Ooi, and J.-S. Chang, “A Holistic Approach to Managing Microalgae for Biofuel Applications,” *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 18, no. 1. doi: 10.3390/ijms18010215. 2017.
- [61] K. L. Yu, P. L. Show, H. C. Ong, T. C. Ling, W.-H. Chen, and M. A. M. Salleh, “Biochar production from microalgae cultivation through pyrolysis as a sustainable carbon sequestration and biorefinery approach,” *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 20, no. 9, pp. 2047–2055, doi: 10.1007/s10098-018-1521-7. 2018.
- [62] K. L. Yu *et al.*, “Microalgae from wastewater treatment to biochar – Feedstock preparation and conversion technologies,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 150, pp. 1–13, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.060>. 2017.
- [63] A. Rani, H. Rao, A. Kumar, and M. Shruthi, “Eco-Friendly approach for treating Dairy effluent and Lipid estimation Using Microalgae,” *Br. Biotechnol. J.*, vol. 7, no. 1, pp. 33–39, doi: <https://doi.org/10.9734/bbj/2015/16931>. 2015.
- [64] E. Francisco, D. Neves, E. Jacob-Lopes, and T. Franco, “Microalgae as feedstock for biodiesel production: Carbon dioxide sequestration, lipid production and biofuel quality,” *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 85, pp. 395–403, Mar. doi: 10.1002/jctb.2338. 2010.
- [65] S. Zullaikah, A. Utomo, M. Yasmin, L. Ong, and Y. Ju, “Ecofuel conversion technology of inedible lipid feedstocks to renewable fuel,” pp. 237–276. 2019.
- [66] M. Dębowski, M. Zieliński, J. Kazimierowicz, N. Kujawska, and S. Talbierz, “Microalgae Cultivation Technologies as an Opportunity for Bioenergetic System Development—Advantages and Limitations,” *Sustainability*, vol. 12, no. 23. doi: 10.3390/su12239980. 2020.
- [67] A. B. Culaba, A. T. Ubando, P. M. L. Ching, W.-H. Chen, and J.-S. Chang, “Biofuel from Microalgae: Sustainable Pathways,” *Sustainability*, vol. 12, no. 19. doi: 10.3390/su12198009. 2020.