

TINJAUAN BIO-SUPPLY CHAIN BIODIESEL BERBASIS FITOPLANKTON DENGAN ANALISIS LOKASI BUDIDAYA SEBAGAI TAHAP AWAL PERANCANGAN RANTAI PASOK

Benhard Roni Tua Nababan*, Hery Irawan

*Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Riau Kepulauan,
Jalan Letjend Suprpto, Bukit Tempayan, Kepulauan Riau, Indonesia 29425*

Abstrak

Kebutuhan akan sumber energi terbarukan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan mendorong penggunaan bahan bakar renewable seperti bahan bakar berbasis fitoplankton sebagai alternatif bahan bakar masa depan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji model bio-supply chain yang terintegrasi dan optimal dalam mendukung produksi biodiesel tersebut di Indonesia. Pendekatan yang digunakan bersifat kualitatif-deskriptif melalui studi literatur dan analisis konseptual, dengan fokus pada pengembangan sistem rantai pasok yang berkelanjutan, efisien, dan sesuai dengan konteks nasional. Pengelolaan dan optimasi rantai pasok biomassa dianalisis berdasarkan pengambilan keputusan secara hierarkis pada tiga level utama: strategis, taktis, dan operasional. Pada level strategis, pengambilan keputusan jangka panjang meliputi pemilihan konfigurasi rantai pasok, alokasi sumber daya fitoplankton, investasi infrastruktur pengolahan, serta perencanaan kapasitas produksi. Level taktis berfungsi menjembatani strategi dengan operasional melalui pengaturan penjadwalan produksi, pengelolaan persediaan, serta perencanaan distribusi dan transportasi. Sementara itu, level operasional berfokus pada pelaksanaan harian, seperti waktu panen fitoplankton, pengoperasian fasilitas pengolahan, pengiriman biomassa, serta pengendalian kualitas dan penanganan gangguan di lapangan secara langsung. Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan keputusan strategis pada setiap tahap rantai pasok dapat meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Studi kasus pemilihan Teluk Penyau sebagai lokasi budidaya, penerapan sistem kultivasi mixotrofik, dan pemanfaatan teknologi floating photobioreactor (PBR) menjadi contoh strategi yang mendukung produktivitas dan keberlanjutan produksi biodiesel berbasis fitoplankton. Temuan ini memberikan kerangka awal untuk pengembangan sistem bio-supply chain yang terintegrasi di sektor energi terbarukan.

Kata kunci: *bio-supply chain; fitoplankton; biodiesel*

Abstract

[Bio-Supply Chain Optimization: an Integrated Renewable Energy Supply Chain System as The Implementation of Phytoplankton-Based Biodiesel] *The growing demand for renewable and environmentally friendly energy sources has driven the use of renewable fuels such as phytoplankton-based fuels as alternative fuels for the future. This study aims to examine an integrated and optimized bio-supply chain model to support the production of phytoplankton-based biodiesel in Indonesia. A qualitative-descriptive approach was employed through literature review and conceptual analysis, focusing on the development of a sustainable and efficient supply chain system relevant to national conditions. Biomass supply chain management and optimization were analyzed using a hierarchical decision-making framework at three levels: strategic, tactical, and operational. At the strategic level, long-term decisions include the selection of supply chain configurations, allocation of phytoplankton resources, investment in processing infrastructure, and production capacity planning. The results indicate that applying strategic decisions across all stages of the biomass supply chain significantly enhances overall system efficiency. A case study involving the selection of Teluk Penyau as the cultivation site, the application of a mixotrophic cultivation system, and the use of floating photobioreactor (PBR) technology illustrates key strategic choices that support productivity and sustainability in phytoplankton-based biodiesel production. These findings provide a foundational framework for developing an integrated bio-supply chain system in the renewable energy sector.*

*Corresponding Author

Keywords: *bio-supply chain; phytoplankton; biodiesel*

E-mail: benhardnbbn@gmail.com

1. Pendahuluan

Produksi bahan bakar fosil yang menghasilkan emisi CO₂ berdampak serius terhadap kesehatan dan lingkungan, serta memperparah perubahan iklim. Ketidakstabilan global akibat konflik dan isu politik juga menimbulkan ketidakpastian pasokan serta fluktuasi harga energi. Untuk mengatasi hal ini, transisi menuju energi terbarukan yang bersih dan terjangkau menjadi solusi utama. Di Indonesia, pemanfaatan energi terbarukan masih rendah, dengan dominasi minyak bumi, batu bara, dan gas alam dalam bauran energi primer. Sebagai langkah strategis, pemerintah menargetkan biomassa berkontribusi 5% dalam bauran energi nasional pada 2025, dan fitoplankton menjadi salah satu sumber biomassa potensial yang layak dikembangkan. Biomassa fitoplankton ini tidak langsung dikategorikan sebagai *biofuel*, melainkan digunakan sebagai bahan baku untuk menghasilkan *biofuel* melalui proses konversi seperti ekstraksi, transesterifikasi, atau fermentasi. Dengan demikian, *biofuel* adalah produk energi yang berasal dari biomassa, termasuk yang bersumber dari fitoplankton, tumbuhan, alga, maupun limbah organik.

Dengan demikian, *biofuel* adalah produk energi yang berasal dari biomassa, termasuk yang bersumber dari fitoplankton, tumbuhan, alga, maupun limbah organik. *Biofuel* dapat berkontribusi dalam mencapai tujuan pemerintah untuk meningkatkan penggunaan *renewable energy* dan mengurangi emisi CO₂ dari kegiatan manusia (FAO, 2004). Rantai pasok secara langsung maupun tidak langsung terdiri dari semua pihak yang terlibat dalam memenuhi permintaan konsumen (Chopra, 2014). *Bio-supply chain* melibatkan beberapa aktivitas atau tahapan, seperti produksi/persiapan dari material mentah, proses transportasi, proses perubahan bahan mentah menjadi bahan bakar, transportasi bahan bakar, proses distribusi kepada konsumen, hingga penggunaan dari bahan bakar itu sendiri. Dimana, setiap pihak dalam rantai pasok ini terhubung melalui aliran produk, informasi, dan dana.

Bio-supply chain memiliki keunikan karena melibatkan biomassa yang mudah terdegradasi, bersifat terbarukan, dan sangat dipengaruhi faktor lingkungan, sehingga membutuhkan sistem pengelolaan yang lebih adaptif dan terintegrasi. Kompleksitas inilah yang menjadikan penelitian mengenai *bio-supply chain* berbasis fitoplankton memiliki nilai strategis dan urgensi ilmiah yang tinggi.

Penelitian oleh Acuna et al., 2019 menganalisis metode pengelolaan dan optimalisasi rantai pasok biomassa hutan. Sementara itu, studi oleh Noodosan et al. dalam *Industrial & Engineering Chemistry Research* memodelkan jaringan rantai pasok *biofuel* berbasis alga menggunakan pendekatan pemrograman linear campuran. Namun, sebagian besar penelitian yang ada masih terbatas pada tahapan tertentu dalam rantai pasok, seperti produksi atau distribusi, tanpa adanya integrasi menyeluruh dari hulu ke hilir. Selain itu, penelitian ini memiliki perbedaan signifikan, yaitu penyusunan sistem *supply chain* berbasis keputusan strategis di setiap tahapnya dan menggunakan objek spesifik berupa fitoplankton yang berasal dari populasi

lokal di wilayah Laut Selatan Pulau Jawa, Indonesia. Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi dampak lingkungan dengan memanfaatkan limbah produksi sebagai pupuk, sehingga mendukung prinsip ekonomi sirkular.

Seiring meningkatnya kebutuhan akan energi alternatif berkelanjutan, konversi biomassa menjadi bioenergi semakin menarik perhatian akademisi dan industri (Zahraeet al., 2020). Namun, biomassa dari fitoplankton menghadapi tantangan seperti kebutuhan lingkungan tumbuh yang spesifik, skala produksi terbatas, serta biaya tinggi dalam panen dan ekstraksi lipid dapat membuat rumit proses perancangan rantai pasok yang efisien. Oleh karena itu, dibutuhkan model keputusan atau *Decision Support System* (DSS) yang mampu mengatasi kompleksitas ini untuk meningkatkan daya saing terhadap bahan bakar fosil. Penelitian ini bertujuan menentukan lokasi, perencanaan jaringan, serta fasilitas konversi *biofuel* secara optimal berdasarkan keputusan strategis.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dan merancang model *bio-supply chain* yang terintegrasi dan optimal untuk produksi biodiesel berbasis fitoplankton. Pendekatan yang digunakan bersifat kualitatif-deskriptif melalui metode studi literatur dan analisis konseptual, dengan fokus pada pengembangan rantai pasok yang berkelanjutan, efisien, serta sesuai dengan kondisi Indonesia. Referensi yang dikaji meliputi jurnal ilmiah, buku, dan laporan teknis terkait produksi biodiesel dari fitoplankton beserta desain *supply chain* biomassa.

Alur penelitian ini menggambarkan tahapan identifikasi hingga pemetaan *supply chain* biodiesel fitoplankton. Penelitian diawali dengan studi literatur, yang berfungsi sebagai dasar konseptual untuk memahami karakteristik biomassa fitoplankton dan rantai pasoknya. Tahap ini dilanjutkan dengan identifikasi komponen *supply chain* biodiesel fitoplankton, mencakup aspek budidaya di sisi hulu, proses produksi biodiesel pada tahap tengah, serta distribusi produk ke konsumen di sisi hilir.

Hasil identifikasi tersebut digunakan dalam penyusunan kerangka konseptual, yang menjadi acuan dalam menguraikan hubungan antar proses pada setiap level rantai pasok. Selanjutnya dilakukan identifikasi tiga level *supply chain*, yaitu tingkat strategis, taktis, dan operasional, untuk menggambarkan keterkaitan pengambilan keputusan dari perencanaan jangka panjang hingga implementasi di lapangan.

Tahapan berikutnya adalah perancangan *supply chain* berbasis *strategic decision*, yang menitikberatkan pada pemilihan strategi terbaik untuk pengelolaan rantai pasok secara efisien dan berkelanjutan. Akhirnya, proses penelitian ditutup dengan perancangan *network design* yang memvisualisasikan struktur jaringan rantai pasok dari hulu hingga hilir secara menyeluruh.

3. Hasil dan Pembahasan

Pengelolaan dan optimasi rantai pasok biomassa umumnya mencakup pengambilan keputusan pada

level strategis, taktis, dan operasional melalui pendekatan hierarkis dari atas ke bawah (Akhtari, 2019). Pada tingkat strategis, sebuah perusahaan akan berfokus pada keputusan jangka panjang (>5 tahun), seperti pemilihan rantai konfigurasi, bagaimana fitoplankton akan dialokasikan, investasi dalam infrastruktur pengolahan, serta perencanaan kapasitas produksi (Chopra, 2014). Di tingkat taktis, mencakup penentuan waktu panen terbaik, penyimpanan biomassa, serta penjadwalan distribusi biomassa, (Akhtari, 2019). Sementara itu, tingkat operasional berhubungan dengan aktivitas harian dan mingguan seperti perencanaan jalan dan rute, pemilihan rute, permintaan energi per tahun, serta pembuatan keputusan terkait pelanggan (Chopra, 2014). Pendekatan hierarki ini memungkinkan sistem rantai pasok berjalan secara efisien dan adaptif terhadap perubahan permintaan serta kondisi lingkungan. Pengoptimalan rantai *supply* pada ketiga level strategis, taktis, dan operasional juga dibantu dengan penyertaan pemilihan keputusan strategis pada setiap tahapannya.

3.1 Optimasi *Bio-Supply Chain Management* pada Level Strategis dan Taktis Menggunakan *Strategy Decision*

Pada tahapan strategis akan dilakukan analisis dan penentuan lokasi dimana fitoplankton akan diolah, disimpan, dikonversi menjadi biofuel beserta teknologinya (Akhtari, 2019). Selain itu, level strategis juga akan menetapkan desain jaringan (*network design*) rantai pasokan dan menyediakan lingkungan di mana level taktis dan operasional harus bekerja. Di tingkat taktis, mencakup penentuan waktu panen terbaik, penyimpanan biomassa, serta penjadwalan distribusi biomassa. Sehingga sub bab ini akan merangkum segala proses atau tahapan pada level strategis yang efisien guna mengoptimalkan manajemen *bio-supply chain* berbasis keputusan strategis

3.1.1 Pemilihan Lokasi Budidaya

Pemilihan lokasi tempat budidaya fitoplankton harus memperhatikan beberapa detail tertentu agar lebih efisien. Karakteristik lingkungan perairan seperti kedalaman laut, pH laut, intensitas cahaya, serta kadar nutrisi dan karbon yang baik untuk membantu kesuburan pertumbuhan fitoplankton (Alazaiza et al., 2023). Selain itu jarak lokasi budidaya dengan pesisir juga harus dipertimbangkan untuk efisiensi biaya. Menurut penelitian yang dilakukan oleh (Azizah J Online 2), Perairan Selatan Jawa yang berbatasan langsung dengan Samudera Hindia merupakan perairan yang biasanya terjadi fenomena antara lautan dan atmosfer yang salah satunya yaitu fenomena *upwelling*. Dimana fenomena *upwelling* ini akan membuat air di permukaan yang kaya nutrisi akan naik ke permukaan tempat fitoplankton berada. Selain itu lokasi ini juga memiliki jarak yang tidak signifikan sehingga akan menghemat biaya akomodasi dari tempat budidaya di pesisir.

3.1.2 Pemilihan Metode Budidaya yang Optimal

Alazaiza et al. (2023), dalam jurnal "*Biofuel*

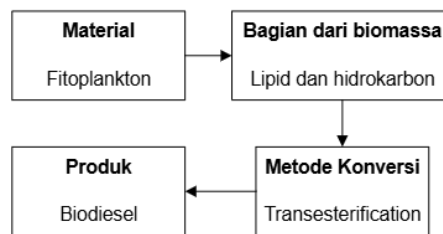
Production Using Cultivated Algae: Technologies, Economics, and Its Environmental Impacts" mengatakan bahwa terdapat empat sistem utama dalam budidaya mikroalga, yaitu *photoautotrophic*, *heterotrophic*, *mixotrophic*, dan *photoheterotrophic*. Sistem *mixotrophic* merupakan metode budidaya mikroalga yang paling unggul karena menggabungkan kelebihan dari sistem *photoautotrophic* dan *heterotrophic*. Dengan memanfaatkan cahaya dan sumber karbon organik secara bersamaan, sistem ini mampu meningkatkan produktivitas biomassa dan akumulasi lipid secara signifikan. Perairan Selatan Jawa, yang dikenal dengan fenomena *upwelling* musiman, menyediakan lingkungan laut yang kaya nutrisi dan intensitas cahaya tinggi, sangat mendukung pertumbuhan fitoplankton secara fotoautotrofik. Ketika dikombinasikan dengan suplai karbon organik dari limbah domestik atau industri pesisir, sistem *mixotrophic* dapat dioptimalkan secara efisien di wilayah ini.

Pemilihan teknologi yang tepat akan berguna pada efisiensi lahan, biaya, serta kualitas dari fitoplankton yang dihasilkan. Menurut Siang et al., (2022), *floating photobioreactor* (PBR) merupakan solusi inovatif untuk budidaya mikroalga di atas laut, karena mampu mengurangi kebutuhan lahan darat, memanfaatkan cahaya matahari secara langsung, dan memfasilitasi pertumbuhan mikroalga dengan efisien melalui pencampuran alami oleh gerakan gelombang laut. Teknologi ini dinilai ramah lingkungan dan memiliki potensi untuk dikembangkan dalam skala besar. Meskipun tantangan seperti fluktuasi lingkungan laut tetap ada, desain modular dan fleksibel dari sistem ini menjadikannya adaptif terhadap berbagai kondisi perairan.

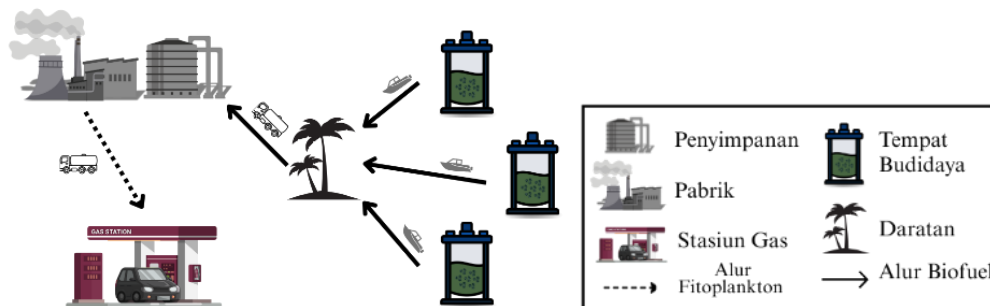
Setelah memilih sistem dan teknologi dalam proses budidaya fitoplankton, maka selanjutnya adalah pemilihan strategi agar material yang dihasilkan dapat maksimal dalam jumlah maupun kualitas (Sintaningsih et al., 2023). Terdapat tiga metode utama dalam budidaya mikroalga, yaitu *batch*, semi-kontinyu, dan kontinyu (Alazaiza et al., 2023). Metode *batch* bersifat sederhana namun kurang efisien karena nutrisi cepat habis dan fase pertumbuhan tidak stabil. Metode kontinyu menyediakan suplai nutrisi secara konstan untuk mempertahankan pertumbuhan maksimal, tetapi mahal dan kompleks. Sedangkan metode semi-kontinyu merupakan strategi terbaik karena mampu menjaga mikroalga dalam fase pertumbuhan aktif lebih lama, menghasilkan biomassa tinggi, dan lebih ekonomis untuk skala komersial.

3.1.3 Pemilihan Metode Pemanenan yang Optimal

Dalam budidaya semi-kontinyu, panen dilakukan secara berkala saat kultur mencapai kepadatan sel optimal, memungkinkan mikroalga tetap berada dalam fase pertumbuhan aktif untuk jangka waktu yang lebih panjang. Strategi ini membantu menjaga produktivitas tinggi dan mencegah penurunan kualitas biomassa akibat kepadatan berlebih atau kekurangan nutrisi. Produktivitas primer fitoplankton tertinggi terjadi pada waktu inkubasi antara pukul 10:00 hingga 14:00 WIT (Yuliana & Irfan, 2018). Sehingga



Gambar 1. Proses dan Metode Konversi Fitoplankton Menjadi Biodiesel



Gambar 2. Network Design Bio-Supply Chain

waktu tersebut menjadi waktu yang paling baik untuk panen fitoplankton agar mendapatkan jumlah yang maksimal.

Metode panen yang efektif digunakan untuk kondisi *floating photobioreactor* dan untuk budidaya dalam skala besar metode panen Shepherd. Pemanen tersebut menggunakan *belt* atau sabuk yang berjalan secara kontinyu melalui kultur alga dan sabuk tersebut menggunakan sistem vakum. Sabuk yang bergerak, mengumpulkan alga yang siap dipanen dengan sistem vakum sehingga alga akan terikut dalam sistem vakum. Desain ini menggunakan sabuk primer untuk mengumpulkan alga dan sabuk kapiler sekunder yang terbuat dari polimer absorbent untuk menyerap air dari alga. Tercatat perusahaan A2E (*Alga to Energy*) juga menggunakan metode ini.

3.1.4 Proses Pengeringan Fitoplankton yang Efektif

Setelah melewati fase panen, fitoplankton akan dibawa ke darat menggunakan kapal berukuran sedang untuk menyesuaikan dengan muatannya. Secara umum, fitoplankton yang baru dipanen masih mengandung banyak air yang berbentuk *algae slurry* (lumpur alga) dan harus dikurangi kadar airnya hingga membentuk jeli alga (*alga cake*), (Hadiyanto & Azim, 2012). Metode *freeze drying* dapat digunakan untuk mengeringkan fitoplankton dan akan disimpan di kulkas pendingin dengan suhu rendah sekitar -20°C untuk menghindari degradasi lipid oleh air sebelum masuk ke tahap produksi. Ketika sudah memasuki tahap produksi, biomassa akan dikirim ke fasilitas konversi biodiesel menggunakan kendaraan tangki atau kontainer khusus yang dirancang untuk menjaga kondisi biomassa selama transportasi. Transportasi dilakukan secepat mungkin untuk meminimalkan degradasi biomassa.

3.1.4 Proses Ekstraksi lipid dari Fitoplankton

Metode pemecahan dinding sel untuk ekstraksi lipid dari mikroalga umumnya dibagi menjadi pendekatan mekanik, kimia, dan enzimatik. Pemilihan

metode yang tepat harus mempertimbangkan skala produksi, biaya, serta jenis mikroalga. Dalam konteks skala industri, metode *microwave* direkomendasikan karena dapat mempercepat ekstraksi dan mengurangi penggunaan pelarut berbahaya. Selain itu, metode *electrochemical extraction* memberikan efisiensi tinggi dalam waktu singkat dengan konsumsi energi yang terkontrol. Pendekatan kimia melibatkan pelarut organik seperti heksana yang secara langsung melarutkan lipid, membuat proses menjadi sederhana dengan biaya operasional yang rendah. Secara keseluruhan, kombinasi teknologi modern seperti *microwave* dan pelarut ramah lingkungan menjadi pilihan terbaik untuk ekstraksi lipid berkelanjutan dari mikroalga.

3.1.5 Proses Konversi Lipid Menjadi Biofuel

Konversi lipid menjadi biodiesel dapat dilakukan melalui lima metode utama: transesterifikasi (konvensional dan superkritis), *hydrothermal liquefaction*. Pada konversi dengan pendekatan kimia, transesterifikasi menjadi metode utama produksi biodiesel dengan menggunakan katalis seperti CaO dan Al_2O_3 pada suhu 50°C , konversi mencapai 97,5%. Transesterifikasi memiliki kelebihan proses yang sederhana dan efisien, namun memerlukan biomassa kering dan katalis yang sensitif terhadap air. **Gambar 1** merupakan proses konversi fitoplankton menjadi biodiesel. Namun, untuk biomassa basah dan skala industri, *Hydrothermal Liquefaction* (HTL) menjadi metode paling menjanjikan karena tidak memerlukan pengeringan dan menghasilkan *biofuel* berkualitas baik dengan efisiensi tinggi. Pemilihan metode terbaik tergantung pada kondisi bahan baku, infrastruktur, dan tujuan akhir dari proses produksi *biofuel*.

3.2 Network Design pada Biomassa Supply Chain

Jaringan rantai pasok merupakan kumpulan simpul yang terhubung oleh busur sebagai jalur aliran material atau informasi (Acuna et al., 2019). **Gambar 2** menunjukkan aliran biomassa dari reaktor budidaya

ke *site* pengumpulan (*storage*), lalu ke fasilitas pengolahan, dan hasil akhirnya akan didistribusikan ke SPBU. Dalam hal ini, penerapan keputusan strategis dapat mengoptimalkan desain *supply chain* (Jason Fernando, 2014). Keputusan strategis yang diambil adalah memilih sistem budidaya tersebar karena fitoplankton memerlukan kondisi lingkungan spesifik (seperti intensitas cahaya dan kualitas air), sehingga lokasi budidaya dapat disesuaikan dengan potensi lokal. Sistem ini juga memberi fleksibilitas *supply* jika terjadi gangguan di salah satu lokasi. Berikut merupakan *network design bio-supply chain* yang didesain dengan menerapkan keputusan strategis.

Sementara itu, fasilitas pengolahan biodiesel dipusatkan untuk mengoptimalkan efisiensi operasional, memudahkan pengendalian mutu, dan menekan biaya investasi alat ekstraksi serta transesterifikasi yang cenderung mahal. Pengangkutan biomassa dari lokasi budidaya ke fasilitas pusat dilakukan secara *in-house* menggunakan armada internal untuk menjamin kendali kualitas biomassa basah yang mudah terdegradasi dan membutuhkan waktu distribusi yang cepat. Dengan struktur ini, jaringan rantai pasok dirancang agar efisien secara biaya, adaptif terhadap kondisi lingkungan lokal, serta mendukung keberlanjutan produksi biodiesel dari fitoplankton.

3.4 Optimasi *Bio-Supply Chain Management* pada Level Operasional

Keputusan dan manajemen pada tingkat operasional mengatur beberapa hal yang memiliki pengaruh kurang dari setahun, atau bahkan satu hari. Dikarenakan banyaknya aktivitas yang terdapat pada *biofuel supply chain*, model optimasi untuk keputusan pada tahap operasional sangat beragam. Pada tahap akuisisi biomassa, keputusan operasional melibatkan bagaimana mengalokasikan operator untuk mesin pemanen, bagaimana mengatur jadwal kerja, bagaimana menetapkan area operasi panen, dan bagaimana mengangkut biomassa yang telah dipanen ke dalam sistem area penyimpanan.

3.4.1 Sistem *Monitoring*

Mengimplementasikan produksi dan konversi mikroalga menjadi bioenergi memiliki banyak persoalan yang harus dipertimbangkan. Terlebih lagi implementasi yang ada harus efektif dan efisien, baik dari segi waktu maupun biaya (Wicker et al., 2021). Beberapa ahli telah membuat desain protokol yang mengatur pembudidayaan dan pengolahan mikroalga. Protokol tersebut berdasarkan pemilihan metode pemisahan, penebalan, dan pengeringan biomassa yang mana menghasilkan teknologi untuk sistem panen produk yang lebih berkualitas. Beberapa permasalahan juga yang terdapat pada bagian adalah proses identifikasi dan pemantauan. Proses identifikasi, penyaringan, penyeleksian, dan pemantauan yang dilakukan dapat mendorong pertumbuhan biomassa mikroalga dan meningkatkan jumlah target zat yang diinginkan, seperti zat kimiawi dan fisik yang terdapat pada mikroalga (Klin et al., 2023).

Sampai saat ini, penelitian yang membahas

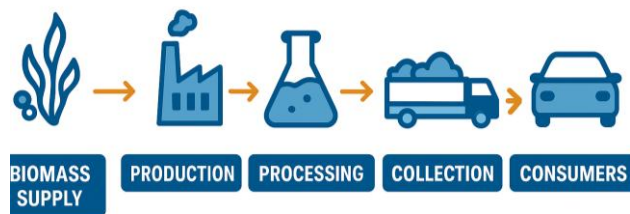
tentang pengembangan solusi yang efektif secara biaya, teknologi yang memadai, dan ramah lingkungan menjadi faktor-faktor yang menentukan dalam budidaya mikroalga untuk keperluan industri (Wicker et al., 2021). Salah satu parameter yang beberapa kali diabaikan dalam publikasi ilmiah adalah optimasi kondisi fisik, kimiawi, dan biologi medium (Klin et al., 2023). Hal tersebut dapat diantisipasi dengan sistem praktis untuk pemantauan dan kontrol terhadap sistem budidaya mikroalga. Mengingat bahwa produk akhir yang dihasilkan berdasarkan mikroalga ini bergantung pada beberapa parameter eksternal atau lingkungan, maka sistem pemantauan dan kontrol yang diterapkan harus melibatkan banyak pertimbangan. Parameter yang diperlukan ialah profil fisikokimia dari medium, intensitas cahaya, pemeriksaan tingkat pertumbuhan mikroalga, konsentrasi biomassa, dan perubahan dalam komposisi spesies mikroalga (Ranglová et al., 2021). Performa pada tahap akhir dalam produksi biomassa mikroalga juga diperantarai oleh kadar karbondioksida, oksigen, nitrogen, fosfor, pH, temperatur, tingkat kekeruhan, konsentrasi biomassa, dan klorofil (Kujawska et al., 2021).

3.4.2 Proses *Supply Chain Biomassa*

Biomass supply chain pada umumnya terdiri dari beberapa proses yang terpisah namun memiliki kesinambungan satu dengan yang lainnya. Proses-proses tersebut ialah persiapan lahan dan pembibitan, pembudidayaan, panen, pengolahan, penyimpanan, transportasi antar lokasi, dan pemanfaatan bahan bakar pada pembangkit listrik. Mempertimbangkan lokasi biomassa berbasis fitoplankton yang bertempat di pesisir pantai, infrastruktur transportasi yang berpotensi aman dan efektif secara biaya adalah truk. Faktor lainnya mengapa menggunakan moda transportasi darat truk adalah jarak yang relatif singkat untuk mengangkut bahan bakar dan lebih fleksibel dibandingkan dengan moda transportasi lainnya (Adolph, 2016).

Beberapa aktivitas yang diperlukan untuk menyuplai biomassa dari fase produksinya ke fase proses bahan bakar adalah pemanenan dan pengumpulan, penyimpanan, *loading* dan *off-loading*, transportasi jalur moda darat, serta proses pengolahan biomassa (Umamaheswari & Shanthakumar, 2016). Dimulai dari pemanenan pada perairan area budidaya yang dilanjutkan dengan pengumpulan mikroalga di titik kendaraan transportasi darat dapat ditempatkan. Setelah itu terdapat proses pengumpulan. Fitoplankton memiliki beragam jenis karakterisasi, sehingga memiliki pengaruh pada ketersediaannya pada waktu tertentu (Sintaningsih et al., 2023). Kondisi tersebut membuat fitoplankton terpanen pada beberapa bulan yang berbeda di tiap tahunnya tetapi dibutuhkan untuk tersuplai pada bioenergi tiap siklus satu tahun. Maka solusi dari masalah tersebut ialah penyimpanan fitoplankton yang berkala. **Gambar 3** merupakan diagram prosesnya.

Loading dan *off-loading* menjadi tahapan selanjutnya setelah fitoplankton disimpan ke dalam area penyimpanan. Proses *loading* dan *off-loading* ini selalu terdapat pada langkah pemindahan fitoplankton,



Gambar 3. Proses *Biomass Supply Chain*

baik dari area budidaya menuju area penyimpanan, maupun dari area penyimpanan menuju area pengolahan. Moda transportasi yang dipilih harus mempertimbangkan berbagai aspek, beberapa antaranya adalah rata-rata jarak perpindahan, beban isi fitoplankton, kapasitas pengangkutan, kecepatan gerak kendaraan, dan ketersediaan moda transportasi itu sendiri. Langkah utama dari seluruh rangkaian ini adalah pengolahan fitoplankton menjadi biomassa. Pengolahan tersebut dilakukan agar biomassa dapat dimanfaatkan menjadi beberapa bahan baku yang ramah lingkungan, dalam kasus ini adalah biofuel yang bermanfaat bagi produksi bahan bakar ramah lingkungan.

3.4.3 Metode Kontrol Kualitas Biofuel Berbasis Fitoplankton

Pemahaman kelayakan mikroalga, terkhususnya fitoplankton sebagai bahan bakar alternatif sangat penting untuk meninjau kualitas *biofuel* yang dihasilkannya dari berbagai aspek. Aspek tersebut antara lain adalah sifat fisik dan kimia mikroalga biodiesel, pengaruh waktu injeksi terhadap proses pembakaran, karakteristik pembakaran tetesan bahan bakar, serta performa dan emisi mesin yang menggunakan biodiesel mikroalga (Sonachalam et al., 2024). Bagian ini bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai potensi dan tantangan teknis dalam hal operasional guna pemanfaatan mikroalga sebagai bahan bakar kendaraan.

Sifat fisik dan kimia biodiesel mikroalga menunjukkan kesamaan dengan biodiesel dan diesel konvensional Eropa berdasarkan standar EN14214, termasuk *cetane number* yang mempengaruhi kualitas pembakaran. Jika *cetane number* rendah, maka waktu penyalan (*ignition delay*) akan meningkat. Hal tersebut menyebabkan pembakaran yang tidak sempurna. (Sonachalam et al., 2024) menunjukkan bahwa pada mesin kompresi dengan campuran B20 (80% diesel dan 20% biodiesel), biodiesel mikroalga menghasilkan panas yang lebih sedikit akibat volatilitasnya yang rendah. Namun biodiesel tersebut memiliki karakteristik kimia serupa dengan biodiesel konvensional, sehingga B20 dipandang sebagai bahan bakar yang lebih unggul.

Karakteristik pembakaran tetesan menunjukkan bahwa HRD (*hydroprocessed renewable diesel*) mirip dengan DF2 dan R50 dalam hal nyala api, laju pembakaran, dan permukaan jelaga, dengan kecenderungan pembentukan jelaga tertinggi ditemukan pada DF2, disusul R50, lalu HRD. Kandungan aromatik tinggi pada DF2 (27%) diyakini menjadi penyebab utamanya.

Oleh karena itu, HRD dinilai memiliki potensi tinggi sebagai pengganti bahan bakar konvensional atau aditif. Pada pengujian mesin diesel E6, dua jenis minyak mikroalga, ME0.2 dan ME0.1, diuji dan menunjukkan bahwa ME0.1 memberikan kinerja lebih baik dibandingkan ME0.2, namun torsi menurun dan emisi meningkat. Masalah ini dapat diatasi dengan modifikasi desain mesin seperti sistem injeksi dan rasio kompresi. Dalam pengujian emisi dan performa mesin, dua sampel biodiesel B100 dari *Chlorella* dan *Jatropha* diuji dalam berbagai kondisi jalan sesuai *European Transient Cycle* (ETC), dengan hasil yang bervariasi tergantung pada karakteristik bahan bakarnya.

3.4.4 Penjadwalan Logistik

Bergantung pada waktu pemindahan, hampir sebagian besar bagian proses produksi biomassa melibatkan transportasi pada jalur darat. Penjadwalan logistik merupakan pertimbangan yang penting dalam menyeimbangkan seluruh sistem rantai pasok sehingga dapat berjalan dengan efektif dan efisien (Tsoulakis et al., 2023). Salah satu permasalahan dalam mencapai tujuan tersebut adalah perkiraan waktu tempuh yang kurang tepat. Perencanaan harus melibatkan beberapa hal, seperti jumlah kendaraan, kuantitas populasi fitoplankton, jalur darat yang akan ditempuh, dan lain sebagainya. Dalam kasus ini, Laut Selatan Pulau Jawa sebagai lokasi budidaya fitoplankton, memiliki topografi daratan yang sedikit terjal dan curam. Dengan begitu, perlu adanya pertimbangan pemilihan rute dengan kondisi daratan terlandai.

Pemilihan titik budidaya mempertimbangkan beberapa faktor, seperti faktor lingkungan, logistik, dan ekonomi. Pada faktor lingkungan harus memilih titik yang memiliki kualitas air (suhu, pH, dan salinitas) yang sesuai dengan habitat fitoplankton. Selain itu, dibutuhkan juga kedalaman laut sekitar 5 - 50 m agar mudah dikontrol dan juga memiliki penetrasi cahaya yang cukup (Arsad et al., 2022). Dalam faktor logistik, perlu mempertimbangkan lokasi yang dekat dengan dermaga, jalan utama akses darat dan kemudahan akses pada fasilitas pendukung (laboratorium riset maritim).

Berdasarkan pertimbangan beberapa faktor dalam **Tabel 1** dan bantuan pemetaan oleh Google Earth, dapat ditentukan lokasi yang paling efisien untuk pembudidayaan fitoplankton yaitu Perairan Teluk Peny, Cilacap, Jawa Tengah. Lokasi ini terletak pada koordinat 7°42'16"S 109°08'25"E dengan kedalaman 9 meter. Kelebihan lokasi tersebut adalah lokasi pantai yang masih relatif sepi industri, lingkungan laut yang cukup bersih dan banyak nutrisi akibat proses upwelling, serta terdapat banyak area nelayan tradisional yang dapat dilibatkan dalam sistem (Arsad

Tabel 1. Kriteria Operasional

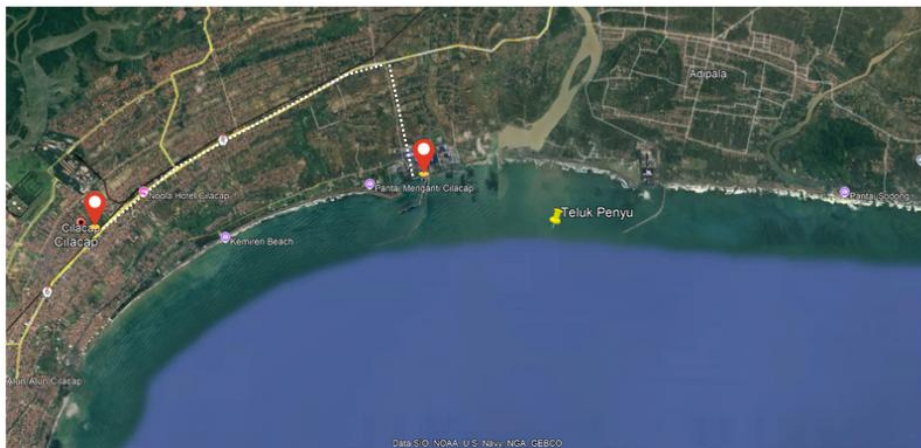
Kriteria	Teluk Penyu (Cilacap)	Pantai Glagah (Yogyakarta)
Salinitas (28–33%)	Optimal	Tidak Stabil
Suhu permukaan (26–30°C)	Sesuai untuk pertumbuhan Fitoplankton	Sesuai
Kedekatan dengan pelabuhan & industri migas	Dekat Pelabuhan Tanjung Intan & Kilang Pertamina	Jauh dari pelabuhan terdekat
Perairan relatif tenang	Teluk Alami dan gelombang rendah	Lebih terpapar ombak
Akses transportasi & logistik	Mudah (jalan nasional & kawasan industri)	Terbatas



Gambar 4. Lokasi Budidaya Fitoplankton



Gambar 5. Lokasi Budidaya Fitoplankton (Tampak Samping)



Gambar 6. Jalur Transportasi Darat dari Area Budidaya Menuju Lokasi Pengolahan (Cilacap)

et al., 2022). Jarak dari titik tempat budidaya fitoplankton ke dermaga terdekat adalah sejauh 2.9 km dan tergolong dekat, diilustrasikan melalui **Gambar 4**

dan **Gambar 5**. Lalu jarak antar area budidaya menuju lokasi pengolahan sejauh kurang lebih 20 km, tercantum pada **Gambar 6**.

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini didapatkan beberapa kesimpulan penting. Pertama, penerapan fase keputusan strategis pada setiap tahapan dalam sistem rantai pasok biomassa terbukti mampu meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Pemilihan Teluk Penyu sebagai lokasi budidaya, penerapan sistem kultivasi mixotrophic, serta pemanfaatan teknologi *floating photobioreactor* (PBR) merupakan keputusan strategis yang mendukung produktivitas dan keberlanjutan budidaya fitoplankton.

Kedua, pemilihan metode panen dan teknik ekstraksi yang tepat turut berperan penting dalam mengoptimalkan konversi fitoplankton menjadi *biofuel*. Lokasi budidaya yang sesuai dengan parameter habitat mikroalga juga memperkuat efisiensi sistem produksi. Selain itu, penentuan titik transportasi dan pola distribusi menjadi komponen vital yang mempengaruhi efektivitas logistik dan stabilitas pasokan bahan baku maupun produk akhir.

Seluruh keputusan dalam rancangan *bio-supply chain* ini didasarkan pada kriteria efisiensi biaya, kualitas produk, dan keberlanjutan lingkungan, sehingga model yang dihasilkan tidak hanya kompetitif tetapi juga adaptif terhadap dinamika pasar energi dan tantangan transisi energi berkelanjutan. Dengan demikian, strategi rantai pasok yang dirancang dalam penelitian ini menunjukkan bahwa biodiesel berbasis fitoplankton memiliki potensi besar untuk berkontribusi pada bauran energi nasional secara efisien dan ramah lingkungan.

Sebagai arah keberlanjutan riset, studi ini dapat dikembangkan lebih lanjut melalui pendekatan kuantitatif dan simulasi optimasi *supply chain* untuk mengukur performa sistem secara numerik, termasuk analisis *life cycle assessment* (LCA), biaya logistik terintegrasi, dan analisis sensitivitas terhadap variabilitas produksi. Selain itu, penelitian lanjutan juga disarankan untuk melibatkan aspek kebijakan dan kemitraan industri, guna memastikan implementasi model *bio-supply chain* fitoplankton yang lebih aplikatif, inklusif, dan berkelanjutan di masa mendatang.

5. Daftar Pustaka

- Abujazar, M. S. S., Bashir, M. J. K., Nassani, D. E., & Amr, S. S. A. (2023). *Economics , and Its Environmental Impacts*.
- FAO. (2004). *Unified Bioenergy Terminology*. December, 1–50. <http://www.fao.org/3/bj4504e.pdf>
- Hadiyanto, & Azim, M. (2012). *Penerbit & Percetakan UPT UNDIP Press SEMARANG*. 1–138.
- Jason Fernando. (2014). Supply Chain Management Supply Chain Management. In *2degrees sustainability Essentials: Vol. XI* (Issue 2). <https://www.investopedia.com/terms/s/scm.asp> ~:text=Supply chain management is important,build a strong consumer brand
- Klin, M., Pniewski, F., & Latała, A. (2023). Multistage optimization of growth and physiological condition of brackish green microalgae with the use of natural waters. *Aquaculture*, 562(April 2022). <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738820>
- Kujawska, N., Talbierz, S., Dębowski, M., Kazimierowicz, J., & Zieliński, M. (2021). Cultivation method effect on schizochytrium sp. Biomass growth and docosahexaenoic acid (dha) production with the use of waste glycerol as a source of organic carbon. *Energies*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/en14102952> *Microalgae Diversity (sitasi 10).pdf*. (n.d.).
- Ranglová, K., Lakatos, G. E., Câmara Manoel, J. A., Grivalský, T., Suárez Estrella, F., Acien Fernández, F. G., Molnár, Z., Ördög, V., & Masojídek, J. (2021). Growth, biostimulant and biopesticide activity of the MACC-1 Chlorella strain cultivated outdoors in inorganic medium and wastewater. *Algal Research*, 53(August). <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102136>
- Sintaningsih, N. W., Faiqoh, E., & Putra, I. D. N. N. (2023). Spatial Distribution of Plankton in Makassar Strait. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 8(1), 30. <https://doi.org/10.24843/jmas.2022.v08.i01.p05>
- Sonachalam, M., Jayaprakash, R., Manieniyani, V., Srinivasa Murthy, M., Johar, M. G. M., Sivaprakasam, S., Warimani, M., Kumar, N., Majdi, A., Alsubih, M., Islam, S., & Abdullah, M. I. (2024). Impact of injection pressure on a dual fuel engine using acetylene gas and microalgae blends of chlorella protothecoides. *Case Studies in Thermal Engineering*, 60(March), 104653. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104653>
- Swift, R., & Swift, R. (2019). *The following individuals certify that they have read , and recommend to the Faculty of Graduate and Postdoctoral Studies for acceptance , the dissertation entitled : February*.
- Tsolakis, N., Goldsmith, A. T., Aivazidou, E., & Kumar, M. (2023). Microalgae-based circular supply chain configurations using Industry 4.0 technologies for pharmaceuticals. *Journal of Cleaner Production*, 395(February), 136397. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136397>
- Umamaheswari, J., & Shanthakumar, S. (2016). Efficacy of microalgae for industrial wastewater treatment: a review on operating conditions, treatment efficiency and biomass productivity. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 15(2), 265–284. <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9397-7>
- Wicker, R. J., Kumar, G., Khan, E., & Bhatnagar, A. (2021). Emergent green technologies for cost effective valorization of microalgal biomass to renewable fuel products under a biorefinery scheme. *Chemical Engineering Journal*, 415. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128932>