



# BIOOPTIMA INTELLIGENCE: KERANGKA KONSEPTUAL INTEGRASI AI, MACHINE LEARNING, DAN IOT UNTUK PEMETAAN DAN OPTIMASI PEMANFAATAN BIOMASSA

Riva Vabian Arbianto, Iman Adi Wicaksana

Program Studi Teknologi Rekayasa Komputer, Sekolah Vokasi, IPB University, Bogor, Indonesia

Email: [rivavabian@apps.ipb.ac.id](mailto:rivavabian@apps.ipb.ac.id), [imanwicaksana@apps.ipb.ac.id](mailto:imanwicaksana@apps.ipb.ac.id)

## ABSTRAK

Indonesia memiliki potensi biomassa yang besar dari sektor pertanian, perkebunan, kehutanan, peternakan, perikanan, dan limbah perkotaan. Namun, keragaman karakteristik bahan, persebaran geografis, kondisi logistik, serta perbedaan kebutuhan teknologi konversi menyulitkan penentuan alternatif pemanfaatan dan lokasi fasilitas pengolahan yang sesuai. Penelitian ini bertujuan merumuskan BioOptima Intelligence sebagai kerangka konseptual yang mengintegrasikan pemetaan biomassa, *Internet of Things* (IoT), *Machine Learning* (ML), dan *Artificial Intelligence* (AI) untuk mendukung perencanaan pemanfaatan biomassa berbasis data. Metode penelitian menggunakan *structured literature review* dan analisis konseptual terhadap literatur terkait biomassa, bioenergi, AI/ML, IoT, rantai pasok, dan sistem pendukung keputusan. Hasil sintesis dirumuskan menjadi kerangka yang menghubungkan pemetaan dan karakterisasi biomassa, akuisisi serta validasi data, analitik ML, rekomendasi berbasis AI, dan mekanisme pemantauan serta umpan balik. Secara konseptual, BioOptima Intelligence dirancang menghasilkan peta dan basis data biomassa, analisis kesesuaian wilayah, estimasi potensi energi berdasarkan ketersediaan data, serta rekomendasi alternatif teknologi konversi dan kandidat lokasi fasilitas pengolahan. Kontribusi konseptual penelitian terletak pada integrasi komponen tersebut dalam satu alur pengambilan keputusan adaptif. Namun, kerangka ini belum diuji secara empiris. Penelitian lanjutan diperlukan untuk membangun dataset, mengembangkan prototipe, memvalidasi model, dan menguji kelayakan rekomendasi pada kondisi operasional.

Kata kunci: bioenergi adaptif; biomassa; *Artificial Intelligence*; *Machine Learning*; *Internet of Things*

## Article History

Received: Oktober 2026

Reviewed: Oktober 2026

Published: Oktober 2026

Plagiarism Checker No  
237.u873247.fh8374

Copyright : Author

Publish by : Kohesi



This work is licensed under  
a [Creative Commons  
Attribution-NonCommercial  
4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

## 1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara megabiodiversitas yang memiliki kekayaan sumber daya biologis yang beragam, mulai dari biomassa pertanian, limbah perkebunan, residu kehutanan, limbah pangan, limbah perkotaan, hingga sumber daya biologis dari sektor perikanan dan pesisir. Keberagaman tersebut memberikan peluang besar bagi pengembangan bioenergi sebagai bagian dari transisi menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan. Suhartini *et al.* (2024) menunjukkan bahwa sumber daya biologis Indonesia, termasuk biomassa laut seperti makroalga, memiliki peluang untuk dikembangkan sebagai bahan baku biofuel dan dalam sistem biorefinery. Pada tingkat nasional, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) (2023) memperkirakan potensi biomassa Indonesia setara dengan 56,97 GW kapasitas pembangkit listrik yang berasal dari berbagai sumber, seperti limbah pertanian, perkebunan, kehutanan, peternakan, dan sampah perkotaan. Secara regional, International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022) juga



mengidentifikasi adanya peluang bioenergi yang belum sepenuhnya dimanfaatkan di Asia Tenggara, termasuk Indonesia, sehingga pengembangan bioenergi memerlukan penyediaan bahan baku yang berkelanjutan serta pengelolaan sistem energi yang terintegrasi. Pada tingkat global, International Energy Agency (IEA) (2024) menunjukkan bahwa bioenergi, biogas, dan biomethane tetap menjadi bagian penting dalam perkembangan energi terbarukan. Sementara itu, United Nations Department of Economic and Social Affairs (2024) menunjukkan bahwa pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan, termasuk peningkatan akses terhadap energi, masih menghadapi berbagai tantangan sehingga diperlukan percepatan tindakan dan penguatan solusi yang mendukung pembangunan berkelanjutan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa besarnya sumber daya biomassa perlu diikuti dengan pendekatan pengelolaan yang mampu menghubungkan potensi sumber daya dengan kebutuhan dan kondisi pemanfaatannya.

Permasalahan pemanfaatan biomassa menjadi lebih kompleks karena karakteristik sumber daya tersebut berbeda antarwilayah dan antarjenis bahan baku. Biomassa pertanian, limbah perikanan, limbah pangan, biomassa perkebunan, residu kehutanan, dan biomassa laut memiliki karakteristik fisik dan kimia yang berbeda sehingga dapat menghasilkan respons yang berbeda pada proses konversi energi. Savvidou *et al.* (2022) melalui kajian terhadap berbagai limbah organik sebagai substrat *Microbial Fuel Cell* (MFC) menunjukkan bahwa jenis dan karakteristik substrat dapat memengaruhi parameter kinerja, seperti *power density*, penghilangan *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan *coulombic efficiency*. Yana *et al.* (2022) juga menunjukkan bahwa limbah biomassa memiliki peluang sebagai sumber energi terbarukan dalam pengembangan ekonomi berbasis bio, tetapi pemanfaatannya dipengaruhi oleh berbagai aspek implementasi, kebijakan, regulasi, dan persaingan penggunaan biomassa untuk kebutuhan energi maupun nonenergi. Dengan demikian, besarnya potensi biomassa tidak secara langsung menunjukkan kesesuaian pemanfaatannya sebagai sumber energi. Keputusan pemanfaatan perlu mempertimbangkan jenis, karakteristik, lokasi, ketersediaan, serta kesesuaian bahan baku dengan teknologi konversi yang digunakan.

Selain karakteristik bahan baku, persebaran biomassa secara geografis menyebabkan aspek rantai pasok menjadi bagian penting dalam pengembangan sistem bioenergi. Pengumpulan, prapengolahan, penyimpanan, transportasi, distribusi, dan pemilihan teknologi konversi dapat memengaruhi kelayakan pemanfaatan biomassa. Helal *et al.* (2023) melalui kajian bibliometrik terhadap penelitian rantai pasok biomassa untuk bioenergi menunjukkan bahwa penelitian pada bidang tersebut mencakup berbagai tahapan, mulai dari penyediaan bahan baku hingga pemanfaatan energi. Kajian tersebut juga menunjukkan pentingnya pengembangan sistem yang mampu menghadapi ketidakpastian dan risiko rantai pasok, termasuk kebutuhan terhadap sistem *multi-feedstock*, peningkatan ketahanan rantai pasok, serta pemanfaatan teknologi berbasis *Machine Learning* (ML) dan *Artificial Intelligence* (AI). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pemetaan biomassa tidak cukup dilakukan hanya dengan memperkirakan jumlah sumber daya yang tersedia. Informasi mengenai karakteristik bahan baku, lokasi, kondisi lingkungan, logistik, dan teknologi konversi perlu dipertimbangkan secara bersama agar keputusan pemanfaatan dapat disesuaikan dengan kondisi wilayah.

Perkembangan *Artificial Intelligence* (AI), khususnya *Machine Learning* (ML), memberikan peluang untuk mendukung pengelolaan sistem bioenergi yang memiliki hubungan kompleks dan



bersifat nonlinear. Wang *et al.* (2022) melalui kajian mengenai peran ML dalam konversi bioenergi dan biofuel menunjukkan bahwa ML dapat digunakan untuk pemodelan, prediksi, klasifikasi, dan optimasi pada berbagai persoalan bioenergi. Mondal *et al.* (2023) melalui kajian mengenai ML dalam bioproses juga menunjukkan pemanfaatannya untuk optimasi, pemantauan, dan pengendalian proses, meskipun penerapan secara *real-time* masih menghadapi tantangan berupa kompleksitas data, integrasi sensor, dan pengelolaan data. Pada konversi termokimia biomassa, Khan *et al.* (2023) menunjukkan bahwa ML dapat digunakan untuk memprediksi hasil konversi, mengoptimalkan proses, melakukan pemantauan secara *real-time*, serta mendukung pengendalian proses pada teknologi seperti pirolisis, torrefaksi, hidrotermal, gasifikasi, dan pembakaran. Khanaum *et al.* (2026) berhasil membuktikan bahwa ML multivariat pada *Microbial Fuel Cell* (MFC) mampu memetakan kausalitas antara parameter operasi (seperti pH dan *Chemical Oxygen Demand*) terhadap stabilitas tegangan dan kepadatan daya. Sementara itu, Hess-Dunlop *et al.* (2024) menunjukkan bahwa model *Long Short-Term Memory* (LSTM) dapat digunakan untuk memprediksi keluaran energi *Microbial Fuel Cell* (MFC) berdasarkan data kondisi tanah dan keluaran listrik pada beberapa horizon waktu, serta dapat mendukung penjadwalan operasi perangkat berdasarkan ketersediaan energi yang diprediksi. Temuan tersebut menunjukkan bahwa ML telah digunakan pada berbagai tingkat sistem bioenergi, mulai dari pemodelan proses dan prediksi hasil konversi hingga pemantauan, optimasi, dan prediksi keluaran energi. Perkembangan tersebut memberikan landasan bahwa pendekatan berbasis data dapat digunakan untuk membantu memahami hubungan antara karakteristik biomassa, kondisi lingkungan, parameter operasional, dan keluaran energi.

Namun, pemanfaatan ML dalam sistem bioenergi memerlukan ketersediaan data yang representatif terhadap kondisi aktual. Dalam konteks tersebut, *Internet of Things* (IoT) dapat berperan sebagai lapisan akuisisi data yang menghubungkan kondisi fisik sumber biomassa dan proses konversi dengan sistem digital. Morkūnas *et al.* (2024) melalui kajian mengenai peran AI dan IoT dalam pemanfaatan energi terbarukan menunjukkan bahwa integrasi kedua teknologi tersebut dapat mendukung pengelolaan sumber daya dan energi, tetapi penerapannya masih dipengaruhi oleh aspek skalabilitas teknologi, kebijakan, infrastruktur, dan kapasitas pengguna. Suwarjono dan Afriza (2025) melalui Systematic Literature Review (SLR) terhadap 26 penelitian mengenai integrasi IoT dan ML dalam manajemen energi menunjukkan bahwa kombinasi sensor, perangkat IoT, pemrosesan berbasis edge atau cloud, serta algoritma ML seperti *Support Vector Machine* (SVM), Decision Tree, Random Forest, dan *Long Short-Term Memory* (LSTM) dapat mendukung pemantauan konsumsi energi, deteksi anomali, analisis pola, dan pengelolaan energi secara *real-time*. Kajian tersebut juga mengidentifikasi tantangan berupa biaya instalasi, keamanan data, infrastruktur, interoperabilitas, dan keterbatasan sumber daya manusia. Sementara itu, Rajagopalan *et al.* (2024) melalui kajian mengenai integrasi IoT dan cloud computing pada sistem tenaga menunjukkan bahwa IoT dapat menyediakan konektivitas dan akuisisi data, sedangkan cloud computing mendukung penyimpanan, pemrosesan, analitik prediktif, dan optimasi sistem energi. Temuan tersebut menunjukkan bahwa IoT dapat menyediakan data aktual yang diperlukan oleh sistem analitik, sedangkan ML dapat digunakan untuk mengolah data tersebut menjadi informasi prediktif dan analitik yang mendukung pengelolaan energi.



Meskipun berbagai penelitian tersebut telah menunjukkan perkembangan penggunaan biomassa, ML, AI, dan IoT dalam sistem energi, hasil kajian literatur menunjukkan bahwa pengembangan masing-masing komponen masih banyak dilakukan pada konteks dan tahapan sistem yang berbeda. Penelitian mengenai biomassa dan rantai pasok berfokus pada ketersediaan bahan baku, karakteristik, distribusi, logistik, dan teknologi pemanfaatan. Penelitian ML banyak berfokus pada pemodelan, prediksi, pemantauan, optimasi, dan pengendalian proses konversi. Penelitian IoT lebih banyak menempatkan sensor dan konektivitas sebagai sarana akuisisi serta komunikasi data, sedangkan penelitian AI dalam sistem energi mencakup peramalan, optimasi, pengendalian, dan pengambilan keputusan. Dengan demikian, masih terdapat kebutuhan terhadap kerangka yang menghubungkan pemetaan dan karakterisasi sumber biomassa dengan data kondisi aktual, analisis berbasis ML, dan pengambilan keputusan pemanfaatan biomassa secara terintegrasi. Kesenjangan tersebut tidak berarti bahwa integrasi AI, ML, atau IoT belum pernah diterapkan pada sistem energi, tetapi menunjukkan bahwa integrasi pada tingkat sistem yang secara khusus menghubungkan pemetaan potensi biomassa, karakteristik lokal, akuisisi data aktual, analitik, pemilihan teknologi, dan strategi pemanfaatan masih perlu dirumuskan secara lebih terstruktur.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, artikel ini mengusulkan BioOptima Intelligence (*Biological Optimization through Intelligent Energy Systems*) sebagai kerangka konseptual sistem bioenergi adaptif yang mengintegrasikan pemetaan potensi dan karakteristik biomassa, IoT, ML, dan AI. Dalam kerangka ini, pemetaan dan karakterisasi biomassa menjadi sumber informasi awal mengenai jenis, lokasi, ketersediaan, dan karakteristik bahan baku. IoT ditempatkan sebagai lapisan akuisisi dan komunikasi data untuk memperoleh informasi kondisi aktual, sedangkan ML digunakan untuk mempelajari pola dan hubungan antara karakteristik biomassa, kondisi lingkungan, parameter operasional, dan keluaran energi. Hasil analitik ML selanjutnya dapat digunakan oleh lapisan pengambilan keputusan berbasis AI untuk menghasilkan rekomendasi mengenai pemilihan biomassa, teknologi konversi, penyesuaian kondisi operasi, dan strategi pemanfaatan. Dengan mekanisme umpan balik, data dari proses implementasi dan pemantauan dapat digunakan kembali untuk memperbarui analisis sehingga sistem dirancang untuk beradaptasi terhadap perubahan kondisi sumber daya dan operasi.

Kebaruan konseptual BioOptima Intelligence tidak terletak pada penciptaan algoritma AI atau ML baru maupun teknologi konversi biomassa baru, tetapi pada integrasi berbagai komponen tersebut dalam satu kerangka sistem pendukung keputusan untuk pemanfaatan biomassa yang heterogen dan terdistribusi. Kerangka ini menghubungkan tahapan pemetaan biomassa, karakterisasi, akuisisi data, integrasi dan validasi data, analisis ML, pengambilan keputusan berbasis AI, implementasi, pemantauan, dan umpan balik dalam satu alur adaptif. Dengan pendekatan tersebut, keputusan pemanfaatan biomassa tidak hanya didasarkan pada estimasi jumlah sumber daya, tetapi diarahkan untuk mempertimbangkan karakteristik bahan, kondisi lingkungan, kondisi operasional, aspek logistik, serta kesesuaian teknologi konversi secara bersamaan. Posisi ini membedakan BioOptima Intelligence dari penelitian yang umumnya berfokus pada satu proses, satu jenis biomassa, satu teknologi konversi, atau satu fungsi analitik tertentu.

Kontribusi artikel ini terdiri atas tiga aspek. Pertama, artikel merumuskan kerangka konseptual BioOptima Intelligence yang mengintegrasikan pemetaan potensi dan karakteristik biomassa dengan akuisisi data berbasis IoT, analitik ML, dan pengambilan keputusan berbasis AI. Kedua,



artikel memetakan fungsi setiap komponen dalam mekanisme adaptif yang menghubungkan kondisi sumber biomassa, data aktual, proses konversi, rekomendasi pemanfaatan, serta umpan balik sistem. Ketiga, artikel mengidentifikasi kebutuhan pengembangan dan agenda penelitian lanjutan yang mencakup pembangunan dataset, pemilihan dan validasi model, pengembangan prototipe IoT, pengujian lapangan, serta evaluasi teknis, ekonomi, lingkungan, dan keamanan. Oleh karena itu, tujuan artikel ini adalah merumuskan kerangka konseptual BioOptima Intelligence, menjelaskan mekanisme operasional dan arsitekturnya, mengidentifikasi peran ML, AI, dan IoT dalam sistem, serta membahas kebutuhan dan keterbatasan implementasinya. Karena penelitian ini masih berada pada tahap perumusan kerangka konseptual, artikel tidak mengklaim adanya peningkatan kinerja yang telah terukur. Efektivitas kerangka BioOptima Intelligence masih memerlukan pembuktian melalui pembangunan dataset, pengembangan dan validasi model, pengembangan prototipe, serta pengujian pada kondisi lapangan.

## 2. METODE

### 2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian literatur terstruktur (*structured literature review*) yang dipadukan dengan analisis konseptual untuk mengembangkan kerangka BioOptima Intelligence, yaitu kerangka konseptual integrasi kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), *machine learning*, dan *Internet of Things* (IoT) dalam pemetaan dan optimasi pemanfaatan biomassa untuk energi. Pendekatan ini digunakan untuk mengidentifikasi, menelaah, dan menyintesis penelitian terdahulu mengenai karakterisasi sumber daya biomassa, pemetaan potensi spasial, pengelolaan rantai pasok, akuisisi data, analisis berbasis kecerdasan buatan, serta sistem pendukung keputusan.

Kajian literatur terstruktur dilakukan untuk memperoleh pemahaman mengenai perkembangan pendekatan dan teknologi yang relevan, sedangkan analisis konseptual digunakan untuk mengidentifikasi hubungan antarkomponen, keterbatasan pendekatan yang telah dibahas dalam literatur, dan kebutuhan integrasi yang menjadi dasar pengembangan kerangka yang diusulkan. Penelitian ini tidak mencakup pengembangan prototipe, eksperimen lapangan, ataupun pengujian kinerja sistem. Oleh karena itu, keluaran penelitian berupa kerangka konseptual yang disusun berdasarkan sintesis literatur dan belum dimaksudkan sebagai sistem yang telah tervalidasi secara empiris.

### 2.2 Strategi Penelusuran Literatur

Penelusuran literatur dilakukan melalui beberapa sumber informasi, yaitu Google Scholar, ScienceDirect (Elsevier), Garuda, SINTA, Neliti, arXiv, MDPI dan direktori akses terbuka, serta pencarian web umum melalui Google Web Search. Penggunaan beragam sumber tersebut bertujuan menjangkau publikasi nasional dan internasional, penelitian mengenai perkembangan teknologi, serta informasi kelembagaan yang relevan dengan pemanfaatan biomassa untuk energi.

Penelusuran difokuskan pada publikasi dalam rentang lima tahun terakhir pada saat penelusuran dilakukan. Pemilihan rentang waktu tersebut dimaksudkan untuk memperoleh



literatur yang relatif mutakhir mengenai perkembangan pemetaan biomassa, pemanfaatan biomassa untuk energi, integrasi IoT, penerapan *machine learning*, dan sistem pendukung keputusan. Relevansi substansi terhadap tujuan penelitian tetap menjadi pertimbangan utama dalam menentukan kelayakan suatu sumber untuk digunakan dalam sintesis.

Kata kunci yang digunakan dalam penelusuran meliputi *biomass*, *biomass waste*, *bioenergy*, *biofuel*, *biomass mapping*, *biomass supply chain*, *machine learning*, *artificial intelligence*, *Internet of Things*, *IoT*, dan *decision support system*. Kata kunci tersebut dipilih untuk mencakup tiga ranah utama, yaitu karakterisasi dan pemetaan sumber daya biomassa, penerapan teknologi digital untuk akuisisi serta analisis data, dan pemanfaatan hasil analisis untuk mendukung pengambilan keputusan. Penelusuran dilakukan dengan mempertimbangkan keterkaitan istilah-istilah tersebut dengan fokus penelitian.

### 2.3 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Seleksi literatur dilakukan berdasarkan relevansi topik, keterkaitan dengan tujuan penelitian, kredibilitas sumber, serta kecukupan informasi yang diperlukan untuk analisis konseptual. Literatur dipertimbangkan untuk dimasukkan apabila membahas biomassa dalam konteks energi, pemetaan atau karakterisasi potensi biomassa, rantai pasok biomassa, penerapan AI dan *machine learning*, integrasi IoT, atau sistem pendukung keputusan yang relevan dengan pengelolaan biomassa. Sumber yang memberikan informasi kelembagaan atau konteks kebijakan juga dapat digunakan sepanjang mendukung pembahasan penelitian.

Literatur dikeluarkan dari kajian berdasarkan beberapa alasan eksklusi. Pertama, fokus topik tidak bersinggungan dengan tujuan penelitian, khususnya apabila tidak memiliki hubungan substantif dengan pemetaan, pengelolaan, atau optimasi pemanfaatan biomassa. Kedua, pembahasan mengenai biomassa berada di luar konteks energi sehingga tidak sesuai dengan ruang lingkup penelitian. Ketiga, sumber membahas sistem energi terbarukan nonbiomassa tanpa keterkaitan langsung dengan integrasi teknologi yang dikaji. Keempat, tipe publikasi dinilai kurang kredibel atau tidak menyediakan informasi yang memadai untuk mendukung analisis. Kelima, kendala akses atau bahasa menghalangi penelaahan isi sumber secara memadai.

Penerapan kriteria inklusi dan eksklusi tersebut bertujuan menjaga kesesuaian literatur dengan fokus penelitian. Pertimbangan akses dan bahasa diperlakukan sebagai kendala praktis dalam proses penelaahan, sedangkan penilaian kredibilitas tetap didasarkan pada karakteristik sumber dan kualitas informasi yang tersedia. Dengan demikian, seleksi tidak hanya mempertimbangkan kesesuaian kata kunci, tetapi juga kontribusi substantif setiap sumber terhadap pengembangan kerangka konseptual BioOptima Intelligence.

### 2.4 Penilaian Mutu dan Relevansi Literatur

Literatur yang digunakan dinilai berdasarkan tiga aspek utama, yaitu kredibilitas penerbit dan indeksasi, ketajaman metodologi, serta kemutakhiran data. Aspek kredibilitas penerbit dan indeksasi mencakup keterlacakan publikasi, identitas penerbit atau lembaga penerbit, dan informasi mengenai status publikasi yang tersedia. Indeksasi digunakan sebagai salah satu pertimbangan dalam menilai keterlacakan sumber, bukan sebagai satu-satunya penentu kualitas ilmiah.



Aspek ketajaman metodologi mencakup kejelasan tujuan penelitian, kesesuaian pendekatan yang digunakan, kecukupan data atau bukti pendukung, serta kesesuaian kesimpulan dengan hasil yang dilaporkan. Aspek ini digunakan untuk menilai sejauh mana suatu publikasi dapat mendukung penjelasan mengenai pendekatan teknis, hubungan antarkomponen, dan keterbatasan penelitian terdahulu. Sementara itu, aspek kemutakhiran data mempertimbangkan tahun publikasi serta relevansi informasi terhadap perkembangan penelitian dan teknologi yang menjadi fokus kajian.

Ketiga aspek tersebut digunakan secara bersama-sama untuk menilai kelayakan sumber sebagai dasar sintesis konseptual. Artikel jurnal digunakan terutama untuk mengidentifikasi pendekatan, temuan, dan keterbatasan penelitian terdahulu. Sementara itu, publikasi lembaga internasional dan sumber dari kementerian digunakan sesuai relevansinya untuk mendukung konteks kelembagaan, kebijakan, atau informasi mengenai pemanfaatan biomassa. Perbedaan karakteristik sumber tersebut diperhatikan dalam interpretasi informasi agar klaim ilmiah tidak hanya didasarkan pada sumber yang tidak dirancang sebagai publikasi penelitian.

## 2.5 Analisis dan Sintesis Literatur

Analisis literatur dilakukan secara kualitatif melalui identifikasi tema, pengelompokan informasi, perbandingan pendekatan, dan sintesis konseptual. Literatur yang terpilih ditelaah untuk mengidentifikasi kontribusinya terhadap pemetaan dan karakterisasi biomassa, pengumpulan serta validasi data, analisis potensi menggunakan *machine learning*, dukungan rekomendasi berbasis AI, dan pemantauan implementasi. Pengelompokan tersebut digunakan untuk memahami fungsi setiap komponen teknologi serta hubungan yang berpotensi dibangun di antara komponen-komponen tersebut.

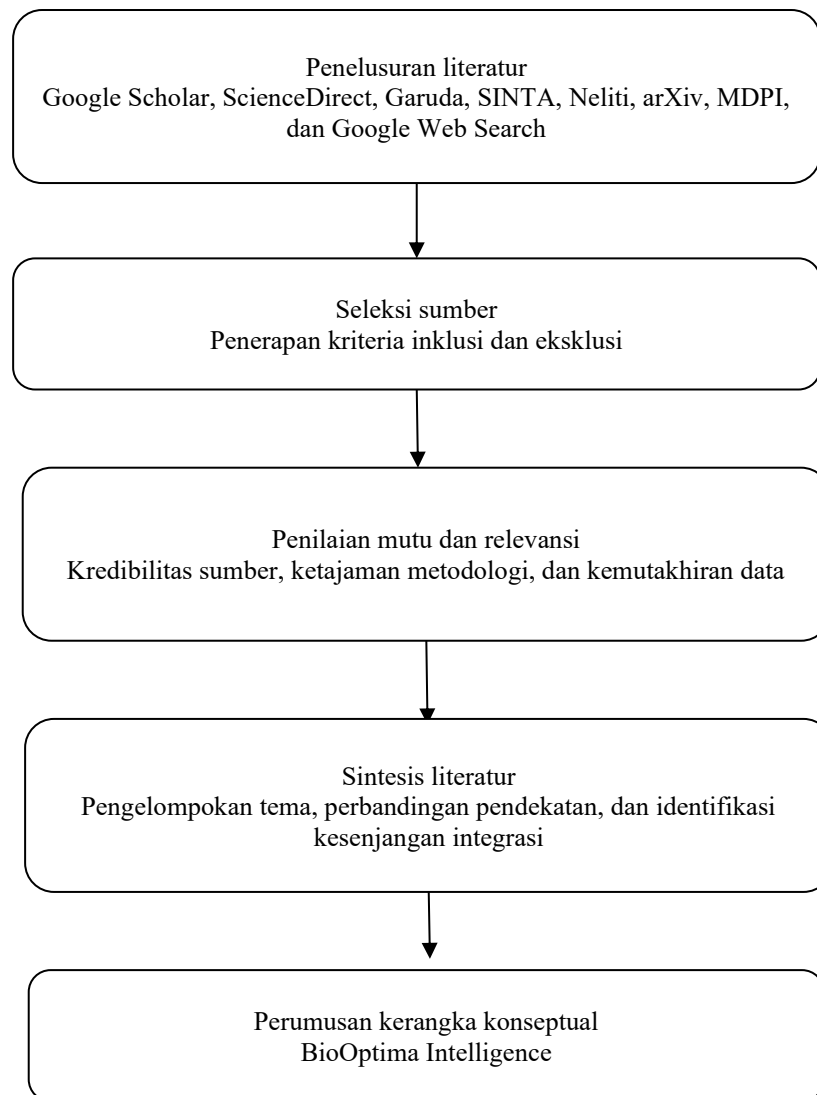
Pada tahap sintesis, temuan dari berbagai kelompok literatur dibandingkan berdasarkan fokus penerapan, jenis data yang digunakan, fungsi teknologi, bentuk dukungan terhadap pengambilan keputusan, dan keterbatasan yang dibahas oleh penelitian terdahulu. Perbandingan ini menjadi dasar untuk mengidentifikasi aspek yang belum terhubung secara memadai dalam ruang lingkup literatur yang ditelaah. Identifikasi tersebut selanjutnya digunakan untuk merumuskan kebutuhan integrasi antara informasi spasial biomassa, akuisisi data, analisis prediktif, rekomendasi keputusan, serta pemantauan dan umpan balik.

Sintesis tidak dimaksudkan untuk menghitung ukuran efek, membandingkan kinerja algoritma secara statistik, atau menghasilkan estimasi kuantitatif mengenai peningkatan akurasi dan efisiensi. Fokus analisis terletak pada hubungan fungsional antarkomponen dan perumusan kerangka yang dapat menjadi dasar bagi penelitian empiris selanjutnya. Oleh sebab itu, kesimpulan mengenai potensi manfaat integrasi teknologi diposisikan sebagai proposisi konseptual yang memerlukan pengujian lebih lanjut.

Secara keseluruhan, proses penelitian dilaksanakan melalui tahapan penelusuran literatur, seleksi sumber berdasarkan kriteria yang ditetapkan, penilaian mutu dan relevansi literatur, analisis dan sintesis temuan, serta perumusan kerangka konseptual BioOptima Intelligence. Hubungan antartahapan tersebut disajikan pada Gambar 1.



**Gambar 1. Alur Metode Penelitian Pengembangan Kerangka Konseptual BioOptima Intelligence**



## 2.6 Pengembangan Kerangka Konseptual BioOptima Intelligence

Kerangka BioOptima Intelligence dikembangkan berdasarkan hasil sintesis literatur dengan menghubungkan kebutuhan pemetaan sumber daya biomassa, pengumpulan dan validasi data, analisis berbasis *machine learning*, rekomendasi keputusan berbasis AI, serta pemantauan dan umpan balik. Setiap komponen dirumuskan berdasarkan fungsi konseptualnya dalam mendukung pengelolaan biomassa untuk energi, sedangkan hubungan antarkomponen disusun untuk menggambarkan aliran informasi dari identifikasi sumber daya hingga dukungan pengambilan keputusan.

Dalam kerangka yang diusulkan, pemetaan dan karakterisasi biomassa berfungsi sebagai dasar informasi mengenai potensi dan karakteristik sumber daya. IoT ditempatkan sebagai pendekatan untuk mendukung akuisisi data yang relevan sesuai kebutuhan implementasi. *Machine learning* diposisikan sebagai pendekatan analitis untuk mengolah data dan mendukung identifikasi pola atau



estimasi, sedangkan AI dalam lapisan dukungan keputusan merepresentasikan pemanfaatan keluaran analisis untuk menghasilkan rekomendasi sesuai tujuan dan kendala pengelolaan. Pemantauan serta umpan balik dirancang secara konseptual untuk mendukung pembaruan informasi dan evaluasi keputusan.

Hubungan antarkomponen tersebut merupakan rancangan konseptual dan tidak menyatakan bahwa seluruh fungsi telah diimplementasikan atau diuji. Efektivitas integrasi, ketepatan prediksi, kelayakan rekomendasi, dan dampak terhadap efisiensi pemanfaatan biomassa masih memerlukan penelitian lanjutan melalui pengembangan prototipe, penggunaan data aktual, dan pengujian empiris.

## 2.7 Komposisi Literatur dan Batasan Metode

Literatur yang digunakan dalam penelitian ini berjumlah 23 sumber, yang terdiri atas 19 artikel jurnal nasional dan internasional, satu sumber berita dari kementerian di Indonesia, dan tiga publikasi lembaga internasional. Keseluruhan sumber tersebut menjadi dasar untuk mengidentifikasi pendekatan yang relevan, membandingkan kontribusi penelitian terdahulu, serta menyusun sintesis konseptual bagi pengembangan BioOptima Intelligence.

Penelitian ini memiliki batasan karena hasil analisis bergantung pada literatur yang berhasil diidentifikasi, diakses, dan ditelaah berdasarkan kriteria yang digunakan. Selain itu, penelitian tidak melakukan validasi empiris terhadap kerangka yang diusulkan. Dengan demikian, kerangka BioOptima Intelligence perlu dipahami sebagai hasil pengembangan konseptual berbasis literatur, yang masih memerlukan pengujian melalui implementasi dan evaluasi pada konteks pemanfaatan biomassa yang nyata.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Tantangan Pemanfaatan Potensi Biomassa Lokal

Potensi biomassa Indonesia beragam dari segi jenis, lokasi, jumlah, karakteristik, dan peruntukannya, dengan sumber yang meliputi pertanian, perkebunan, kehutanan, peternakan, perikanan, pesisir, serta limbah perkotaan. Yana *et al.* (2022) melalui kajian pemanfaatan limbah biomassa sebagai sumber energi terbarukan di Indonesia menunjukkan bahwa pengembangan biomassa dipengaruhi tidak hanya oleh ketersediaan bahan baku, tetapi juga implementasi, kebijakan, regulasi, serta persaingan penggunaan biomassa untuk kebutuhan energi dan nonenergi. Hal serupa ditunjukkan Suhartini *et al.* (2024) melalui kajian *review* mengenai valorisasi makroalga untuk biofuel di Indonesia yang mengevaluasi ketersediaan bahan baku, praktik budidaya, teknologi praperlakuan dan konversi, peningkatan skala, serta peluang komersialisasi dari aspek teknologi, ekonomi, dan lingkungan. Kajian tersebut menunjukkan bahwa Indonesia memiliki potensi makroalga sekitar 9,96 juta ton atau 26,86% produksi, tetapi pemanfaatannya masih menghadapi keterbatasan kapasitas penelitian dan pengembangan, kesiapan teknologi, kemampuan operasional, serta akses pembiayaan. Variasi distribusi geografis, iklim, dan ketersediaan infrastruktur juga menyebabkan strategi pemanfaatan perlu disesuaikan dengan kondisi wilayah. Kementerian ESDM (2023) mencatat potensi biomassa Indonesia setara dengan



56,97 GW listrik, tetapi data tersebut bersifat agregat sehingga belum menggambarkan kesesuaian setiap lokasi dengan jenis biomassa dan teknologi konversi tertentu. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan berbasis data yang mampu memetakan potensi biomassa secara spesifik serta menghubungkan karakteristik lokal dengan pilihan pemanfaatan energi yang sesuai.

Selain variasi sumber daya, manajemen rantai pasok menjadi tantangan penting karena biomassa tersebar secara geografis dan karakteristiknya dapat berubah menurut waktu, musim, kadar air, komposisi, serta metode penanganan. Melalui analisis bibliometrik literatur rantai pasok biomassa-ke-bioenergi, Helal *et al.* (2023) mengkaji tantangan operasional dalam distribusi energi terbarukan dan menunjukkan bahwa kelayakan serta keberhasilan sistem bioenergi bergantung pada efisiensi seluruh jaringan rantai pasok, mulai dari pengumpulan bahan baku, prapengolahan (*pre-processing*), logistik distribusi, hingga pemilihan teknologi konversi di tingkat hilir. Sejalan dengan itu, IRENA (2022) menekankan bahwa pengembangan bioenergi di Asia Tenggara membutuhkan penyediaan bahan baku berkelanjutan serta koordinasi antarpemangku kepentingan. Oleh karena itu, pemetaan potensi biomassa perlu dipadukan dengan data karakteristik dan kondisi logistik aktual agar keputusan pemanfaatan tidak hanya didasarkan pada estimasi ketersediaan bahan baku secara agregat.

### 3.2 Kesenjangan Pendekatan Konvensional dan Kebutuhan Sistem Adaptif

Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk mengonversi biomassa menjadi energi, seperti biogas, biofuel, pembakaran biomassa, dan *Microbial Fuel Cell* (MFC), tetapi masing-masing memiliki kebutuhan bahan baku dan kondisi operasi yang berbeda. Savvidou *et al.* (2022) melalui kajian mengenai berbagai limbah organik sebagai substrat MFC menunjukkan bahwa jenis dan karakteristik substrat dapat memengaruhi parameter kinerja seperti power density, penghilangan *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan coulombic efficiency. Poornima *et al.* (2024) melalui kajian terhadap berbagai teknologi transformasi biomassa, baik termokimia maupun biokimia, menunjukkan bahwa efektivitas konversi dipengaruhi oleh karakteristik bahan baku, praperlakuan, dan pemilihan teknologi, sehingga tidak terdapat satu jalur konversi yang sesuai untuk seluruh jenis biomassa. Sementara itu, Abdollahfard *et al.* (2023) mengkaji penerapan *Artificial Intelligence* (AI) untuk meningkatkan kinerja MFC dan menunjukkan bahwa pendekatan berbasis AI dapat membantu memodelkan hubungan nonlinear antarparameter serta mendukung penentuan kondisi operasi yang lebih sesuai. Temuan tersebut menunjukkan bahwa pemanfaatan biomassa memerlukan pendekatan yang mampu mempertimbangkan karakteristik bahan baku, pilihan teknologi, dan kondisi operasi secara bersamaan, sehingga menjadi dasar bagi BioOptima Intelligence untuk mengintegrasikan data biomassa, kondisi lingkungan, parameter operasi, serta AI dan ML dalam mendukung pemilihan dan optimasi strategi pemanfaatan biomassa.

Kesenjangan yang diidentifikasi bukan berupa ketiadaan teknologi konversi, melainkan belum terintegrasinya informasi mengenai sumber biomassa, karakteristik bahan, kondisi lingkungan, dan pilihan pemanfaatan dalam satu kerangka pengambilan keputusan adaptif. Karena itu, BioOptima Intelligence diposisikan sebagai sistem pendukung keputusan yang berada di atas teknologi konversi yang telah tersedia. Sistem tidak menggantikan biogas, biofuel, pembakaran biomassa, atau MFC, tetapi membantu menentukan pemanfaatan yang sesuai berdasarkan data.



### 3.3 Konsep BioOptima Intelligence

BioOptima Intelligence merupakan singkatan dari *Biological Optimization through Intelligent Energy Systems*, yaitu konsep sistem bioenergi adaptif yang menghubungkan pemetaan potensi biomassa dengan teknologi pengumpulan, pengolahan, dan analisis data. Sistem ini mengintegrasikan pemetaan potensi biomassa, karakterisasi bahan, data historis, serta data sensor sebagai sumber informasi awal. Data tersebut kemudian diakuisisi melalui IoT, diintegrasikan, dan divalidasi sebelum digunakan sebagai masukan bagi model *Machine Learning* (ML) untuk mempelajari pola hubungan antara karakteristik biomassa, kondisi operasional, dan produksi energi. Hasil analisis ML selanjutnya menjadi informasi bagi lapisan *Artificial Intelligence* (AI) untuk menghasilkan prediksi, rekomendasi, dan strategi optimasi pemanfaatan biomassa. Setiap komponen memiliki fungsi yang saling terhubung, mulai dari identifikasi potensi dan karakteristik biomassa, pengumpulan data kondisi aktual, pengolahan dan analisis data, hingga pengambilan keputusan berdasarkan kondisi lokal dan operasional. Alur kerja dan komponen utama BioOptima Intelligence tersebut disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1. Komponen utama BioOptima Intelligence**

| Komponen                            | Fungsi utama                                                            | Keluaran                                       |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Pemetaan dan karakterisasi biomassa | Mengidentifikasi lokasi, jenis, potensi, dan sifat bahan baku           | Informasi spasial dan karakteristik biomassa   |
| Akuisisi data berbasis IoT          | Mengumpulkan data kondisi lingkungan dan proses apabila sensor tersedia | Data observasi berkala atau <i>real-time</i>   |
| Integrasi dan validasi data         | Menggabungkan data dan memeriksa kelengkapan serta konsistensinya       | Dataset yang siap dianalisis                   |
| Analitik AI/ML                      | Mempelajari pola dan menghasilkan prediksi, klasifikasi, atau estimasi  | Keluaran analitik sesuai tujuan pemodelan      |
| Sistem pendukung keputusan          | Menghubungkan hasil analitik dengan kriteria dan batasan operasional    | Rekomendasi pemanfaatan biomassa               |
| Implementasi dan pemantauan         | Mengamati penerapan rekomendasi dan hasil operasional                   | Informasi kondisi dan kinerja aktual           |
| Umpan balik                         | Menggunakan hasil pemantauan untuk mengevaluasi keputusan dan model     | Dasar untuk pembaruan analisis dan rekomendasi |

Tabel 1 menunjukkan bahwa BioOptima Intelligence dirancang sebagai rangkaian fungsi yang saling berhubungan, bukan sekadar kumpulan perangkat digital. Pemetaan menyediakan konteks sumber daya, IoT mendukung akuisisi data apabila infrastruktur tersedia, dan AI/ML menyediakan kemampuan analitik. Sistem pendukung keputusan selanjutnya menghubungkan hasil analisis dengan kebutuhan operasional, sedangkan pemantauan dan umpan balik menyediakan dasar bagi evaluasi berkelanjutan.



### 3.4 Mekanisme Operasional

Mekanisme operasional BioOptima Intelligence dirancang sebagai alur adaptif yang menghubungkan identifikasi sumber biomassa dengan pengambilan keputusan berbasis data. Alur dimulai dari pemetaan dan karakterisasi biomassa, dilanjutkan dengan akuisisi data, integrasi dan validasi, pemodelan ML, analisis AI, implementasi rekomendasi, serta pemantauan dan pembelajaran berkelanjutan. Tahapan tersebut disusun agar keputusan pemanfaatan biomassa dapat mempertimbangkan kondisi lokal dan perubahan data. Tahapan mekanisme operasional BioOptima Intelligence disajikan pada Tabel 2.

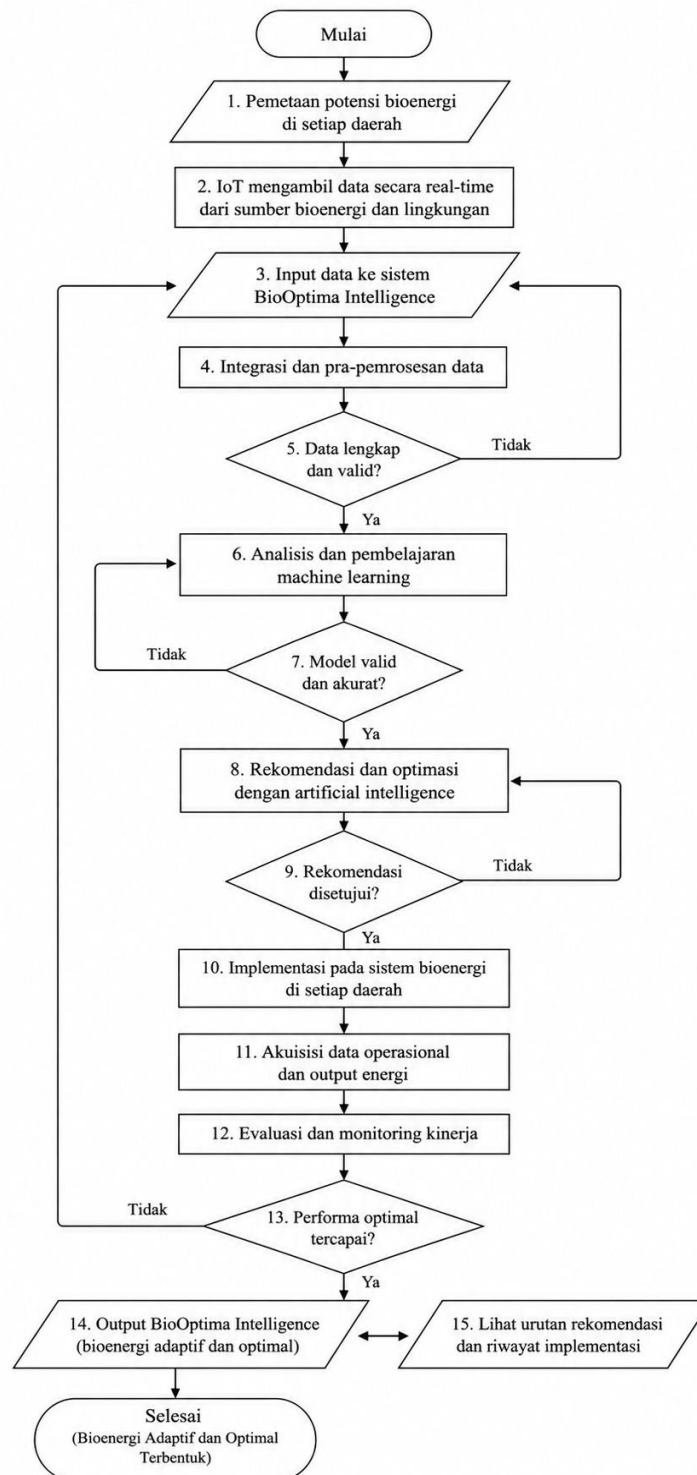
**Tabel 2. Tahapan mekanisme operasional BioOptima Intelligence**

| Tahap | Proses                      | Keluaran                                               |
|-------|-----------------------------|--------------------------------------------------------|
| 1     | Pemetaan potensi biomassa   | Informasi lokasi dan estimasi potensi                  |
| 2     | Karakterisasi biomassa      | Informasi sifat dan kualitas bahan baku                |
| 3     | Akuisisi data IoT           | Data dari sensor, pengukuran, atau catatan operasional |
| 4     | Integrasi dan validasi data | Dataset terstruktur dan tervalidasi                    |
| 5     | Analitik AI/ML              | Prediksi, klasifikasi, atau estimasi sesuai tujuan     |
| 6     | Pengambilan keputusan       | Rekomendasi berdasarkan kriteria dan batasan           |
| 7     | Implementasi rekomendasi    | Penerapan pilihan pemanfaatan yang disetujui           |
| 8     | Pemantauan hasil            | Catatan kondisi dan kinerja aktual                     |
| 9     | Evaluasi dan umpan balik    | Dasar evaluasi serta pembaruan model atau keputusan    |

Tahapan pada Tabel 2 menunjukkan bahwa BioOptima Intelligence tidak hanya berfungsi sebagai sistem pemetaan biomassa, tetapi sebagai sistem pendukung keputusan yang menghubungkan data sumber daya dengan proses konversi. Hubungan antartahapan tersebut divisualisasikan dalam flowchart untuk memperjelas urutan input, pengolahan, analisis, keputusan, dan umpan balik. Alur mekanisme operasional BioOptima Intelligence secara lengkap divisualisasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Flowchart mekanisme operasional BioOptima Intelligence



### 3.5 Peran *Machine Learning*

*Machine Learning* (ML) berfungsi sebagai komponen pembelajaran pola dalam BioOptima Intelligence. Model memanfaatkan data biomassa, lingkungan, operasional, dan produksi energi untuk mempelajari hubungan antarvariabel yang dapat digunakan dalam prediksi dan pengambilan



keputusan. Wang *et al.* (2022) melalui kajian kritis mengenai penerapan ML pada bioenergi dan biofuel menunjukkan bahwa kompleksitas sistem bioenergi menyebabkan pendekatan berbasis pengalaman atau teori saja memiliki keterbatasan dalam menghasilkan prediksi yang akurat. Kajian tersebut menunjukkan bahwa ML telah diterapkan untuk klasifikasi, regresi, prediksi, dan optimasi pada berbagai proses, termasuk pemanfaatan biomassa lignoselulosa, budidaya mikroalga, serta konversi biofuel. Khan *et al.* (2023) secara khusus mengkaji penerapan ML pada konversi termokimia biomassa dan menunjukkan bahwa ML berpotensi digunakan untuk memprediksi hasil konversi, mengoptimalkan proses, melakukan pemantauan secara *real-time*, serta mendukung pengendalian proses. Kajian tersebut juga menunjukkan bahwa *Artificial Neural Network* (ANN) banyak digunakan karena mampu mempelajari hubungan input-output yang kompleks dan nonlinear. Sementara itu, Mondal *et al.* (2023) menunjukkan bahwa ML dapat digunakan untuk menganalisis data bioproses yang kompleks dan mendukung pemodelan, optimasi, pemantauan, serta pengendalian proses pada bidang seperti produksi biofuel dan pengolahan air limbah. Mereka juga menekankan bahwa penerapan ML secara *real-time* masih menghadapi tantangan terkait ketersediaan data lapangan, integrasi sensor, pengelolaan data, dan integrasi sistem digital. Berdasarkan ketiga kajian tersebut, ML pada BioOptima Intelligence ditempatkan sebagai komponen yang mempelajari hubungan antara karakteristik biomassa, kondisi proses, dan keluaran energi untuk mendukung prediksi serta optimasi pemanfaatan biomassa.

Beberapa model yang secara konseptual dapat dipertimbangkan adalah Random Forest, XGBoost, *Artificial Neural Network*, dan *Long Short-Term Memory* (LSTM). Random Forest dan XGBoost dapat digunakan untuk pemodelan prediktif berbasis data tabular, *Artificial Neural Network* untuk mempelajari hubungan input-output yang kompleks, sedangkan LSTM dapat dipertimbangkan untuk mengolah data deret waktu. Hess-Dunlop *et al.* (2024) menunjukkan bahwa pendekatan deep learning berbasis LSTM dapat mempelajari pola perubahan keluaran energi *Microbial Fuel Cell* (MFC) dan digunakan untuk memprediksi tegangan pada beberapa rentang waktu. Sementara itu, Khanaum *et al.* (2026) menunjukkan bahwa *machine learning* multivariat dapat digunakan untuk menganalisis hubungan antara parameter seperti pH dan *Chemical Oxygen Demand* (COD) dengan indikator kinerja MFC, termasuk tegangan, power density, current density, dan coulombic efficiency. Kedua penelitian tersebut menunjukkan bahwa pendekatan berbasis pembelajaran mesin dapat digunakan untuk mempelajari hubungan antara karakteristik proses dan keluaran bioenergi. Pemilihan algoritma pada BioOptima Intelligence tetap harus ditentukan melalui pengujian terhadap dataset yang representatif; artikel ini tidak menetapkan satu algoritma sebagai model final. Berdasarkan peran tersebut, jenis analisis ML dalam BioOptima Intelligence, beserta contoh input dan keluarannya dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3. Peran *Machine Learning* dalam BioOptima Intelligence

| Jenis analisis | Contoh input                            | Keluaran                 |
|----------------|-----------------------------------------|--------------------------|
| Prediksi       | Karakteristik biomassa, kondisi operasi | Estimasi produksi energi |
| Klasifikasi    | Jenis dan kualitas biomassa             | Kategori pemanfaatan     |
| Regresi        | Parameter biomassa dan proses           | Nilai keluaran energi    |



|             |                                      |                            |
|-------------|--------------------------------------|----------------------------|
| Deret waktu | Sensor dan produksi energi           | Prediksi perubahan kinerja |
| Optimasi    | Prediksi model dan parameter operasi | Kandidat kondisi operasi   |

### 3.6 Peran *Artificial Intelligence*

Dalam konsep BioOptima Intelligence, *Artificial Intelligence* (AI) ditempatkan pada lapisan pengambilan keputusan yang memanfaatkan hasil prediksi dan analisis *Machine Learning* (ML) sebagai dasar untuk menghasilkan rekomendasi pemanfaatan biomassa. Ukoba *et al.* (2024) melalui kajian komprehensif mengenai penerapan AI pada sistem energi terbarukan menelaah pemanfaatan AI untuk penilaian sumber daya, peramalan energi, pemantauan, pengendalian, dan integrasi sistem. Hasil kajian menunjukkan bahwa AI dapat mengolah data dalam jumlah besar untuk mendukung prediksi dan optimasi sistem energi secara dinamis. Ejiyi *et al.* (2025) melalui tinjauan terhadap lebih dari 400 publikasi juga menunjukkan bahwa AI, termasuk ML, deep learning, dan reinforcement learning, telah diterapkan untuk optimasi produksi energi, peramalan permintaan, predictive maintenance, serta pengelolaan sistem energi terdesentralisasi. Berdasarkan temuan tersebut, AI dalam BioOptima Intelligence digunakan untuk menginterpretasikan hasil analitik ML menjadi rekomendasi yang mencakup pemilihan jenis biomassa, kombinasi sumber biomassa, pilihan teknologi konversi, serta penyesuaian kondisi operasional.

Pembagian fungsi tersebut menempatkan ML sebagai komponen yang mempelajari pola dan menghasilkan prediksi dari data, sedangkan AI digunakan sebagai kerangka pengambilan keputusan yang mengolah informasi tersebut menjadi rekomendasi dan strategi optimasi. Mundu *et al.* (2026) melalui systematic review terhadap 113 penelitian mengenai AI dalam sistem energi terbarukan menunjukkan bahwa AI dapat mendukung forecasting, predictive maintenance, optimasi penyimpanan energi, dan pengendalian microgrid, tetapi efektivitas penerapannya sangat dipengaruhi oleh kualitas data, kondisi penerapan, serta kapasitas institusi. Temuan tersebut menunjukkan bahwa rekomendasi berbasis AI tidak dapat diposisikan sebagai keputusan yang sepenuhnya mandiri, sehingga dalam BioOptima Intelligence rekomendasi tetap dibatasi oleh parameter operasi, aturan keselamatan, dan batasan sistem yang ditetapkan oleh perancang. Pada tahap awal implementasi, keputusan akhir tetap melibatkan operator atau pengelola sistem untuk memastikan rekomendasi yang dihasilkan sesuai dengan kondisi lapangan dan batas operasional.

### 3.7 Integrasi *Internet of Things*

IoT menjadi penghubung antara kondisi fisik sumber bioenergi dan sistem digital melalui proses akuisisi serta pengiriman data secara aktual. Sensor dapat digunakan untuk memantau parameter seperti pH, suhu, kelembapan, kadar air, *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biological Oxygen Demand* (BOD), laju aliran, dan produksi energi sesuai kebutuhan teknologi konversi. Morkūnas *et al.* (2024) melalui kajian literatur sistematis mengenai integrasi AI, IoT, dan energi terbarukan dalam pertanian menunjukkan bahwa IoT dapat mendukung pengumpulan informasi kondisi lapangan untuk pengelolaan sumber daya dan energi yang lebih efisien, sedangkan Suwarjono dan Afriza (2025) melalui *Systematic Literature Review* (SLR) terhadap 26 artikel menunjukkan bahwa integrasi IoT dengan sensor dan *Machine Learning* (ML) dapat mendukung pemantauan energi



secara *real-time*, deteksi anomali, dan peningkatan efisiensi energi hingga 30% pada studi-studi yang ditelaah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa IoT dalam BioOptima Intelligence dapat ditempatkan sebagai lapisan akuisisi data yang menyediakan informasi kondisi aktual bagi proses analisis ML dan pengambilan keputusan berbasis AI.

Pada tingkat perangkat dan komunikasi, ESP32, Arduino, atau Raspberry Pi secara konseptual dapat digunakan sebagai penghubung sensor dengan sistem pengolahan data, sedangkan konektivitas dapat memanfaatkan Wi-Fi, LoRaWAN, 4G/5G, dan protokol MQTT sesuai kondisi lokasi. De Oliveira Cavalcanti dan Pimenta (2023) melalui *systematic literature review* mengenai IoT untuk manajemen energi bangunan menunjukkan bahwa IoT berperan dalam membentuk alur pengelolaan energi melalui pengumpulan data, komunikasi dan pemrosesan informasi, serta penyediaan informasi untuk mendukung pengelolaan energi. Rajagopalan *et al.* (2024) melalui kajian integrasi IoT dan cloud computing pada sistem tenaga menunjukkan bahwa kombinasi keduanya dapat mendukung komunikasi, penyimpanan dan pemrosesan data, analitik prediktif, serta optimasi dan peningkatan keandalan sistem energi. Dari aspek keamanan, Trnka *et al.* (2022) melalui *systematic review* terhadap 1.622 publikasi mengenai autentikasi, otorisasi, dan manajemen identitas IoT menunjukkan beragam pendekatan keamanan yang digunakan untuk mengendalikan akses terhadap perangkat dan layanan IoT. Temuan tersebut menegaskan bahwa keamanan komunikasi, autentikasi perangkat, dan pengaturan hak akses perlu dirancang sejak awal dalam BioOptima Intelligence agar data sensor dan perangkat yang terhubung tidak menjadi titik kerentanan sistem.

3.8 Arsitektur Sistem

Arsitektur BioOptima Intelligence dapat disusun menjadi beberapa lapisan yang saling berhubungan, yaitu lapisan sumber daya, akuisisi data, komunikasi, penyimpanan dan integrasi data, analitik ML, pengambilan keputusan AI, implementasi, pemantauan, dan umpan balik. Arsitektur tersebut menempatkan teknologi konversi bioenergi sebagai bagian dari lingkungan operasi yang menerima rekomendasi sistem. Dengan posisi ini, BioOptima dapat diterapkan pada berbagai teknologi konversi tanpa harus mengganti teknologi dasarnya. Arsitektur BioOptima Intelligence disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Arsitektur BioOptima Intelligence

| Lapisan     | Fungsi                         | Teknologi/komponen contoh    |
|-------------|--------------------------------|------------------------------|
| Sumber daya | Mengidentifikasi biomassa      | Pemetaan spasial, basis data |
| Akuisisi    | Mengukur kondisi lapangan      | Sensor, ESP32/Arduino        |
| Komunikasi  | Mengirim data                  | Wi-Fi, LoRaWAN, 4G/5G, MQTT  |
| Data        | Menyimpan dan memvalidasi data | Database/cloud               |
| ML          | Belajar dan memprediksi        | RF, XGBoost, ANN, LSTM       |



|              |                             |                                    |
|--------------|-----------------------------|------------------------------------|
| AI           | Mendukung keputusan         | Rule/decision engine, optimization |
| Implementasi | Menjalankan rekomendasi     | Teknologi konversi bioenergi       |
| Pemantauan   | Mengukur kinerja aktual     | Sensor dan pencatatan energi       |
| Umpan balik  | Memperbarui model/keputusan | Retraining dan evaluasi            |

3.9 Sintesis Research Gap dan Kontribusi Konseptual BioOptima Intelligence

Penelitian terdahulu telah membahas berbagai aspek digitalisasi bioenergi, mulai dari rantai pasok biomassa, pemodelan berbasis *machine learning* (ML), hingga integrasi AI dan IoT. Namun, fokus kajian tersebut berbeda dalam cakupan dan tingkat pengambilan keputusan. Helal *et al.* (2023) membahas rantai pasok biomassa, Khan *et al.* (2023) mengkaji ML dalam konversi termokimia biomassa, sedangkan Mondal *et al.* (2023) menyoroti optimasi dan pemantauan bioproses. Sementara itu, Morkūnas *et al.* (2024) dan Ejiyi *et al.* (2025) membahas penerapan teknologi digital dan AI dalam konteks energi yang lebih luas. Perbedaan fokus ini menjadi dasar untuk membandingkan posisi konseptual BioOptima Intelligence, sebagaimana disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Sintesis fokus penelitian terdahulu dan posisi konseptual BioOptima Intelligence

| Literatur                     | Fokus utama                                                                                         | Posisi konseptual BioOptima                                                                    |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Helal <i>et al.</i> (2023)    | Rantai pasok biomassa menuju bioenergi.                                                             | Menghubungkan informasi sumber daya dengan analisis dan keputusan pemanfaatan.                 |
| Khan <i>et al.</i> (2023)     | ML pada konversi termokimia biomassa.                                                               | Mengaitkan keluaran analitik dengan karakteristik bahan baku dan pemilihan teknologi konversi. |
| Mondal <i>et al.</i> (2023)   | ML untuk optimasi dan pemantauan bioproses.                                                         | Menghubungkan analitik proses dengan informasi sumber daya dan keputusan pada tingkat sistem.  |
| Morkūnas <i>et al.</i> (2024) | AI dan IoT dalam energi terbarukan di sektor pertanian.                                             | Memfokuskan integrasi pada pemetaan dan pemanfaatan biomassa.                                  |
| Ejiyi <i>et al.</i> (2025)    | Penerapan AI dalam sistem energi terbarukan.                                                        | Merumuskan alur keputusan yang mempertimbangkan karakteristik dan persebaran biomassa.         |
| BioOptima Intelligence        | Integrasi pemetaan, akuisisi data, analitik ML, dukungan keputusan AI, pemantauan, dan umpan balik. | Kerangka konseptual terpadu untuk mendukung pengambilan keputusan pemanfaatan biomassa.        |



Berdasarkan perbandingan tersebut, *research gap* penelitian ini tidak dirumuskan sebagai ketiadaan penelitian mengenai AI, ML, IoT, atau pengelolaan rantai pasok biomassa. Sebaliknya, kesenjangan yang diangkat terletak pada kebutuhan untuk merumuskan hubungan fungsional antara pemetaan dan karakterisasi sumber daya biomassa, akuisisi serta validasi data, analitik prediktif, pemilihan alternatif pemanfaatan, dan umpan balik operasional dalam satu kerangka konseptual yang berorientasi pada pengambilan keputusan. Rumusan ini merupakan hasil sintesis atas fokus literatur yang ditelaah dan tidak dimaksudkan untuk menyatakan bahwa seluruh penelitian terdahulu mengabaikan integrasi antarkomponen tersebut.

Kontribusi konseptual BioOptima Intelligence terdiri atas tiga aspek. Pertama, kerangka ini menempatkan pemetaan spasial dan karakterisasi biomassa sebagai dasar informasi bagi proses analisis dan pengambilan keputusan, bukan hanya sebagai keluaran inventarisasi sumber daya. Kedua, kerangka ini merumuskan hubungan fungsional antara akuisisi data, validasi data, analitik ML, dan dukungan keputusan berbasis AI, sehingga keluaran analitik secara konseptual dapat digunakan untuk menilai alternatif pemanfaatan berdasarkan karakteristik bahan baku, kondisi operasional, dan kesesuaian teknologi konversi. Ketiga, kerangka ini memasukkan pemantauan dan umpan balik sebagai bagian dari alur konseptual untuk mendukung evaluasi keputusan serta pembaruan analisis ketika data baru tersedia.

Dengan demikian, kebaruan yang diusulkan terletak pada perumusan hubungan antarkomponen dan orientasi pengambilan keputusan pada tingkat sistem, bukan pada penciptaan algoritma AI atau ML baru maupun klaim bahwa integrasi tersebut belum pernah dilakukan oleh penelitian lain. BioOptima Intelligence menawarkan struktur konseptual yang dapat menjadi dasar bagi pengembangan sistem pendukung keputusan pemanfaatan biomassa yang mempertimbangkan dimensi spasial, karakteristik bahan baku, analitik data, dan evaluasi operasional secara terpadu. Namun, karena penelitian ini belum mencakup pengembangan prototipe dan pengujian empiris, kontribusi tersebut masih berupa proposisi konseptual. Validitas dan manfaat penerapannya perlu dievaluasi lebih lanjut melalui penyusunan dataset biomassa yang representatif, pengembangan model, pengujian prototipe, dan evaluasi pada kondisi operasional yang relevan.

### 3.10 Analisis Strategis (Pendekatan SWOT dan SMART)

Analisis SWOT BioOptima Intelligence mencakup aspek integrasi teknologi, kebutuhan data, kesiapan implementasi, serta kondisi eksternal yang berpengaruh terhadap pemanfaatan biomassa. Hasil analisis disajikan pada Tabel 6.

**Tabel 6. Matriks Analisis SWOT BioOptima Intelligence**

| Parameter                      | Analisis Strategis                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Strengths</i><br>(Kekuatan) | BioOptima Intelligence mengintegrasikan pemetaan biomassa, akuisisi data berbasis IoT, analitik AI/ML, sistem pendukung keputusan, serta mekanisme pemantauan dan umpan balik dalam satu kerangka konseptual yang modular. |



|                                   |                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Weaknesses</i><br>(Kelemahan)  | BioOptima Intelligence masih berupa rancangan konseptual yang belum divalidasi melalui prototipe, dataset lapangan, dan pengujian kinerja sehingga efektivitas integrasi serta kelayakan implementasinya belum dapat dipastikan. |
| <i>Opportunities</i><br>(Peluang) | Keragaman sumber biomassa di Indonesia dan ketersediaan teknologi digital membuka peluang pengembangan sistem pendukung keputusan yang disesuaikan dengan karakteristik biomassa, kebutuhan energi, dan kondisi setiap wilayah.  |
| <i>Threats</i> (Ancaman)          | Variasi karakteristik dan pasokan biomassa, keterbatasan infrastruktur digital, risiko keamanan data, serta kesiapan sumber daya manusia dapat menghambat penerapan dan keberlanjutan sistem.                                    |

Tabel 6 memperlihatkan bahwa kekuatan utama yang diusulkan pada BioOptima Intelligence terletak pada integrasi fungsi dan rancangan arsitektur modular, bukan pada kinerja sistem yang telah terbukti. Sebaliknya, belum tersedianya validasi empiris menjadi kelemahan utama karena kemampuan analitik, keandalan akuisisi data, dan kesesuaian rekomendasi belum dapat dinilai secara kuantitatif.

Peluang pengembangan berkaitan dengan kemungkinan penerapan kerangka tersebut pada kondisi biomassa dan kebutuhan wilayah yang berbeda. Namun, peluang tersebut tetap bergantung pada ketersediaan data, infrastruktur, kapasitas pelaksana, dan kebutuhan pengguna. Ancaman berupa variasi bahan baku, kendala teknis, serta perubahan kondisi operasional juga menunjukkan bahwa rekomendasi sistem tidak dapat diterapkan secara universal tanpa memperhatikan konteks penggunaannya. Berdasarkan hasil identifikasi tersebut, implikasi strategis BioOptima Intelligence dirumuskan melalui empat kelompok strategi yang disajikan pada Tabel 7.

**Tabel 7. Implikasi strategi pengembangan berdasarkan analisis SWOT**

| Strategi                               | Arah pengembangan                                                                             | Tindakan yang diusulkan                                                                                                                                                           |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SO ( <i>Strengths-Opportunities</i> )  | Memanfaatkan integrasi teknologi untuk mendukung pemetaan dan pemilihan pemanfaatan biomassa. | Menentukan lokasi percontohan berdasarkan relevansi masalah, ketersediaan data, dan kebutuhan pemanfaatan biomassa; kemudian menyusun prototipe sesuai kebutuhan lokasi tersebut. |
| WO ( <i>Weaknesses-Opportunities</i> ) | Mengurangi keterbatasan data dan validasi melalui kolaborasi serta pengembangan bertahap.     | Menyusun dataset awal bersama pemilik atau pengelola data, menetapkan variabel input-output, dan menguji komponen sistem secara bertahap sebelum integrasi penuh.                 |
| ST ( <i>Strengths-Threats</i> )        | Memanfaatkan rancangan modular untuk menghadapi variasi biomassa dan kondisi operasional.     | Menyusun kriteria keputusan yang mempertimbangkan karakteristik bahan, pasokan, teknologi konversi, biaya, dan batasan keselamatan.                                               |



|                                  |                                                                              |                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| WT ( <i>Weaknesses-Threats</i> ) | Membatasi risiko kegagalan ketika kesiapan teknologi dan data belum memadai. | Melakukan pemeriksaan kualitas data, menguji keandalan sensor dan komunikasi, melibatkan operator dalam verifikasi rekomendasi, serta menunda perluasan sistem hingga hasil pengujian memenuhi kriteria yang ditetapkan. |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Untuk menerjemahkan analisis strategis menjadi rencana pengembangan yang dapat dievaluasi, BioOptima Intelligence dapat menggunakan prinsip SMART, yaitu Specific, Measurable, Achievable, Relevant, dan Time-bound. Dalam artikel ini, prinsip SMART digunakan sebagai kerangka perencanaan awal, sedangkan nilai target numerik dan jadwal kalender final perlu ditetapkan pada tahap perancangan proyek percontohan berdasarkan kondisi awal, kebutuhan pengguna, ketersediaan data, dan sumber daya implementasi. Kerangka sasaran dan indikator evaluasi yang diusulkan disajikan pada Tabel 8.

**Tabel 8. Kerangka sasaran pengembangan dan evaluasi BioOptima Intelligence berdasarkan prinsip SMART**

| Prinsip           | Rumusan untuk BioOptima Intelligence                                                                                                                                   | Dasar evaluasi atau bukti yang diperlukan                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Specific</i>   | Mengembangkan prototipe sistem pendukung keputusan untuk satu ruang lingkup pemanfaatan biomassa yang ditentukan berdasarkan ketersediaan data dan kebutuhan pengguna. | Jenis biomassa, lokasi atau konteks penerapan, teknologi konversi, variabel input-output, serta fungsi prototipe ditetapkan secara eksplisit.                                                                                                                                             |
| <i>Measurable</i> | Mengevaluasi kualitas data, kinerja model AI/ML, keandalan akuisisi data, waktu pemrosesan, dan kesesuaian rekomendasi dengan kriteria operasional.                    | Kualitas prediksi diukur menggunakan MAE, RMSE, atau $R^2$ untuk tugas regresi; <i>accuracy</i> , <i>precision</i> , <i>recall</i> , atau F1-score untuk klasifikasi; serta waktu respons dan kelengkapan data untuk evaluasi sistem. Kriteria keberhasilan ditetapkan sebelum pengujian. |
| <i>Achievable</i> | Melaksanakan pengembangan secara bertahap sesuai kesiapan data, infrastruktur, keahlian teknis, dan sumber daya yang tersedia.                                         | Ketersediaan dataset, perangkat akuisisi data, kemampuan pengembangan model, dukungan pengelola, dan kebutuhan biaya dinilai sebelum prototipe dibangun.                                                                                                                                  |
| <i>Relevant</i>   | Memastikan fungsi sistem menjawab masalah nyata dalam pemetaan, karakterisasi, pemilihan pemanfaatan, atau pemantauan biomassa.                                        | Kebutuhan pengguna, relevansi variabel, kesesuaian rekomendasi dengan proses yang ditinjau, dan manfaat operasional dievaluasi dalam proyek percontohan.                                                                                                                                  |
| <i>Time-</i>      | Menetapkan tahapan dan tenggat                                                                                                                                         | Jadwal disusun untuk penentuan ruang lingkup                                                                                                                                                                                                                                              |



|              |                                                    |                                                                                                                                                                                            |
|--------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>bound</i> | pengembangan sejak perencanaan proyek percontohan. | dan kebutuhan data, pembangunan prototipe, validasi model, uji coba, evaluasi, serta keputusan mengenai kelanjutan pengembangan. Tanggal dan durasi ditetapkan dalam rencana kerja aktual. |
|--------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Tabel 8 menunjukkan bahwa prinsip SMART dapat digunakan sebagai kerangka perencanaan untuk merumuskan sasaran pengembangan dan evaluasi BioOptima Intelligence. Pada tahap ini, kerangka tersebut baru menetapkan arah dan jenis indikator yang perlu dipenuhi, yaitu ruang lingkup yang spesifik, metrik evaluasi yang terukur, tahapan yang dapat dicapai sesuai kesiapan data dan sumber daya, relevansi terhadap kebutuhan pemanfaatan biomassa, serta urutan tahapan yang terikat waktu. Nilai target numerik, ambang keberhasilan, tanggal, dan durasi belum ditetapkan karena bergantung pada kondisi awal, ketersediaan data, dan sumber daya pada lokasi percontohan; seluruhnya perlu ditentukan pada tahap perancangan proyek percontohan sebelum pengujian dimulai. Dengan demikian, Tabel 8 tidak menyajikan sasaran yang telah final, melainkan kerangka yang dapat diterapkan untuk menyusun sasaran SMART pada penelitian lanjutan. Penerapannya diharapkan dapat mendukung evaluasi kinerja sistem secara bertahap, mulai dari kualitas data dan performa model AI/ML hingga ketepatan rekomendasi dan efektivitas penerapannya.

### 3.11 Kolaborasi Pemangku Kepentingan dalam Implementasi

Implementasi BioOptima Intelligence memerlukan kolaborasi antara akademisi, pemerintah, industri, dan pengelola biomassa. Akademisi berperan dalam pengembangan serta validasi model, pemerintah mendukung kebijakan dan akses data, sedangkan industri menyediakan dukungan teknologi dan operasional. Pengelola biomassa berperan dalam penyediaan informasi lapangan, penerapan rekomendasi, dan pemberian umpan balik. Kolaborasi ini diharapkan mendukung pengembangan dan evaluasi sistem sesuai dengan karakteristik biomassa serta kebutuhan masing-masing wilayah.

### 3.12 Tahapan pengembangan yang diusulkan

Pengembangan BioOptima Intelligence dilakukan secara bertahap agar setiap komponen dapat divalidasi sebelum sistem diperluas. Tahap pertama adalah pemetaan dan karakterisasi biomassa. Tahap kedua adalah pembangunan prototipe akuisisi data dan basis data. Tahap ketiga adalah pengembangan serta evaluasi model ML. Tahap keempat adalah uji coba pada wilayah percontohan dan integrasi rekomendasi AI. Tahap kelima adalah perluasan basis data antardaerah dan pembaruan model. Tahapan pengembangan BioOptima Intelligence pada setiap tahap dirangkum pada Tabel 9.

**Tabel 9. Rencana implementasi bertahap**

| Tahap | Fokus                       | Indikator keluaran                  |
|-------|-----------------------------|-------------------------------------|
| 1     | Pemetaan potensi            | Peta dan basis data sumber biomassa |
| 2     | Prototipe dan akuisisi data | Sensor dan dataset awal             |
| 3     | Pelatihan dan validasi ML   | Model teruji pada dataset           |



|   |                         |                                            |
|---|-------------------------|--------------------------------------------|
| 4 | Uji wilayah percontohan | Kinerja sistem dan rekomendasi tervalidasi |
| 5 | Perluasan antardaerah   | Dataset dan model yang dapat diperbarui    |

Rencana tersebut memerlukan pengujian kuantitatif pada tahap penelitian berikutnya. Indikator yang dapat digunakan antara lain MAE, RMSE,  $R^2$ , akurasi klasifikasi, waktu respons, kestabilan data sensor, dan kesesuaian rekomendasi dengan kondisi operasi. Indikator tersebut belum merupakan hasil artikel ini dan hanya menjadi rancangan evaluasi.

### 3.13 Tantangan dan Kebutuhan Implementasi

Pertama, model ML membutuhkan dataset yang cukup, konsisten, dan representatif. Dataset perlu mencakup variasi jenis biomassa, kondisi lingkungan, parameter proses, dan keluaran energi agar model tidak hanya bekerja pada satu kondisi. Kedua, kualitas sensor dan konektivitas perlu dijaga karena kesalahan pengukuran dapat memengaruhi hasil analisis. Ketiga, keamanan perangkat dan data perlu diperhatikan melalui autentikasi, otorisasi, serta pengelolaan akses sebagaimana menjadi perhatian dalam sistem IoT (Trnka *et al.*, 2022).

Keempat, pemilihan teknologi konversi dan algoritma harus disesuaikan dengan kondisi lokal. Sistem tidak dapat menentukan teknologi terbaik secara universal tanpa data dan kriteria keputusan yang jelas. Kelima, implementasi membutuhkan kolaborasi multipihak. Akademisi dapat mendukung penelitian dan validasi, industri menyediakan infrastruktur dan investasi, pemerintah mendukung regulasi dan akses data, sedangkan masyarakat dan pengelola lokal berperan dalam penyediaan serta pemanfaatan biomassa.

### 3.14 Output Konseptual BioOptima Intelligence

*Output* utama BioOptima Intelligence dalam penelitian ini adalah kerangka konseptual sistem pendukung keputusan yang mengintegrasikan pemetaan spasial biomassa, analisis karakteristik sumber daya, *Artificial Intelligence* (AI), *Machine Learning* (ML), dan *Internet of Things* (IoT). Kerangka ini dirancang untuk menghubungkan informasi mengenai persebaran dan potensi biomassa dengan analisis kesesuaian pemanfaatan serta perencanaan lokasi fasilitas pengolahan biomassa. Dengan demikian, BioOptima Intelligence tidak hanya diarahkan untuk mengidentifikasi lokasi dan jenis biomassa yang tersedia, tetapi juga untuk mendukung penentuan alternatif pemanfaatan dan lokasi pengolahan yang sesuai dengan kondisi wilayah.

Secara konseptual, BioOptima Intelligence dirancang menghasilkan lima *output* utama. Pertama, peta dan basis data spasial biomassa yang memuat informasi mengenai lokasi, jenis, potensi, ketersediaan, dan karakteristik sumber biomassa. Kedua, analisis kesesuaian wilayah yang mempertimbangkan karakteristik biomassa, ketersediaan bahan baku, akses transportasi, infrastruktur pendukung, dan kebutuhan energi setempat. Ketiga, hasil analitik berupa estimasi potensi produksi energi atau klasifikasi alternatif pemanfaatan biomassa apabila tersedia *dataset* yang relevan dan memadai. Keempat, rekomendasi kandidat lokasi fasilitas pengolahan serta alternatif teknologi konversi yang sesuai dengan karakteristik biomassa dan kondisi wilayah. Kelima, informasi pemantauan dan evaluasi yang dapat digunakan untuk membandingkan hasil



prediksi dengan kondisi aktual serta menjadi dasar pembaruan analisis dan rekomendasi pada tahap implementasi.

Kelima *output* tersebut dirancang sebagai bagian dari alur pengambilan keputusan yang saling terhubung. Pemetaan spasial menyediakan informasi awal mengenai persebaran sumber daya, sedangkan analisis karakteristik dan kesesuaian wilayah digunakan untuk mengidentifikasi alternatif pemanfaatan biomassa. Selanjutnya, ML dapat digunakan untuk mempelajari pola dan menghasilkan estimasi berdasarkan data yang tersedia, sementara AI berperan dalam mengintegrasikan hasil analisis dengan kriteria keputusan untuk menghasilkan rekomendasi. Dalam perencanaan lokasi fasilitas, pertimbangan seperti ketersediaan bahan baku, aksesibilitas, kebutuhan energi, dan kesesuaian teknologi konversi perlu diperhitungkan agar rekomendasi yang dihasilkan memiliki dasar yang jelas. Hal ini sejalan dengan kajian mengenai rantai pasok biomassa dan teknologi konversi yang menunjukkan pentingnya mempertimbangkan karakteristik bahan baku, aspek logistik, dan kesesuaian proses dalam pengembangan sistem bioenergi (Helal *et al.*, 2023; Poornima *et al.*, 2024).

Meskipun demikian, kelima *output* tersebut masih merupakan rancangan yang diusulkan dan belum menjadi hasil implementasi BioOptima Intelligence. Penelitian ini belum menghasilkan peta operasional yang tervalidasi, menentukan lokasi fasilitas pengolahan berdasarkan analisis spasial, atau menguji rekomendasi teknologi melalui eksperimen. Realisasi *output* tersebut memerlukan penyusunan *dataset* biomassa yang representatif, penetapan kriteria kesesuaian wilayah, pemilihan metode analisis spasial dan algoritma yang relevan, serta validasi melalui pengembangan prototipe dan pengujian pada kondisi operasional. Oleh karena itu, kontribusi bagian ini adalah merumuskan *output* konseptual yang menjadi dasar pengembangan BioOptima Intelligence sebagai sistem pendukung keputusan untuk pemetaan dan optimasi pemanfaatan biomassa. Output konseptual BioOptima Intelligence disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. *Output* Konseptual BioOptima Intelligence

| No | <i>Output</i>                        | Deskripsi                                                                                                                      | Fungsi                                                                               |
|----|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Peta dan basis data spasial biomassa | Informasi lokasi, jenis, potensi, ketersediaan, dan karakteristik biomassa.                                                    | Menyediakan informasi dasar mengenai persebaran sumber daya biomassa.                |
| 2  | Analisis kesesuaian wilayah          | Analisis berdasarkan karakteristik biomassa, ketersediaan bahan baku, akses transportasi, infrastruktur, dan kebutuhan energi. | Mengidentifikasi alternatif pemanfaatan biomassa yang sesuai dengan kondisi wilayah. |
| 3  | Hasil analitik dan estimasi energi   | Prediksi potensi produksi energi atau klasifikasi alternatif pemanfaatan berdasarkan <i>dataset</i> yang                       | Mendukung perbandingan alternatif pemanfaatan biomassa secara berbasis data.         |



|   |                                             |                                                                                                              |                                                                                            |
|---|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                                             | tersedia.                                                                                                    |                                                                                            |
| 4 | Rekomendasi lokasi dan teknologi pengolahan | Kandidat lokasi fasilitas pengolahan dan alternatif teknologi konversi berdasarkan kriteria yang ditetapkan. | Mendukung perencanaan spasial dan pemilihan alternatif pengolahan biomassa.                |
| 5 | Informasi pemantauan dan evaluasi           | Informasi mengenai kondisi operasional dan produksi energi aktual apabila sistem telah diterapkan.           | Menjadi dasar evaluasi rekomendasi dan pembaruan model pada tahap pengembangan berikutnya. |

Tabel 10 menunjukkan bahwa *output* konseptual BioOptima Intelligence mencakup tahapan dari penyediaan informasi spasial hingga rekomendasi dan evaluasi. Peta biomassa menjadi dasar analisis, sedangkan hasil analitik dan evaluasi kesesuaian digunakan untuk mendukung pemilihan alternatif pemanfaatan serta kandidat lokasi fasilitas pengolahan. Informasi pemantauan dan evaluasi melengkapi alur tersebut pada tahap implementasi sehingga sistem berpotensi dikembangkan menjadi mekanisme pengambilan keputusan yang adaptif.

### 3.15 Keterbatasan Kajian

Artikel ini memiliki keterbatasan karena BioOptima Intelligence masih merupakan rancangan konseptual. Tidak terdapat data primer, prototipe fisik, pengujian sensor, pelatihan model pada dataset lapangan, maupun pengujian kinerja sistem. Oleh karena itu, pernyataan mengenai peningkatan efisiensi, penghematan energi, atau akurasi model tidak dapat dinyatakan sebagai hasil empiris. Literatur yang digunakan memberikan landasan bahwa komponen sistem memiliki peluang untuk diterapkan, tetapi efektivitas integrasinya masih perlu dibuktikan.

Keterbatasan tersebut menjadi arah penelitian berikutnya. Pengembangan dapat dimulai dari pembangunan dataset biomassa lokal, penentuan variabel input-output, pemilihan algoritma, validasi silang, pengembangan prototipe IoT, uji lapangan, dan evaluasi techno-economic serta environmental performance. Tahapan tersebut diperlukan agar BioOptima Intelligence berkembang dari kerangka konseptual menjadi sistem rekayasa yang dapat diuji dan direplikasi.

## 4. KESIMPULAN

BioOptima Intelligence dirumuskan sebagai kerangka konseptual sistem pendukung keputusan yang mengintegrasikan pemetaan spasial biomassa, *Internet of Things* (IoT), *Machine Learning* (ML), dan *Artificial Intelligence* (AI) untuk mendukung perencanaan dan optimasi pemanfaatan biomassa. Kerangka ini dikembangkan berdasarkan permasalahan keragaman karakteristik biomassa, persebaran geografis, kebutuhan rantai pasok, serta perbedaan kesesuaian teknologi konversi. Dalam rancangan ini, pemetaan spasial menyediakan informasi mengenai lokasi, potensi, ketersediaan, dan karakteristik biomassa. Analitik ML dirancang untuk mendukung prediksi dan klasifikasi berdasarkan data yang tersedia, sedangkan AI berperan dalam mengintegrasikan hasil analisis dengan kriteria keputusan untuk menghasilkan rekomendasi



pemanfaatan. IoT ditempatkan sebagai komponen akuisisi data aktual apabila sensor dan infrastruktur pendukung tersedia.

Kontribusi utama penelitian ini adalah perumusan kerangka konseptual yang menghubungkan pemetaan dan karakterisasi biomassa dengan analisis kesesuaian wilayah, estimasi potensi energi, rekomendasi alternatif teknologi konversi, serta penentuan kandidat lokasi fasilitas pengolahan biomassa. Kerangka ini juga mengusulkan mekanisme pemantauan, evaluasi, dan umpan balik untuk mendukung pengembangan sistem secara bertahap. Meskipun demikian, BioOptima Intelligence masih berupa rancangan konseptual yang belum divalidasi melalui implementasi dan pengujian eksperimental. Penelitian ini belum menghasilkan peta operasional yang tervalidasi, menetapkan lokasi fasilitas pengolahan berdasarkan analisis spasial, atau membuktikan kinerja prediksi dan rekomendasi sistem. Penelitian selanjutnya perlu mencakup penyusunan dataset biomassa yang representatif, penetapan kriteria kesesuaian wilayah, pengembangan prototipe, validasi model, dan pengujian pada kondisi operasional. Evaluasi aspek teknis, ekonomi, lingkungan, dan keamanan juga diperlukan untuk menilai kelayakan penerapan BioOptima Intelligence dalam mendukung pemanfaatan biomassa yang adaptif dan berkelanjutan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdollahfard, Y., Sedighi, M., & Ghasemi, M. (2023). A New Approach for Improving Microbial Fuel Cell Performance Using Artificial Intelligence. *Sustainability*, 15(2), 1312. <https://doi.org/10.3390/su15021312>
- De Oliveira Cavalcanti, G., & Pimenta, H. C. D. (2023). Electric Energy Management in Buildings Based on the Internet of Things: A Systematic Review. *Energies*, 16(15), 5753. <https://doi.org/10.3390/en16155753>
- Ejiyi, C. J., Cai, D., Thomas, D., Obiora, S., Osei-Mensah, E., Acen, C., Eze, F. O., Sam, F., Zhang, Q., & Bamisile, O. O. (2025). Comprehensive review of artificial intelligence applications in renewable energy systems: Current implementations and emerging trends. *Journal of Big Data*, 12, Article 169. <https://doi.org/10.1186/s40537-025-01178-7>
- Helal, M. A., Anderson, N., Wei, Y., & Thompson, M. (2023). A Review of Biomass-to-Bioenergy Supply Chain Research Using Bibliometric Analysis and Visualization. *Energies*, 16(3), 1187. <https://doi.org/10.3390/en16031187>
- Hess-Dunlop, A., Kakani, H., & Josephson, C. (2024). Towards deep learning for predicting microbial fuel cell energy output. *arXiv*, 1-12. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.16939>
- International Energy Agency. (2024). *Renewables 2023: Analysis and forecasts to 2028*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
- International Renewable Energy Agency. (2022). *Scaling up biomass for the energy transition: Untapped opportunities in Southeast Asia*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/Publications/2022/Feb/Scaling-up-biomass-for-the-energy-transition-Untapped-opportunities-in-Southeast-Asia>



- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2023). *Potensi biomassa menjanjikan, Indonesia prediksi hasilkan listrik setara 56,97 GW*. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/potensi-biomassa-menjanjikan-indonesia-prediksi-hasilkan-listrik-setara-5697-gw>
- Khan, M., Naqvi, S. R., Ullah, Z., Taqvi, S. A. A., Khan, M. N. A., Farooq, W., Mehran, M. T., Juchelková, D., & Štěpanec, L. (2023). Applications of machine learning in thermochemical conversion of biomass-A review. *Fuel*, 332, Article 126055. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126055>
- Khanaum, M. M., Rahman, S., & Borhan, M. S. (2026). Optimizing the Performance of Microbial Fuel Cells: Linking Laboratory Analysis and Multivariate Machine Learning Approach to Enhance Bioelectricity Generation from Wastewater. *Fuels*, 7(1), 6. <https://doi.org/10.3390/fuels7010006>
- Mondal, P. P., Galodha, A., Verma, V. K., Singh, V., Show, P. L., Awasthi, M. K., Lall, B., Anees, S., Pollmann, K., & Jain, R. (2023). Review on machine learning-based bioprocess optimization, monitoring, and control systems. *Bioresource Technology*, 370, 128523. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128523>
- Morkūnas, M., Wang, Y., & Wei, J. (2024). Role of AI and IoT in Advancing Renewable Energy Use in Agriculture. *Energies*, 17(23), 5984. <https://doi.org/10.3390/en17235984>
- Mundu, M. M., Islam, M. R., Habib, M. A., Hasan, M. K., & Islam, S. (2026). Harnessing AI in renewable energy systems: Driving environmental and socio-economic transformation. *Energy Informatics*, 9, Article 24. <https://doi.org/10.1186/s42162-026-00624-x>
- Poornima, S., Manikandan, S., Prakash, R., Deena, S. R., Subbaiya, R., Karmegam, N., Kim, W., & Govarthanan, M. (2024). Biofuel and biochemical production through biomass transformation using advanced thermochemical and biochemical processes: A review. *Fuel*, 372, 132204. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132204>
- Rajagopalan, A., Swaminathan, D., Bajaj, M., Damaj, I., Rathore, R. S., Singh, A. R., Blažek, V., & Prokop, L. (2024). Empowering power distribution: Unleashing the synergy of IoT and cloud computing for sustainable and efficient energy systems. *Results in Engineering*, 21, 101949. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101949>
- Savvidou, M. G., Pandis, P. K., Mamma, D., Sourkouni, G., & Argirusis, C. (2022). Organic Waste Substrates for Bioenergy Production via Microbial Fuel Cells: A Key Point Review. *Energies*, 15(15), 5616. <https://doi.org/10.3390/en15155616>
- Suhartini, S., Pangestuti, M. B., Elviliana., Rohma, N. A., Junaidi, M. A., Paul, R., Nurika, I., Rahmah, N. L., & Melville, L. (2024). Valorisation of macroalgae for biofuels in Indonesia: an integrated biorefinery approach. *Environmental Technology Reviews*, 13(1), 269-304. <https://doi.org/10.1080/21622515.2024.2336894>
- Suwarjono, S., & Afriza, A. (2025). Utilization of Smart Technologies Based on Internet of Things and Machine Learning in Energy Management: A Systematic Literature Review. *Journal of Artificial Intelligence and Engineering Applications (JAIEA)*, 5(1), 1494-1498. <https://doi.org/10.59934/jaiea.v5i1.1657>
- Trnka, M., Abdelfattah, A. S., Shrestha, A., Coffey, M., & Cerny, T. (2022). Systematic Review of Authentication and Authorization Advancements for the Internet of Things. *Sensors*, 22(4), 1361. <https://doi.org/10.3390/s22041361>



- Ukoba, K., Olatunji, K. O., Adeoye, E., Jen, T.-C., & Madyira, D. M. (2024). Optimizing renewable energy systems through artificial intelligence: Review and future prospects. *Energy & Environment*, 35(7), 3833–3879. <https://doi.org/10.1177/0958305X241256293>
- United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2024). *The Sustainable Development Goals report 2024*. United Nations. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024>
- Wang, Z., Peng, X., Xia, A., Shah, A. A., Huang, Y., Zhu, X., Zhu, X., & Liao, Q. (2022). The role of machine learning to boost the bioenergy and biofuels conversion. *Bioresource Technology*, 343, 126099. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126099>
- Yana, S., Nizar, M. H. A., Irhamni., & Mulyati, D. (2022). Biomass waste as a renewable energy in developing bio-based economies in Indonesia: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112268. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112268>