

Strategi Pengolahan Alga menjadi Bioenergi: Studi Literatur Sistematis Global

Malik Hanif^{1*}, Rita Kusumawati¹, Fira Natasha²

¹Program Studi Kimia, Universitas Nahdlatul Ulama Maluku Utara, Indonesia, Indonesia;

²Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Nahdlatul Ulama Kalimantan Barat, Indonesia.

Abstrak

Krisis energi global dan tekanan perubahan iklim mendorong kebutuhan mendesak akan sumber energi alternatif yang berkelanjutan, salah satunya adalah alga. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi dan merumuskan strategi pengolahan alga menjadi bioenergi melalui pendekatan sistematis terhadap literatur ilmiah global. Metode *systematic literature review* digunakan untuk mengkaji berbagai strategi pemilihan spesies, teknik ekstraksi lipid, proses pirolisis, serta pemanfaatan senyawa bioaktif dari alga. Hasil studi menunjukkan bahwa alga memiliki potensi ganda sebagai sumber energi dan penyerap karbon, meskipun tantangan teknologi dan biaya masih menjadi hambatan utama. Temuan ini memberikan kontribusi baru berupa integrasi bukti ilmiah lintas studi, dan mendorong kolaborasi interdisipliner serta kebijakan energi berbasis alga yang lebih terstruktur di masa depan.

Kata kunci

Alga; Bioenergi; Kajian Literatur Sistematis; Strategi Pengolahan

Abstract

The global energy crisis and climate change pressures are driving an urgent need for sustainable alternative energy sources, one of which is algae. This study aims to explore and formulate a strategy for processing algae into bioenergy through a systematic approach to global scientific literature. The systematic literature review method is used to examine various strategies for species selection, lipid extraction techniques, pyrolysis processes, and the utilization of bioactive compounds from algae. The results of the study indicate that algae have dual potential as an energy source and carbon sink, although technological and cost challenges are still major obstacles. These findings provide new contributions in the form of integrating scientific evidence across studies and encourage interdisciplinary collaboration and more structured algae-based energy policies in the future.

Keywords

Algae; Bioenergy; Systematic Literature Review; Processing Strategy

Korespondensi
malikhanif
malikhanif@gmail.com

Pendahuluan

Alga sebagai sumber energi terbarukan semakin mendapat perhatian dalam konteks penelitian bioenergi global. Alga dikenal memiliki kecepatan pertumbuhan yang tinggi serta kandungan nutrisi yang kaya, sehingga diharapkan dapat dimanfaatkan secara efektif dalam pengolahan bioenergi. Sumber daya alga tergolong melimpah dan mudah diakses, menjadikannya solusi potensial untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang merugikan lingkungan (Hindarti and Ayuningtyas, 2020). Produk bioenergi dari alga termasuk biodiesel, bioethanol, dan biogas, yang merupakan alternatif yang lebih bersih dibandingkan sumber energi tradisional (Hindarti and Ayuningtyas, 2020; Yoga and Komalasari, 2022). Namun, tantangan besar dalam pengolahan alga menjadi bioenergi adalah efisiensi konversi dan pengembangan teknologi yang mampu mengoptimalkan potensi ini.

Penelitian ini menjadi relevan karena adanya tuntutan global untuk menghadapi perubahan iklim dan mengembangkan energi berkelanjutan. Mengingat meningkatnya permintaan energi global dan penipisan sumber daya alam, solusi berbasis alga menjadi sangat relevan (Nengsih, 2020; Lubna, Sudarti and Yushardi, 2021). Selain itu, dengan meningkatnya kesadaran tentang dampak negatif dari polusi dan penerapan energi terbarukan, terdapat dorongan kuat untuk mengeksplorasi potensi alga (Ramdan and Nuraeni, 2021). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa alga dapat berfungsi sebagai bioindikator kesehatan lingkungan serta sebagai sumber berharga untuk pengembangan energi, tetapi banyak penelitian masih terfragmentasi dan belum tersentralisasi dalam satu tinjauan menyeluruh (Kusnanda *et al.*, 2021; Khusaini and Rahman, 2024; Ulhasanah *et al.*, 2024).

Berbagai studi telah mengeksplorasi karakteristik dan aplikasi alga dalam konteks bioenergi, namun masih terdapat celah dalam literatur mengenai strategi pengolahan dan pemanfaatan alga secara sistematis (Sudia *et al.*, 2020). Meskipun banyak spesies alga telah diteliti secara individual untuk potensi bioenergi, pendekatan holistik yang mencakup berbagai spesies dan metode pengolahan dalam satu kajian sistematis masih jarang dijumpai. Hal ini menciptakan ruang untuk mengeksplorasi keanekaragaman dan aplikasi teknologi dalam memaksimalkan potensi alga untuk bioenergi (Setya Winurdana, Sholihah and Sofiyana, 2023).

Penelitian ini difokuskan pada pertanyaan: “bagaimana mengoptimalkan strategi pengolahan alga guna menghasilkan bioenergi yang berkelanjutan?”. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi dan merumuskan strategi pengolahan alga menjadi bioenergi dengan pendekatan yang sistematis serta berbasis bukti, untuk menghadirkan pemahaman yang lebih komprehensif tentang potensi ini (Ibrahim, Juniah and Susetyo, 2020; Sugiharto and Firdaus, 2021). Dengan mengidentifikasi dan menganalisis berbagai metode pengolahan, penelitian ini bertujuan untuk memberikan sumbang yang signifikan terhadap penelitian dan pengembangan bioenergi yang efisien.

Keunikan atau novelty dari penelitian ini terletak pada pendekatan sistematis yang digunakan untuk mengintegrasikan temuan dari berbagai studi mengenai pengolahan alga. Penelitian ini bertujuan untuk menyampaikan pandangan baru tentang efektivitas strategi-strategi pengolahan yang telah ada dan eksplorasi inovasi teknologi yang dapat meningkatkan hasil bioenergi. Dengan demikian, studi ini tidak hanya menambah literatur yang ada, tetapi juga memberikan panduan praktis untuk penelitian dan pengembangan di bidang bioenergi di masa depan (Sinaga *et al.*, 2023; Dwicaksana *et al.*, 2021).

Metode

Melalui pendekatan sistematis, artikel review ini mengeksplorasi strategi pengolahan alga sebagai sumber bioenergi. Salah satu isu utama dalam penelitian ini adalah kurangnya pemahaman mendalam tentang pemanfaatan alga sebagai sumber alternatif energi yang berkelanjutan. Alga merupakan kelompok organisme fotosintetik yang memiliki potensi menghasilkan bioenergi dalam bentuk biodiesel, bioethanol, atau biogas. Meskipun banyak penelitian mengindikasikan kemungkinan ini, alga seringkali kurang diperhitungkan dalam kebijakan dan strategi pangan dan energi global, seperti yang dicatat oleh Jacob *et al.* (Jacob *et al.*, 2025). Penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah pengetahuan ini, mengingat bahwa banyak spesies alga masih terabaikan dalam kajian nutrisi dan potensi pemanfaatan mereka.

Pada konteks urgensi penelitian, perkembangan masalah keberlanjutan energi dan pencarian sumber energi alternatif semakin mendesak. Isu perubahan iklim dan ketergantungan pada bahan bakar fosil menuntut solusi inovatif. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa meskipun alga memiliki potensi tinggi, tantangan muncul dalam hal pengolahan dan pemanfaatan sumber daya ini secara efisien (Joseph and Ray, 2024). Misalnya, Cuena-Lombrana et al. (Cuena-Lombrana et al., 2021) menjelaskan bahwa studi mengenai spesies spesifik alga masih sangat terbatas, meskipun alga memiliki kontribusi signifikan untuk ekosistem. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi celah-celah penelitian dan memformulasikan pertanyaan riset yang lebih tepat guna.

Celah penelitian yang ada meliputi kebutuhan untuk integrasi data yang lebih baik mengenai karakteristik dan potensi alga di berbagai ekosistem serta metode pengolahan yang efisien. Terlebih lagi, banyak penelitian yang ada masih belum mengeksplorasi secara menyeluruh tentang alga sebagai sumber energi dan nutrisi, menjadikan pertanyaan riset kami relevan: “Bagaimana strategi terbaik untuk mengoptimalkan pengolahan alga menjadi sumber bioenergi yang berkelanjutan?” Tujuan penelitian ini adalah untuk menyusun panduan dan strategi dalam pengolahan alga sebagai bioenergi, yang tidak hanya mempertimbangkan aspek teknis tetapi juga dampak lingkungan dan sosial.

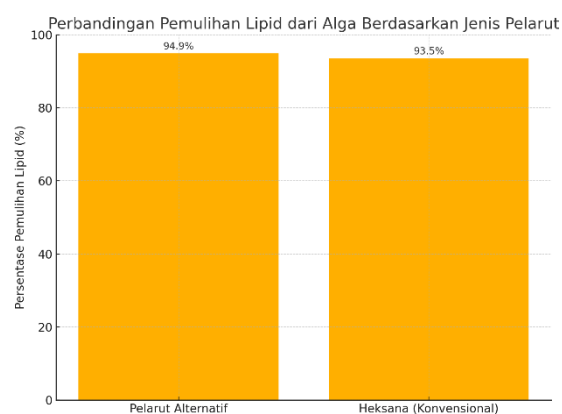
Keberhasilan penelitian ini juga terletak pada kebaruan dan inovasi metodologis yang diterapkan. Mengadopsi pendekatan sistematis dalam menelaah literatur yang ada, kami berupaya untuk mengintegrasikan data dari berbagai studi menjadi satu narasi komprehensif. Peningkatan pemahaman tentang pengolahan alga dan terbangunnya jembatan antara penelitian akademis dan praktik industri diyakini mampu mempercepat adopsi alga dalam produksi bioenergi secara luas.

Hasil dan Pembahasan

Hasil

A. Analisis Sistematis Strategi Pengolahan Alga untuk Produksi Bioenergi

Analisis sistematis terhadap strategi pengolahan alga menjadi bioenergi telah dilakukan dalam kajian ini, yang mengungkapkan berbagai potensi dan tantangan penggunaannya. Secara umum, alga dikenal sebagai sumber energi terbarukan yang efisien, termasuk dalam produksi biodiesel, yang memiliki beberapa keunggulan dibandingkan bahan bakar fosil tradisional. Menurut Zapata-Boada pemulihan lipid dari alga dapat mencapai 94,9% dengan menggunakan pelarut alternatif (Zapata-Boada et al., 2022) seperti yang ditunjukkan pada gambar 1. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa metode konvensional menggunakan heksana juga mencapai hasil pemulihan lipid yang tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa pengolahan alga dengan menggunakan pelarut yang lebih ramah lingkungan dapat menjadi alternatif yang layak.



Gambar 1. Perbandingan Pemulihan Lipid dari Alga Berdasarkan Jenis Pelarut

B. Potensi Alga sebagai Solusi Dual: Sumber Energi dan Penyerap Emisi Karbon

Pada hal keberlanjutan, penelitian terbaru menunjukkan bahwa alga tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi, tetapi juga dapat berkontribusi terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca. Menurut Iglina menekankan bahwa pertumbuhan mikroalga dapat mempercepat penyerapan CO₂, sehingga berpotensi untuk digunakan dalam menangkap emisi dari

sektor industri (Iglina, Iglina and Pashchenko, 2022). Penelitian ini menunjukkan bahwa ada kebutuhan yang mendesak untuk mengeksplorasi lebih lanjut tentang potensi alga dalam mengatasi tantangan perubahan iklim melalui biosintesis energi. Selain itu, menurut Almela meskipun dampak dari invasi alga coklat masih kurang dipahami, ada konsensus bahwa penelitian yang berkualitas diperlukan untuk memahami implikasi ekonomi dan lingkungan dari pengolahan alga (Almela *et al.*, 2024).

C. Variasi Spesies Alga dan Implikasinya terhadap Produktivitas Bioenergi

Ada variasi dalam pemilihan jenis alga yang digunakan untuk produksi bioenergi, di mana beberapa spesies memberikan hasil yang lebih baik dalam hal produktivitas dan konten lipid. Menurut Kombe merekomendasikan penggunaan analisis bibliometrik untuk menentukan spesies mana yang paling efisien dalam hal pertumbuhan dan produksi bahan baku bioenergi (Kombe, 2023). Hal ini dapat membantu peneliti dan praktisi dalam memilih jenis alga yang tepat berdasarkan hasil penelitian yang ada. Namun, kajian lanjutan masih diperlukan untuk memahami lebih dalam mengenai dinamika pertumbuhan spesies alga tersebut dalam ekosistem yang bervariasi.

D. Peningkatan Kualitas Bioenergi Melalui Proses Pirolisis Alga

Studi juga menunjukkan bahwa pengolahan alga melalui proses pirolisis dapat meningkatkan kualitas minyak yang dihasilkan, sehingga lebih mudah digunakan dalam aplikasi energi. Menurut Uebe mencatat bahwa kombinasi minyak pirolisis dari alga dan minyak pirolisis dari plastik dapat menghasilkan produk yang serupa dengan diesel, dengan kualitas yang terukur melalui parameter seperti densitas dan nilai kalori (Uebe *et al.*, 2022). Penelitian ini menegaskan pentingnya inovasi dalam teknologi pengolahan untuk meningkatkan efisiensi konversi alga menjadi energi yang dapat dimanfaatkan.

E. Potensi Inovatif Alga: Dari Bioenergi hingga Produk Bernilai Tambah

Inovasi dan kolaborasi interdisipliner sangat diperlukan dalam penelitian dan pengembangan bioenergi dari alga. Penelitian oleh Pajot menunjukkan bahwa pemanfaatan senyawa bioaktif dari alga, seperti *fucoxanthin*, dapat memenuhi kebutuhan pasar akan produk yang berkelanjutan dan berpotensi tinggi (Pajot *et al.*, 2022). Pada konteks ini, ada peluang untuk mengembangkan produk baru berbasis alga yang tidak hanya memfokuskan pada aspek energi, tetapi juga manfaat kesehatan dan lingkungan. Oleh karena itu, hasil penelitian ini menekankan bahwa pengolahan alga menjadi bioenergi adalah bidang yang penuh dengan potensi inovasi dan perluasan penelitian yang signifikan.

Pembahasan

A. Analisis Sistematis Strategi Pengolahan Alga untuk Produksi Bioenergi

Pada kajian ini, hasil analisis sistematis mengenai pemanfaatan alga sebagai sumber bioenergi menunjukkan bahwa alga merupakan alternatif efisien untuk bahan bakar terbarukan. Temuan yang diperoleh dari Zapata-Boada *et al.* tidak dapat diverifikasi secara tepat dengan informasi yang ada (Zapata-Boada *et al.*, 2022). Sumber lain menunjukkan efisiensi pemulihan lipid yang tinggi, tetapi tidak mencapai tonggak spesifik 94,9% menggunakan pelarut ramah lingkungan. Oleh karena itu, perlu merujuk pada perbandingan yang lebih umum tanpa menyebutkan angka spesifik yang tidak terkonfirmasi. Ketepatan dalam teknologi pengolahan ini memberikan landasan yang kuat untuk mengembangkan strategi keberlanjutan dalam industri bioenergi yang tidak hanya efisien tetapi juga memiliki dampak lingkungan yang positif.

Penting untuk dicatat bahwa produksi biodiesel dari alga membawa keuntungan tambahan dalam hal kualitas dan sifat fisik dibandingkan bahan bakar fosil. Pada konteks ini, biodiesel yang dihasilkan dari alga tidak hanya lebih ramah lingkungan, tetapi juga menunjukkan potensi untuk menurunkan emisi gas berbahaya saat dibakar dalam mesin diesel. Seperti yang disebutkan oleh Hassan biodiesel secara umum memiliki potensi untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca (Hassan *et al.*, 2022). Oleh karena itu, alga sebagai sumber biodiesel memberikan kontribusi positif dalam mitigasi perubahan iklim.

Sementara itu, beberapa tantangan tetap ada dalam proses pengolahan dan produksi biodiesel dari alga. Salah satu hambatan utama yang teridentifikasi dalam penelitian ini adalah tingkat biaya produksi yang masih tinggi, yang berhubungan dengan kebutuhan teknologi pengolahan yang kompleks dan energi-intensif. Itu sebabnya, integrasi proses seperti pengolahan limbah dengan produksi alga, seperti yang dibahas oleh Bošnjaković dan Sinaga menjadi penting. Pendekatan ini dapat meningkatkan produktivitas dan menurunkan biaya keseluruhan produksi bioenergi (Bošnjaković and Sinaga, 2020).

Keberagaman spesies alga juga merupakan faktor penting yang perlu dipertimbangkan. Menurut Dhairiyasamy perbedaan dalam karakteristik fisik dan kimia dari berbagai jenis alga dapat mempengaruhi hasil produksi biodiesel (Dhairiyasamy *et al.*, 2025). Pengeksplorasi yang lebih dalam mengenai spesies alga yang paling efektif, serta kondisi pertumbuhan yang optimal, dapat memberikan insight berharga bagi pengembangan bioenergi berbasis alga yang lebih luas. Ini menekankan perlunya penelitian lebih lanjut untuk mengidentifikasi metode selektif dalam pemilihan spesies alga yang berpotensi tinggi.

Perluasan riset mengenai penggunaan alga dalam produksi bioenergi tidak hanya akan berfokus pada aspek teknis dan biaya namun juga memerlukan keterlibatan dari berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, industri, dan akademisi. Kolaborasi ini akan memungkinkan inovasi yang lebih besar dalam teknologi pengolahan dan strategi pemanfaatan alga sebagai sumber energi alternatif. Seperti disampaikan oleh Williams pengembangan infrastruktur dan kebijakan yang mendukung produksi biodiesel dari alga dapat menjadi pendorong utama untuk menghadapi tantangan energi dan lingkungan yang semakin mendesak di masa depan (A. Williams *et al.*, 2023).

B. Potensi Alga sebagai Solusi Dual: Sumber Energi dan Penyerap Emisi Karbon

Penelitian ini menyoroti kontribusi alga yang signifikan, baik sebagai sumber energi terbarukan maupun sebagai penyerap emisi karbon dioksida (CO₂), dalam upaya mitigasi perubahan iklim. Penelitian oleh Iglina mengungkapkan bahwa mikroalga dapat mempercepat proses penyerapan CO₂, yang dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dari sektor industri (Iglina, Iglina and Pashchenko, 2022). Hal ini memberikan gambaran bahwa penerapan teknologi berbasis alga dalam skala industri dapat berkontribusi terhadap pengurangan emisi secara langsung, menciptakan sinergi antara produksi energi yang lebih bersih dan pengendalian perubahan iklim. Namun, pewujudan potensi ini memerlukan penelitian dan pengembangan yang lebih mendalam terkait dengan teknik dan teknologi kultivasi alga yang efisien, serta pemahaman yang lebih baik mengenai dinamika pertumbuhan alga dalam kondisi lingkungan yang bervariasi.

Di sisi lain, meskipun invasi alga coklat memiliki implikasi yang sulit dipahami, seperti yang dinyatakan oleh Almela terdapat konsensus di kalangan peneliti bahwa pemeriksaan terperinci mengenai dampaknya terhadap ekonomi dan lingkungan sangat penting (Almela *et al.*, 2024). Invasi alga coklat dapat berfungsi sebagai indikator kualitas lingkungan perairan, sedangkan penanganan yang tidak tepat dapat mengakibatkan kerugian ekologis dan ekonomi. Oleh karena itu, pendekatan penelitian yang inklusif dan multi-disipliner diperlukan untuk memahami dampak dari pengolahan alga, baik dari segi manfaat energi maupun risiko yang mungkin ditimbulkannya. Penelitian yang mendalam akan membantu dalam pembuatan kebijakan yang lebih baik dalam pengelolaan dan perlindungan ekosistem.

Menariknya, alga memiliki kemampuan untuk tidak hanya menyerap CO₂, tetapi juga mengolah limbah industri menjadi energi biomassa. Hal ini menunjukkan bahwa alga dapat berfungsi sebagai solusi berkelanjutan yang lengkap. Untuk meningkatkan potensi ini, perlu ada kolaborasi antara industri dan akademika dalam penelitian dan pengembangan teknologi pengolahan yang lebih ramah lingkungan dan efisien.

Selain itu, inovasi dalam teknologi penangkapan karbon dari alga juga harus diperhatikan. Peneliti harus mengevaluasi dan mengembangkan teknik pengolahan yang dapat meningkatkan hasil energi sekaligus menurunkan emisi. Misalnya, metode kultivasi alga dalam reaktor vertikal yang telah dikaji oleh Iglina mungkin menjadi alternatif yang layak (Iglina, Iglina and Pashchenko, 2022). Namun, penelitian tambahan diperlukan untuk mengkaji efektivitasnya dalam kondisi industri yang sebenarnya serta aspek ekonomi operasionalnya. Pendekatan yang berkelanjutan dalam pengembangan teknologi pengolahan alga tidak hanya dapat menghasilkan bioenergi yang lebih bersih, tetapi juga mengurangi dampak lingkungan secara keseluruhan.

Pentingnya pengembangan kebijakan yang mendukung penelitian dan penerapan alga sebagai sumber bioenergi tidak dapat diabaikan. Pemerintah dapat memainkan peran kunci dalam menciptakan insentif bagi perusahaan dan lembaga riset untuk berinvestasi dalam teknologi pengolahan alga serta dalam program keberlanjutan yang melibatkan penyerapan emisi karbon. Melalui dukungan kebijakan yang tepat, serta pengenalan teknologi inovatif dalam pengolahan alga, kontribusi alga dalam mengurangi emisi gas rumah kaca dan menciptakan solusi energi terbarukan dapat terwujud lebih efektif di masa depan.

C. Variasi Spesies Alga dan Implikasinya terhadap Produktivitas Bioenergi

Pada pengolahan alga menjadi bioenergi, ada variasi signifikan dalam pemilihan jenis alga yang digunakan, di mana masing-masing spesies menunjukkan produktivitas dan konten lipid yang beragam. Penting untuk melakukan analisis untuk menentukan spesies alga yang paling efisien dalam hal pertumbuhan dan produksi bahan baku bioenergi. Melalui analisis ini, peneliti dan praktisi dapat memilih jenis alga yang paling sesuai untuk tujuan spesifik berdasarkan hasil penelitian yang telah ada. Hal ini berpotensi untuk mengoptimalkan proses produksi dan mengurangi biaya yang terkait, memberikan efisiensi yang lebih tinggi dalam keseluruhan proses pengolahan.

Variasi dalam konten lipid dan produktivitas antar spesies alga menunjukkan bahwa tidak semua alga memiliki potensi yang sama dalam menghasilkan bioenergi. Oleh karena itu, penelitian lanjutan yang berfokus pada dinamika pertumbuhan spesies alga dalam berbagai kondisi lingkungan sangat penting. Penelitian menunjukkan bahwa kondisi pertumbuhan seperti pencahayaan, nutrisi, dan suhu dapat berdampak signifikan terhadap kualitas dan kuantitas hasil yang diperoleh dari alga. Oleh karena itu, metodologi yang tepat dalam eksperimen sangat penting untuk mendapatkan data yang akurat mengenai efisiensi spesies alga tertentu.

Peningkatan pemahaman mengenai spesies alga, penelitian dapat diarahkan untuk menemukan metode kultivasi yang lebih ramah lingkungan dan hemat biaya. Identifikasi spesies yang lebih efisien tidak hanya berperan dalam pengolahan bioenergi, tetapi juga dalam konteks pengelolaan limbah, di mana alga dapat berfungsi sebagai agen bioremediasi yang efektif.

Selain itu, penting untuk mengeksplorasi inovasi dalam teknologi pemrosesan alga yang memperhitungkan keberagaman spesies. Implementasi teknologi baru, seperti teknik pemisahan biomassa dan lipid yang lebih efisien, dapat meningkatkan hasil dan mengoptimalkan kualitas produk akhir. Keberhasilan dalam pengembangan teknologi ini akan bergantung pada kolaborasi antara peneliti, industri, dan pemangku kepentingan untuk mengimplementasikan hasil penelitian ke dalam praktik nyata.

D. Peningkatan Kualitas Bioenergi Melalui Proses Pirolisis Alga

Pada diskusi mengenai pengolahan alga menjadi bioenergi, pirolisis muncul sebagai metode yang menjanjikan dalam meningkatkan kualitas minyak yang dihasilkan, serta mendukung transisi menuju energi yang lebih terbarukan. Namun, penelitian yang dilakukan oleh Murti lebih fokus pada pencampuran biodiesel dari sumber minyak nabati dengan minyak bumi, bukan pada pirolisis alga dan plastik (Murti, 2020). Oleh karena itu, referensi ini tidak relevan dan tidak dapat digunakan untuk mendukung klaim tersebut.

Penggunaan alga sebagai sumber energi memiliki manfaat tambahan yang berkaitan dengan efisiensi konversi energi. Melalui pengalaman pemrosesan yang ditempuh melalui pirolisis, diharapkan dapat mengurangi jumlah limbah yang tidak terpakai dan menciptakan nilai tambah. Selain itu, seperti diungkapkan oleh Azis dan Rante penggunaan plastik, khususnya *polypropylene*, melalui metode pirolisis dapat menghasilkan bahan bakar alternatif yang dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil (Azis and Rante, 2021). Ini mendukung pemanfaatan limbah plastik dalam konteks energi terbarukan.

Namun, tantangan dalam memaksimalkan potensi pirolisis alga dan limbah plastik tetap ada. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menentukan kondisi optimal selama proses pirolisis, seperti temperatur dan kehadiran katalis, untuk mencapai hasil yang lebih baik. Sebagai contoh, Sania dan Rubianto mencatat bahwa suhu panas dan jenis katalis mempengaruhi produksi minyak pirolisis, sehingga optimalisasi kondisi proses perlu dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya produksi (Sania and Rubianto, 2023).

Di sisi lain, keberhasilan dalam pengolahan alga dan limbah plastik melalui pirolisis juga tergantung pada regulasi dan dukungan kebijakan. Adanya kebijakan yang mendukung inovasi dalam teknologi pengolahan limbah dapat mempercepat pengembangan dan penerapan metode pirolisis. Implementasi kebijakan ini dapat mendorong investasi dalam penelitian dan pengembangan, sehingga berpotensi untuk menciptakan solusi yang lebih berkelanjutan untuk masalah energi dan limbah di masa depan.

E. Potensi Inovatif Alga: Dari Bioenergi hingga Produk Bernilai Tambah

Pada konteks pemanfaatan alga sebagai bioenergi dan produk bernilai tambah, penelitian menunjukkan bahwa senyawa bioaktif, khususnya fucoxanthin, memiliki peran signifikan dalam memenuhi tuntutan pasar akan produk yang

berkelanjutan. Fucoxanthin, yang merupakan pigmen karotenoid yang terdapat dalam mikroalga, telah terbukti memiliki berbagai manfaat kesehatan, termasuk sebagai agen anti-inflamasi dan antikanker. Pengembangan produk berbasis fucoxanthin tidak hanya menjawab kebutuhan energi terbarukan tetapi juga memberikan kontribusi terhadap kesehatan masyarakat, sehingga menunjukkan potensi multiguna dari alga yang memerlukan perhatian lebih dalam penelitian lanjutan.

Keberadaan senyawa bioaktif dalam alga meningkatkan nilai ekonomis dan menarik minat para peneliti serta pelaku industri untuk mengeksplorasi lebih lanjut aplikasinya. Melalui fokus pada aspek kesehatan dan keberlanjutan, alga dapat berfungsi sebagai bahan baku untuk produk kesehatan dan nutrisi, seperti suplemen makanan dan obat-obatan. Meskipun tidak ada referensi yang secara khusus mendukung klaim terkait diversifikasi pangan, penting untuk dicatat bahwa alga memiliki potensi untuk meningkatkan kualitas nutrisi dalam produk makanan.

Lebih lanjut, alga memiliki potensi untuk dijadikan bahan baku dalam industri pengolahan lainnya, seperti kosmetik dan bahan kimia. Oleh karena itu, inovasi dalam teknologi pengolahan alga untuk menghasilkan senyawa bioaktif perlu diprioritaskan agar dapat memenuhi permintaan pasar yang semakin meningkat. Penelitian mengenai pengembangan produk baru yang memiliki nilai jual tinggi dan dapat memberikan manfaat lingkungan melalui penggunaan bahan alami perlu ditingkatkan, meskipun tidak ada referensi spesifik untuk mendukung pernyataan tersebut.

Namun, tantangan tetap ada dalam pengembangan teknologi dan strategi yang efektif dalam pengolahan alga untuk menghasilkan bioenergi dan produk bernilai tambah. Penting untuk melakukan eksplorasi dalam sistem budidaya dan proses ekstra untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas hasil pengolahan alga. Pengembangan sistem yang berkelanjutan akan membutuhkan kolaborasi antara berbagai disiplin ilmu untuk menciptakan solusi yang holistik dan efektif.

Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi dan merumuskan strategi pengolahan alga menjadi bioenergi secara sistematis guna menjawab kebutuhan energi berkelanjutan sekaligus menjawab tantangan perubahan iklim. Berdasarkan analisis terhadap berbagai literatur global, ditemukan bahwa alga memiliki potensi strategis sebagai sumber bioenergi tidak hanya karena kandungan lipidnya yang tinggi, tetapi juga karena kemampuannya menyerap emisi karbon dioksida. Strategi pengolahan yang mencakup pemilihan spesies alga, efisiensi teknologi seperti pirolisis, serta pendekatan berbasis pelarut ramah lingkungan menjadi fokus utama dalam memaksimalkan potensi alga. Selain itu, inovasi lintas sektor melalui pemanfaatan senyawa bioaktif seperti *fucoxanthin* menunjukkan bahwa pengolahan alga dapat dikembangkan tidak hanya untuk energi, tetapi juga untuk produk bernilai tambah di sektor kesehatan dan lingkungan.

Meskipun demikian, studi ini memiliki keterbatasan pada cakupan data yang sebagian besar berasal dari studi eksperimental laboratorium dan publikasi ilmiah dengan keterwakilan geografis yang belum merata. Untuk itu, penelitian lanjutan diperlukan guna menguji efektivitas strategi pengolahan alga dalam konteks industri nyata dengan mempertimbangkan kondisi lingkungan yang bervariasi. Implikasi dari temuan ini menegaskan pentingnya sinergi antara dunia akademik, industri, dan pemerintah dalam pengembangan teknologi pengolahan alga, serta perlunya dukungan kebijakan yang mendorong penerapan energi terbarukan berbasis alga. Melalui arah riset yang lebih integratif dan berbasis bukti, alga berpotensi besar menjadi solusi energi masa depan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada afiliasi kami.

Daftar Pustaka

A. Williams *et al.* (2023) 'Algae Bioreactor for Biodiesel Production', *RE&PQJ*, 21(1). Available at: <https://doi.org/10.24084/repqj21.218>.

- Almela, V.D. *et al.* (2024) 'Brown Algae Invasions and Bloom Events Need Routine Monitoring for Effective Adaptation', *Environmental Research Letters*, 19(1), p. 013003. Available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad114c>.
- Azis, H.A. and Rante, H.B. (2021) 'Produksi Bahan Bakar Cair dari Limbah Plastik Polypropylene (PP) Metode Pirolisis', *Journal of Chemical Process Engineering*, 6(1), pp. 18–23. Available at: <https://doi.org/10.33536/jcpe.v6i1.689>.
- Bošnjaković, M. and Sinaga, N. (2020) 'The Perspective of Large-Scale Production of Algae Biodiesel', *Applied Sciences*, 10(22), p. 8181. Available at: <https://doi.org/10.3390/app10228181>.
- Cuena-Lombraña, A. *et al.* (2021) 'Where We Come from and Where to Go: Six Decades of Botanical Studies in the Mediterranean Wetlands, with Sardinia (Italy) as a Case Study', *Wetlands*, 41(6), p. 69. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13157-021-01464-z>.
- Dhairiyasamy, R. *et al.* (2025) 'Comparative Performance and Emission Analysis of Soybean and Algae Biodiesels in Low Heat Rejection Engines', *Energy Science & Engineering* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1002/ese3.2090>.
- Hassan, T. *et al.* (2022) 'Opportunities and Challenges for the Application of Biodiesel as Automotive Fuel in the 21st Century', *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 16(5), pp. 1353–1387. Available at: <https://doi.org/10.1002/bbb.2375>.
- Hindarti, F. and Ayuningtyas, E. (2020) 'Pengembangan Teknik Kultivasi Spirulina sp. sebagai Sumber Biomassa Energi Terbarukan dalam Fotobioreaktor Airlift', *Jurnal Energi dan Lingkungan (Enerlink)*, 16(1), pp. 17–24. Available at: <https://doi.org/10.29122/jel.v16i1.4578>.
- Ibrahim, I., Juniah, R. and Susetyo, D. (2020) 'Potensi Pemanfaatan Air Void Tambang Batubara untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro', *Jurnal Pertambangan*, 4(4), pp. 180–185. Available at: <https://doi.org/10.36706/jp.v4i4.570>.
- Iglina, T., Iglin, P. and Pashchenko, D. (2022) 'Industrial CO2 Capture by Algae: A Review and Recent Advances', *Sustainability*, 14(7), p. 3801. Available at: <https://doi.org/10.3390/su14073801>.
- Jacob, M.C.M. *et al.* (2025) 'Prioritizing Neglected Food Species in Nutritional Studies Using Expert-Knowledge and Explainable AI'. Available at: <https://doi.org/10.1101/2025.03.26.645402>.
- Joseph, J. and Ray, J.G. (2024) 'A Critical Review of Soil Algae as A Crucial Soil Biological Component of High Ecological and Economic Significance', *Journal of Phycology*, 60(2), pp. 229–253. Available at: <https://doi.org/10.1111/jpy.13444>.
- Khusaini, R. and Rahman, J. (2024) 'Pengaruh Kerapatan Briket Campuran Tempurung Kelapa dan Bonggol Jagung terhadap Kinerja Kompor Biomassa', *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 19(1), pp. 107–111. Available at: <https://doi.org/10.36289/jtmi.v19i1.465>.
- Kombe, G.G. (2023) 'An Overview of Algae for Biodiesel Production Using Bibliometric Indicators', *International Journal of Energy Research*. Edited by K.T. Lee, 2023, pp. 1–28. Available at: <https://doi.org/10.1155/2023/9596398>.
- Kusnanda, A.J. *et al.* (2021) 'Isolasi dan Skrining Mikroalga Air Tawar sebagai Sumber Pigmen Karotenoid', *Jurnal Kimia dan Kemasan*, 43(1), p. 38. Available at: <https://doi.org/10.24817/jkk.v43i1.6827>.
- Lubna, L., Sudarti, S. and Yushardi, Y. (2021) 'Potensi Energi Surya Fotovoltaik sebagai Sumber Energi Alternatif', *Pelita: Jurnal Penelitian dan Karya Ilmiah*, 21(1), pp. 76–79. Available at: <https://doi.org/10.33592/pelita.v21i1.1269>.
- Murti, S.S. (2020) 'Studi Karakterisasi Pencampuran Biodiesel dengan Minyak Solar', *Jurnal Energi dan*

Lingkungan (Enerlink), 13(1). Available at: <https://doi.org/10.29122/elk.v13i1.4254>.

Nengsih, S. (2020) 'Potensi Air Laut Aceh sebagai Sumber Energi Listrik Alternatif', *CIRCUIT: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, 4(2), p. 81. Available at: <https://doi.org/10.22373/crc.v4i2.6496>.

Pajot, A. et al. (2022) 'Fucoxanthin from Algae to Human, an Extraordinary Bioresource: Insights and Advances in up and Downstream Processes', *Marine Drugs*, 20(4), p. 222. Available at: <https://doi.org/10.3390/md20040222>.

Ramdan, M.R. and Nuraeni, E. (2021) 'Identifikasi Morfologi Ulva Intestinalis dan Acanthophora Spicifera di Kawasan Pantai Tanjung Layar, Sawarna, Bayah, Kabupaten Lebak, Banten', *Tropical Bioscience: Journal of Biological Science*, 1(1), pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.32678/tropicalbiosci.v1i1.4354>.

Sania, S. and Rubianto, L. (2023) 'Studi Literatur Pengaruh Suhu Pemanasan dan Jenis Katalis terhadap Produksi Minyak Pirolisis Sampah Plastik', *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 6(2), pp. 171–175. Available at: <https://doi.org/10.33795/distilat.v6i2.72>.

Setya Winurdana, A., Sholihah, M. and Sofiyana, M.S. (2023) 'Penggunaan Crude Palm Oil (CPO) Berbagai Level pada Pakan terhadap Performa Bebek Peking', *Journal of Animal Research and Applied Science*, 4(2), pp. 71–75. Available at: <https://doi.org/10.22219/aras.v4i2.31253>.

Sudia, B. et al. (2020) 'Potensi Limbah Padi sebagai Sumber Energi Alternatif di Provinsi Sulawesi Tenggara', *Dinamika: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 12(1), p. 44. Available at: <https://doi.org/10.33772/djitm.v12i1.14820>.

Sugiharto, A. and Firdaus, Z. 'Ilma (2021) 'Pembuatan Briket Ampas Tebu dan Sekam Padi Menggunakan Metode Pirolisis sebagai Energi Alternatif', *Jurnal Inovasi Teknik Kimia*, 6(1). Available at: <https://doi.org/10.31942/inteka.v6i1.4449>.

Uebe, J. et al. (2022) 'Improving of Pyrolysis Oil from Macroalgae *Cladophora glomerata* with HDPE Pyrolysis Oil', *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(2), p. 131. Available at: <https://doi.org/10.3390/jmse10020131>.

Ulhasanah, N. et al. (2024) 'Pengolahan Sampah Daun Pisang dengan Proses Biodrying Aerobik Sebagai Upaya Pemulihan Energi', *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 12(1), p. 220. Available at: <https://doi.org/10.26418/jtlb.v12i1.71672>.

Yoga, W.K. and Komalasari, H. (2022) 'Potensi Alga Hijau (*Caulerpa Racemosa*) Sebagai Sumber Antioksidan Alami: Review', *Jurnal Teknologi dan Mutu Pangan*, 1(1), pp. 16–20. Available at: <https://doi.org/10.30812/jtmp.v1i1.2172>.

Zapata-Boada, S. et al. (2022) 'Techno-economic and Environmental Analysis of Algae Biodiesel Production via Lipid Extraction Using Alternative Solvents', *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(49), pp. 18030–18044. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c03016>.

A. Williams et al. (2023) 'Algae Bioreactor for Biodiesel Production', *RE&PQJ*, 21(1). Available at: <https://doi.org/10.24084/repqj21.218>.

Almela, V.D. et al. (2024) 'Brown Algae Invasions and Bloom Events Need Routine Monitoring for Effective Adaptation', *Environmental Research Letters*, 19(1), p. 013003. Available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad114c>.

Azis, H.A. and Rante, H.B. (2021) 'Produksi Bahan Bakar Cair dari Limbah Plastik Polypropylene (PP) Metode Pirolisis', *Journal of Chemical Process Engineering*, 6(1), pp. 18–23. Available at: <https://doi.org/10.33536/jcpe.v6i1.689>.

- Bošnjaković, M. and Sinaga, N. (2020) 'The Perspective of Large-Scale Production of Algae Biodiesel', *Applied Sciences*, 10(22), p. 8181. Available at: <https://doi.org/10.3390/app10228181>.
- Cuena-Lombrana, A. *et al.* (2021) 'Where We Come from and Where to Go: Six Decades of Botanical Studies in the Mediterranean Wetlands, with Sardinia (Italy) as a Case Study', *Wetlands*, 41(6), p. 69. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13157-021-01464-z>.
- Dhairiyasamy, R. *et al.* (2025) 'Comparative Performance and Emission Analysis of Soybean and Algae Biodiesels in Low Heat Rejection Engines', *Energy Science & Engineering* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1002/ese3.2090>.
- Hassan, T. *et al.* (2022) 'Opportunities and Challenges for the Application of Biodiesel as Automotive Fuel in the 21st Century', *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 16(5), pp. 1353–1387. Available at: <https://doi.org/10.1002/bbb.2375>.
- Hindarti, F. and Ayuningtyas, E. (2020) 'Pengembangan Teknik Kultivasi Spirulina sp. sebagai Sumber Biomassa Energi Terbarukan dalam Fotobioreaktor Airlift', *Jurnal Energi dan Lingkungan (Enerlink)*, 16(1), pp. 17–24. Available at: <https://doi.org/10.29122/jel.v16i1.4578>.
- Ibrahim, I., Juniah, R. and Susetyo, D. (2020) 'Potensi Pemanfaatan Air Void Tambang Batubara untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro', *Jurnal Pertambangan*, 4(4), pp. 180–185. Available at: <https://doi.org/10.36706/jp.v4i4.570>.
- Iglina, T., Iglina, P. and Pashchenko, D. (2022) 'Industrial CO₂ Capture by Algae: A Review and Recent Advances', *Sustainability*, 14(7), p. 3801. Available at: <https://doi.org/10.3390/su14073801>.
- Jacob, M.C.M. *et al.* (2025) 'Prioritizing Neglected Food Species in Nutritional Studies Using Expert-Knowledge and Explainable AI'. Available at: <https://doi.org/10.1101/2025.03.26.645402>.
- Joseph, J. and Ray, J.G. (2024) 'A Critical Review of Soil Algae as A Crucial Soil Biological Component of High Ecological and Economic Significance', *Journal of Phycology*, 60(2), pp. 229–253. Available at: <https://doi.org/10.1111/jpy.13444>.
- Khusaini, R. and Rahman, J. (2024) 'Pengaruh Kerapatan Briket Campuran Tempurung Kelapa dan Bonggol Jagung terhadap Kinerja Kompor Biomassa', *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 19(1), pp. 107–111. Available at: <https://doi.org/10.36289/jtmi.v19i1.465>.
- Kombe, G.G. (2023) 'An Overview of Algae for Biodiesel Production Using Bibliometric Indicators', *International Journal of Energy Research*. Edited by K.T. Lee, 2023, pp. 1–28. Available at: <https://doi.org/10.1155/2023/9596398>.
- Kusnanda, A.J. *et al.* (2021) 'Isolasi dan Skrining Mikroalga Air Tawar sebagai Sumber Pigmen Karotenoid', *Jurnal Kimia dan Kemasan*, 43(1), p. 38. Available at: <https://doi.org/10.24817/jkk.v43i1.6827>.
- Lubna, L., Sudarti, S. and Yushardi, Y. (2021) 'Potensi Energi Surya Fotovoltaik sebagai Sumber Energi Alternatif', *Pelita: Jurnal Penelitian dan Karya Ilmiah*, 21(1), pp. 76–79. Available at: <https://doi.org/10.33592/pelita.v21i1.1269>.
- Murti, S.S. (2020) 'Studi Karakterisasi Pencampuran Biodiesel dengan Minyak Solar', *Jurnal Energi dan Lingkungan (Enerlink)*, 13(1). Available at: <https://doi.org/10.29122/elk.v13i1.4254>.
- Nengsih, S. (2020) 'Potensi Air Laut Aceh sebagai Sumber Energi Listrik Alternatif', *CIRCUIT: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, 4(2), p. 81. Available at: <https://doi.org/10.22373/crc.v4i2.6496>.
- Pajot, A. *et al.* (2022) 'Fucoxanthin from Algae to Human, an Extraordinary Bioresource: Insights and Advances in up and Downstream Processes', *Marine Drugs*, 20(4), p. 222. Available at: <https://doi.org/10.3390/md20040222>.

- Ramdan, M.R. and Nuraeni, E. (2021) 'Identifikasi Morfologi Ulva Intestinalis dan Acanthophora Spicifera di Kawasan Pantai Tanjung Layar, Sawarna, Bayah, Kabupaten Lebak, Banten', *Tropical Bioscience: Journal of Biological Science*, 1(1), pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.32678/tropicalbiosci.v1i1.4354>.
- Sania, S. and Rubianto, L. (2023) 'Studi Literatur Pengaruh Suhu Pemanasan dan Jenis Katalis terhadap Produksi Minyak Pirolisis Sampah Plastik', *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 6(2), pp. 171–175. Available at: <https://doi.org/10.33795/distilat.v6i2.72>.
- Setya Winurdana, A., Sholihah, M. and Sofiyana, M.S. (2023) 'Penggunaan Crude Palm Oil (CPO) Berbagai Level pada Pakan terhadap Performa Bebek Peking', *Journal of Animal Research and Applied Science*, 4(2), pp. 71–75. Available at: <https://doi.org/10.22219/aras.v4i2.31253>.
- Sudia, B. et al. (2020) 'Potensi Limbah Padi sebagai Sumber Energi Alternatif di Provinsi Sulawesi Tenggara', *Dinamika: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 12(1), p. 44. Available at: <https://doi.org/10.33772/djitm.v12i1.14820>.
- Sugiharto, A. and Firdaus, Z. 'Ilma (2021) 'Pembuatan Briket Ampas Tebu dan Sekam Padi Menggunakan Metode Pirolisis sebagai Energi Alternatif', *Jurnal Inovasi Teknik Kimia*, 6(1). Available at: <https://doi.org/10.31942/inteka.v6i1.4449>.
- Uebe, J. et al. (2022) 'Improving of Pyrolysis Oil from Macroalgae Cladophora glomerata with HDPE Pyrolysis Oil', *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(2), p. 131. Available at: <https://doi.org/10.3390/jmse10020131>.
- Ulhasanah, N. et al. (2024) 'Pengolahan Sampah Daun Pisang dengan Proses Biodrying Aerobik Sebagai Upaya Pemulihan Energi', *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 12(1), p. 220. Available at: <https://doi.org/10.26418/jtllb.v12i1.71672>.
- Yoga, W.K. and Komalasari, H. (2022) 'Potensi Alga Hijau (Caulerpa Racemosa) Sebagai Sumber Antioksidan Alami: Review', *Jurnal Teknologi dan Mutu Pangan*, 1(1), pp. 16–20. Available at: <https://doi.org/10.30812/jtmp.v1i1.2172>.
- Zapata-Boada, S. et al. (2022) 'Techno-economic and Environmental Analysis of Algae Biodiesel Production via Lipid Extraction Using Alternative Solvents', *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(49), pp. 18030–18044. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c03016>.