

## BAB 2

# Tinjauan Pustaka

### 2.1. Prinsip Energi Terbarukan

Energi terbarukan merujuk pada sumber energi yang dapat diperbarui secara alami dan berkelanjutan. Dua sumber energi terbarukan yang relevan dalam penelitian ini adalah energi surya dan biomassa.

Energi Surya: Energi surya dihasilkan dari radiasi matahari yang dikonversi menjadi listrik menggunakan panel fotovoltaik (PV). Teori ini didasarkan pada prinsip efek fotovoltaik, di mana sinar matahari yang mengenai material semikonduktor menghasilkan arus listrik[3]. Energi surya memiliki keunggulan karena melimpah, ramah lingkungan, dan tidak menghasilkan emisi selama operasi.

Energi Biomassa: Biomassa adalah bahan organik yang berasal dari tumbuhan atau hewan yang dapat digunakan sebagai sumber energi. Teori konversi biomassa melibatkan proses termokimia (seperti pembakaran, gasifikasi, dan pirolisis) atau biokimia (seperti anaerobik digestion) untuk menghasilkan energi [4]. Biomassa memiliki keunggulan karena dapat menyediakan energi yang stabil dan dapat dikontrol, serta memanfaatkan limbah organik.

### 2.2. Konsep Sistem Hibrid

Sistem hybrid adalah integrasi dua atau lebih sumber energi untuk meningkatkan keandalan, efisiensi, dan keberlanjutan sistem pembangkit listrik. Teori sistem hybrid didasarkan pada prinsip komplementeritas, di mana kelemahan satu sumber energi dapat ditutupi oleh kelebihan sumber energi lainnya [5]. Kombinasi PLTS dan PLTBm: PLTS menghasilkan energi yang bergantung pada kondisi cuaca, sedangkan PLTBm dapat beroperasi secara kontinu. Dengan menggabungkan keduanya, sistem hybrid dapat menyediakan pasokan listrik yang lebih stabil dan mengurangi kebutuhan akan baterai penyimpanan energi [6].

### **2.3. Model Teoritis Manajemen Proyek**

Manajemen proyek merupakan disiplin ilmu yang mengatur perencanaan, pelaksanaan, pengawasan, dan pengendalian proyek untuk mencapai tujuan yang telah ditetapkan [7]. Teori manajemen proyek dalam konteks pengembangan sistem hybrid meliputi perencanaan: Menentukan tujuan, lingkup, dan sumber daya yang dibutuhkan untuk proyek Implementasi: Melaksanakan rencana proyek dengan memastikan semua komponen sistem hybrid terpasang dan berfungsi dengan baik. Monitoring dan Evaluasi: Memantau kinerja sistem dan melakukan evaluasi untuk memastikan proyek berjalan sesuai rencana.

### **2.4. Konsep Dasar Analisa Kelayakan**

Analisis kelayakan adalah proses evaluasi untuk menentukan apakah suatu proyek layak dilaksanakan berdasarkan aspek teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan [8]. Teori analisis kelayakan meliputi aspek Teknis: Menilai ketersediaan sumber daya (surya dan biomassa), teknologi yang digunakan, dan kapasitas sistem aspek Ekonomi: Menghitung biaya investasi, operasional, dan pemeliharaan, serta mengestimasi keuntungan yang diperoleh. Aspek Lingkungan mengevaluasi dampak lingkungan dari proyek, seperti pengurangan emisi karbon dan pemanfaatan limbah organik. Aspek Sosial dan Budaya mempertimbangkan partisipasi masyarakat, dampak sosial, dan keberlanjutan proyek.

### **2.5. Model teoritis keberlanjutan**

Keberlanjutan merupakan prinsip yang menekankan keseimbangan antara aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan [9]. Dalam konteks pengembangan sistem hybrid, teori keberlanjutan menekankan pentingnya Ekonomi Berkelanjutan: Memastikan proyek memberikan manfaat ekonomi jangka panjang bagi masyarakat dan investor. Sosial Berkelanjutan: Melibatkan masyarakat dalam pengelolaan proyek dan memastikan distribusi manfaat yang adil. Lingkungan Berkelanjutan: Meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan memanfaatkan sumber daya secara efisien.

### **2.6. Analisa Dampak Lingkungan Sistem Hibrida.**

Pengembangan sistem hybrid PLTS dan PLTBm memiliki dampak positif terhadap lingkungan, seperti pengurangan emisi gas rumah kaca dan pemanfaatan limbah

organik. Namun, perlu juga diperhatikan dampak negatif potensial, seperti perubahan penggunaan lahan dan dampak terhadap keanekaragaman hayati. Teori dampak lingkungan membantu dalam mengidentifikasi dan memitigasi dampak tersebut [10].

### **2.7. Pengembangan Sistem Hibrid**

Pengembangan sistem hybrid pembangkit listrik tenaga surya dan biomassa merupakan solusi inovatif untuk memenuhi kebutuhan energi di daerah terpencil, seperti Pulau Kundur, Provinsi Kepulauan Riau. Sistem hybrid ini menggabungkan dua sumber energi terbarukan, yaitu energi surya dan biomassa, untuk menciptakan sistem pembangkit listrik yang lebih stabil, efisien, dan ramah lingkungan[11]. Tinjauan pustaka ini akan membahas konsep dasar, teknologi, dan studi terkait yang mendukung analisis kelayakan manajemen pengembangan sistem hybrid tersebut.

### **2.8. Energi Terbarukan dan Kebutuhan Energi di daerah Terpencil**

Energi terbarukan menjadi fokus utama dalam upaya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan menurunkan emisi gas rumah kaca. Menurut International Renewable Energy Agency energi terbarukan, seperti tenaga surya dan biomassa, memiliki potensi besar untuk menyediakan akses energi yang berkelanjutan di daerah terpencil. Pulau Kundur, sebagai wilayah kepulauan, memiliki tantangan dalam penyediaan listrik karena keterbatasan infrastruktur dan akses ke jaringan listrik nasional. Sistem hybrid dapat menjadi solusi untuk mengatasi masalah ini [12].

### **2.9. Alasan untuk melakukan Transisi Energi**

Transisi energi didorong oleh kebutuhan untuk mengurangi perubahan iklim, meningkatkan keamanan energi, memperoleh manfaat ekonomi, memanfaatkan inovasi teknologi, dan mematuhi kebijakan serta peraturan yang mendukung. Meskipun ada tantangan, transisi ini penting untuk masa depan energi yang berkelanjutan dan tangguh. Untuk Memahami alasan-alasan untuk melakukan transisi energi, sangat penting untuk mempertimbangkan berbagai faktor yang mendorong pergeseran global dari bahan bakar fosil ke sumber energi terbarukan. Berikut ini adalah alasan utama yang didukung oleh abstrak yang disediakan:

### **2.9.1. Mitigasi Perubahan Iklim**

Mengurangi Emisi gas Rumah Kaca: Salah satu alasan paling penting untuk transisi energi adalah untuk memitigasi Perubahan Iklim dengan mengurangi emisi gas rumah kaca. Transisi ke sumber energi terbarukan diperlukan untuk memenuhi tujuan iklim yang ditetapkan dalam perjanjian Paris [13].

Keberlanjutan Lingkungan: Transisi ke Energi terbarukan membantu mencapai kelestarian lingkungan dengan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, yang merupakan kontributor utama degradasi lingkungan.

### **2.9.2. Keamanan dan Kemandirian Energi**

Ketergantungan Geopolitik untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil meningkatkan ketahanan energi dan meminimalkan risiko geopolitik yang terkait dengan pasokan bahan bakar fosil [14].

Kemandirian Energi Sumber energi terbarukan, seperti tenaga surya, biomassa, air dan angin dapat diproduksi secara lokal, sehingga mengurangi kebutuhan akan energi impor dan meningkatkan kemandirian energi nasional.

### **2.9.3. Manfaat Ekonomi**

Efisiensi Biaya Kemajuan teknologi telah membuat sumber energi terbarukan menjadi lebih kompetitif dari segi biaya dengan bahan bakar fosil. Investasi dalam energi terbarukan dapat menghasilkan penghematan biaya jangka panjang dan manfaat Ekonomi. Penciptaan Lapangan Pekerjaan: Transisi Energi dapat menciptakan peluang kerja baru di sektor energi terbarukan yang berkontribusi pada pertumbuhan dan pembangunan ekonomi.

### **2.9.4. Inovasi Teknologi**

Kemajuan dalam Teknologi: Inovasi dalam teknologi Energi, seperti peningkatan efisiensi dan solusi Penyimpanan, merupakan pendorong penting dalam transisi energi. Kemajuan-kemajuan ini membuat energi terbarukan menjadi lebih layak dan efisien.[15]. Kecerdasan Buatan (AI): AI memainkan peran penting dalam mengoptimalkan sistem energi terbarukan dan meningkatkan pengembangannya, yang selanjutnya mendukung transisi [16].

### **2.9.5. Dukungan Kebijakan dan Peraturan**

Kebijakan dan Insentif Pemerintah Kebijakan dan Insentif yang mendukung di tingkat nasional dan Internasional sangat penting untuk mendorong transisi energi. Hal ini termasuk insentif pajak, feed-in tarif, dan peraturan yang jelas yang mendorong penyebaran infrastruktur energi terbarukan [17]. Kepatuhan terhadap perjanjian lingkungan, mematuhi perjanjian dan standar lingkungan internasional mendorong transisi menuju sumber energi yang lebih bersih [18]

### **2.9.6. Tantangan ekonomi dan politik**

Situasi ekonomi dan politik juga mempengaruhi pengembangan energi terbarukan di Indonesia. Fluktuasi harga bahan bakar fosil, perubahan kebijakan pemerintah, dan stabilitas politik dapat berdampak signifikan pada investasi dan pengembangan proyek energi terbarukan. Kepastian regulasi dan dukungan politik yang kuat sangat penting untuk menarik investasi dan mendorong perkembangan sektor energi terbarukan.

### **2.10. Tantangan Energi Terbarukan Indonesia**

Indonesia menghadapi berbagai tantangan dalam pengembangan energi terbarukan (EBT) yang meliputi aspek ekonomi, lingkungan, sosial, geografis, kesiapan sumber daya manusia, serta penelitian dan pengembangan teknologi. Berikut adalah rincian tantangan Tantangan Ekonomi, Lingkungan dan Sosial

Perekonomian Pengembangan EBT di Indonesia sering terhambat oleh keterbatasan sumber daya keuangan dan kekurangan investasi yang mampu. Proyek EBT memerlukan investasi besar, terutama dalam infrastruktur dan teknologi. Ketidakpastian kebijakan investasi dan birokrasi yang kompleks sering kali membuat investor enggan berpartisipasi

Lingkungan Transisi energi perlu memperhatikan dampak lingkungan dan sosial. Ada kebutuhan untuk memastikan bahwa perubahan dalam sistem energi tidak hanya menguntungkan secara ekologis tetapi juga berkelanjutan secara ekologis

Sosial: Terdapat tantangan dalam menciptakan kesadaran masyarakat mengenai pentingnya EBT. Pendidikan dan pelatihan yang memadai diperlukan agar masyarakat dapat berpartisipasi aktif dalam transisi energi.

### **Tantangan Geografis Energi Terbarukan Indonesia**

Indonesia adalah negara kepulauan dengan kondisi geografis yang beragam, yang menyulitkan pengembangan infrastruktur EBT. Beberapa daerah terpencil memiliki akses terbatas terhadap teknologi dan investasi yang diperlukan untuk membangun sistem energi terbarukan yang efisien. Hal ini mengakibatkan ketidakmerataan dalam penyebaran sumber energi terbarukan di seluruh wilayah.

### **Tantangan Kesiapan Sumber daya Manusia untuk EBT**

Persiapan sumber daya manusia (SDM) menjadi salah satu tantangan utama dalam transisi menuju EBT. Meskipun ada program sertifikasi dan pelatihan, kualitas tenaga kerja masih rendah, dengan banyak pekerja hanya memiliki pengetahuan dasar tentang teknologi baru seperti hidrogen.

Terdapat kesamaan keterampilan yang signifikan antara kebutuhan industri dan kemampuan tenaga kerja yang tersedia, sehingga perlu adanya peningkatan kapasitas melalui kolaborasi dengan lembaga pendidikan.

### **Tantangan Riset dan Pengembangan serta Sistem Teknologi**

Riset dan pengembangan (R&D) dalam teknologi EBT di Indonesia masih terbatas. Banyak proyek EBT tidak memiliki dukungan R&D yang cukup untuk menjamin keberlangsungan dan efisiensi operasional mereka. Selain itu, kurangnya infrastruktur teknis juga menjadi hambatan dalam pengembangan teknologi baru.

Diperlukan kolaborasi antara pemerintah, sektor swasta, dan lembaga penelitian untuk menciptakan inovasi yang mendukung transisi energi.

Secara keseluruhan, meskipun Indonesia memiliki potensi besar untuk mengembangkan energi terbarukan, tantangan-tantangan ini harus diatasi melalui kebijakan yang jelas, investasi yang memadai, serta peningkatan kapasitas SDM untuk mencapai transisi energi yang berkelanjutan dan inklusif.

### **2.11. Impelementasi Input-Proses-Output dalam Manajemen Energi terbarukan.**

Kerangka kerja IPO adalah alat yang berharga dalam manajemen energi terbarukan, yang menyediakan pendekatan terstruktur untuk menganalisis dan mengoptimalkan seluruh siklus hidup sistem energi terbarukan, dari bahan masukan dan energi hingga keluaran akhir dan dampaknya terhadap lingkungan, sosial dan manajemen.

Implementasi model Input-Proses-Output (IPO) dalam manajemen energi terbarukan menggambarkan suatu sistem yang terdiri dari input (sumber daya alam seperti sinar matahari dan angin, investasi modal, teknologi, serta kebijakan pendukung), proses (konversi energi, optimisasi sistem, manajemen jaringan, dan pemantauan real-time), serta output (energi listrik bersih, pengurangan emisi karbon, dan manfaat sosial-ekonomi), dimana penerapannya pada sistem hybrid PLTS-PLTBm misalnya melibatkan pemanfaatan energi matahari dan biomassa sebagai input, proses integrasi teknologi dan manajemen emisi, serta menghasilkan output berupa pasokan energi terbarukan dan pengurangan dampak lingkungan, khususnya dalam konteks energi terbarukan.

#### **2.11.1. Input-Proses-Output dalam Manajemen Energi terbarukan**

Manajemen energi terbarukan melibatkan tiga komponen utama, yaitu input, proses, dan output. Input mencakup sumber energi terbarukan (seperti surya, angin, biomassa, dan panas bumi), data akuisisi (dari sensor dan prakiraan cuaca), serta variabel kontrol (seperti insolasi, kecepatan angin, dan harga listrik). Selanjutnya, proses meliputi pengolahan data, optimasi sistem, dan pengaturan distribusi energi untuk memastikan efisiensi dan kestabilan pasokan. Adapun output-nya adalah energi bersih yang siap digunakan, pengurangan emisi karbon, serta laporan kinerja sistem untuk evaluasi lebih lanjut. Dengan pendekatan ini, manajemen energi terbarukan dapat berjalan secara efektif dan berkelanjutan.

#### **2.11.2. Konsep dan Implementasi IPO dalam Manajemen Energi terbarukan**

Input Proses Output (IPO) adalah kerangka kerja yang digunakan untuk memodelkan dan menganalisis sistem dengan membaginya menjadi tiga komponen

Input: Sumber daya, material, dan energi yang dimasukkan ke dalam sistem. Proses: Aktivitas transformasi atau konversi yang terjadi dalam sistem. Output: Produk akhir, energi, emisi, atau limbah yang dihasilkan oleh sistem.

**Input** merupakan Sumber Daya dan Material Termasuk material mentah seperti angin, radiasi matahari, biomassa, dan panas bumi. Misalnya, dalam pembangkitan tenaga angin, input meliputi material untuk pembuatan turbin, menara, nacelle, rotor, kabel, dan transformator [19][20]. Aspek kedua menjelaskan Energi yang dibutuhkan untuk memproduksi dan memasang sistem energi terbarukan, seperti listrik yang digunakan dalam produksi turbin angin [19][20] .

**Proses** Aktivitas Transformasi Ini menjelaskan konversi bahan mentah dan energi menjadi bentuk energi terbarukan yang dapat digunakan. Misalnya, proses pembuatan turbin angin dan pembangunan ladang angin [19][20]. aspek kedua menjelaskan Integrasi berbagai teknologi energi terbarukan, seperti menggabungkan sistem termal surya dengan pompa panas sumber tanah dan boiler kayu untuk memenuhi permintaan pemanas [21].

**Output** menjelaskan tentang Produksi Energi yang dihasilkan Pembangkitan energi terbarukan, seperti listrik dari turbin angin atau panas dari sistem termal surya [19][20][21]. Aspek kedua menjelaskan dampak Lingkungan berupa Pengurangan emisi CO<sub>2</sub> dan manfaat lingkungan lainnya yang dihasilkan dari penggunaan sistem energi terbarukan [19][20][21].

### **2.11.3. Implementasi dan Manfaat Penerapan IPO di manajemen energi terbarukan**

Pembangkit Listrik Tenaga Angin Model IPO digunakan untuk menganalisis seluruh siklus hidup sistem tenaga angin, dari produksi komponen hingga pembangkitan listrik. Ini termasuk menilai penghematan energi dan pengurangan emisi CO<sub>2</sub> yang dicapai dengan mengganti tenaga konvensional dengan tenaga angin [19][20].

Teknologi Panas Terbarukan Model IPO dapat mengevaluasi dampak lingkungan dan sosial ekonomi dari sistem panas terbarukan seperti tenaga surya termal dan

pompa panas sumber tanah. Ini melibatkan pembuatan sektor baru dalam tabel inputoutput untuk mencerminkan kontribusi spesifik dari teknologi ini [21].

Manfaat IPO dalam Manajemen Energi Terbarukan mencakup tiga aspek Pertama, Analisa Komprehensif. Kedua optimalisasi dan Ketiga, Kebijakan dan perencanaan Aspek Pertama menjelaskan tentang Kerangka kerja IPO memungkinkan analisis terperinci tentang dampak energi, lingkungan, dan ekonomi dari sistem energi terbarukan [19][20][21].Aspek kedua menjelaskan dengan memahami masukan, proses, dan keluaran, para pemangku kepentingan dapat mengoptimalkan efisiensi dan efektivitas sistem energi terbarukan [19][20][21].Aspek ketiga Kebijakan dan Perencanaan: Model IPO membantu dalam perencanaan dan pembuatan kebijakan dengan memberikan wawasan tentang dampak potensial dari berbagai teknologi energi terbarukan [21][22].

Singkatnya, kerangka kerja IPO adalah alat yang berharga dalam manajemen energi terbarukan, yang menyediakan pendekatan terstruktur untuk menganalisis dan mengoptimalkan seluruh siklus hidup sistem energi terbarukan, dari bahan masukan dan energi hingga keluaran akhir dan dampaknya terhadap lingkungan dan ekonomi. Sesuai penjelasan diatas sistem manajemen energi terbarukan terdiri dari tiga komponen utama sesuai pada Table ringkasan 2.1 input, proses, dan output. *Input* meliputi sumber energi terbarukan (seperti matahari, angin, dan biomassa), data sensor dan prakiraan cuaca, serta variabel kontrol seperti insulasi dan kecepatan angin. Selanjutnya, *proses* mencakup konversi energi, algoritma optimasi (*machine learning, metaheuristic*), dan sistem manajemen energi (*central controllers, multiagent systems*). Adapun *output*-nya meliputi pasokan energi yang andal, manfaat ekonomi (pengurangan biaya dan peningkatan efisiensi), manfaat lingkungan (penurunan emisi), serta dampak sosial-ekonomi seperti pergeseran lapangan kerja. Dengan integrasi ketiga komponen ini, sistem energi terbarukan dapat beroperasi secara optimal dan berkelanjutan.

Komponent	Deskripsi
Input	Sumber energi terbarukan (matahari, angin, biomassa), data dari sensor dan prakiraan, variabel kontrol (insolasi, kecepatan angin, dll.[23] [24][25][16]
Process	Energy conversion, optimization algorithms (machine learning, metaheuristic), energy management systems (central controllers, multiagent systems) [[23] [24][25][16] [26][27] [28]
Output	Pasokan energi yang andal, manfaat ekonomi (pengurangan biaya, peningkatan efisiensi), manfaat lingkungan (pengurangan emisi), dampak sosial ekonomi (pergeseran lapangan kerja) [16][28][29] [21]

Tabel 2.1. Ringkasan penjelasan Input Proses Out put dalam manajemen energi terbarukan

Sebagai kesimpulan, model IPO dalam manajemen energi terbarukan melibatkan pengintegrasian berbagai input energi terbarukan, mengoptimalkan proses konversi dan manajemen dengan menggunakan algoritme dan sistem kontrol yang canggih, serta menghasilkan output energi yang dapat diandalkan bersama dengan manfaat ekonomi dan lingkungan. Pendekatan terstruktur ini memastikan pengelolaan energi yang efisien dan berkelanjutan.

## 2.12. Faktor Input Utama dalam Manajemen Energi Terbarukan

Manajemen energi terbarukan melibatkan interaksi yang kompleks dari berbagai faktor yang memastikan pemanfaatan sumber energi terbarukan yang efisien, andal, dan berkelanjutan. Faktor-faktor masukan utama dapat dikategorikan secara luas menjadi aspek teknis, ekonomi, lingkungan, sosial, dan aspek yang berhubungan dengan kebijakan. Berikut adalah faktor-faktor utama yang dipertimbangkan:

**1. Faktor Teknis mencakup tiga aspek: Pertama, Peramalan dan efisiensi. Kedua, Sistem energi terbarukan Hibrida (HRES) .Ketiga, Inovasi dan teknologi.**

Aspek pertama menjelaskan Peramalan yang akurat dan peningkatan efisiensi energi sangat penting untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi terbarukan [30]. Aspek Kedua menjelaskan Manajemen HRES yang efektif melibatkan pengoptimalan sisi sumber beban, dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti porsi energi terbarukan, faktor energi berlebih, dan beban yang tidak terpenuhi [31]. Aspek Ketiga menjelaskan kemajuan teknologi, seperti sistem penyimpanan energi yang lebih baik dan strategi manajemen energi yang efisien, memainkan peran penting [18] [32] [33].

**2. Faktor Ekonomi mencakup dua aspek: Pertama, biaya energi. Kedua, daya tarik Investasi.**

Aspek pertama menjelaskan kelayakan ekonomi proyek energi terbarukan dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti biaya tahunan sistem, total biaya bersih saat ini, dan biaya energi [31]. Aspek Kedua menjelaskan daya tarik investasi sektor ini, yang dipengaruhi oleh stabilitas ekonomi dan insentif, sangat penting untuk pengembangan dan penyebaran teknologi energi terbarukan [32] [34]

**3. Faktor Lingkungan mencakup dua aspek: Pertama, Emisi Karbon. Kedua, pengoptimalan sumber Daya.**

Aspek pertama menjelaskan emisi karbon untuk Mengurangi emisi karbon dan polutan lainnya merupakan tujuan utama, sehingga penilaian dampak lingkungan sangat penting [31] [35]. Aspek Kedua pengoptimalan Sumber Daya untuk Penggunaan sumber daya alam yang efisien, seperti tenaga surya dan angin, serta meminimalkan degradasi lingkungan merupakan pertimbangan utama [32] [36].

**4. Faktor Sosial mencakup dua aspek: Pertama, Persepsi Publik. Kedua, Sumber daya manusia.**

Aspek pertama menjelaskan penerimaan dan dukungan proyek energi terbarukan oleh publik dan masyarakat lokal sangat penting untuk keberhasilan implementasi [18] [34]. Aspek kedua menjelaskan ketersediaan tenaga terampil untuk mengelola dan mengoperasikan sistem energi terbarukan juga penting [37].

**5. Faktor kebijakan dan regulasi mencakup dua aspek: Pertama, Kebijakan Pemerintah. Kedua, Hambatan hukum dan Administratif.**

Aspek Pertama menjelaskan kebijakan yang mendukung, termasuk subsidi, kerangka regulasi, dan insentif, sangat penting untuk mendorong adopsi energi terbarukan [34] [38][6]. Aspek kedua menjelaskan Mengatasi tantangan hukum dan administratif dapat memfasilitasi implementasi proyek energi terbarukan yang lebih lancar.

**6. Faktor Operasional mencakup dua aspek: Pertama, Sistem Manajemen Energi. Kedua, Manajemen sisi permintaan.**

Aspek pertama menjelaskan mencakup sistem manajemen energi canggih yang mengintegrasikan berbagai sumber energi terbarukan dan sistem penyimpanan sangat penting untuk operasi dan penjadwalan yang optimal [39][35].Aspek kedua menjelaskan teknik seperti pengalihan beban puncak dan pemerataan beban membantu dalam mengelola permintaan energi secara efisien [31] [40].

**7. Faktor Eksternal mencakup dua aspek: Pertama, Tekanan Geopolitik dan Ekonomi. Kedua, Kondisi Iklim dan Lingkungan.**

Aspek Pertama menjelaskan Faktor eksternal seperti stabilitas politik, tekanan ekonomi, dan kesenjangan regional dapat berdampak signifikan terhadap

pengelolaan energi terbarukan [18]. Aspek kedua menjelaskan iklim lokal dan kondisi lingkungan, seperti intensitas sinar matahari dan kecepatan angin, memengaruhi kinerja sistem energi terbarukan[41].

Berikut adalah penjelasan dari Tabel 2.2 faktor kunci yang mempengaruhi pengembangan sistem hibrid PLTS dan biomassa di Pulau Kundur. Faktor teknikal meliputi peramalan energi, optimasi sistem hibrid terbarukan (HRES), dan inovasi teknologi. Dari sisi ekonomi, biaya energi dan daya tarik investasi menjadi perhatian utama. Aspek lingkungan mencakup pengurangan emisi karbon serta optimalisasi pemanfaatan sumber daya. Faktor sosial melibatkan persepsi publik dan pengembangan modal manusia. Kebijakan pemerintah serta hambatan hukum dan administratif juga menjadi faktor penting. Dalam operasional, manajemen energi (EMS) dan pengelolaan sisi permintaan menjadi kunci keberhasilan. Terakhir, faktor eksternal seperti tekanan geopolitik dan kondisi iklim turut memengaruhi strategi pengembangan energi terbarukan di wilayah tersebut.

<b>Kategori</b>	<b>Faktor Kunci</b>
Teknikal	Energy forecasting, HRES optimization, technological innovations
Economic	Biaya energi, daya tarik investasi
Lingkungan	Emisi karbon, optimalisasi sumber daya
Sosial	Persepsi publik, modal manusia
Kebijakan	Kebijakan pemerintah, hambatan hukum dan administratif
Operation	EMS, manajemen sisi permintaan
Eksternal	Tekanan geopolitik, kondisi iklim

Tabel 2.2 Ringkasan Faktor utama dalam Manajemen Energi terbarukan

Faktor-faktor ini secara kolektif berkontribusi pada pengelolaan sistem energi terbarukan yang efektif, memastikan keberlanjutan dan efisiensinya dalam memenuhi permintaan energi.

### 2.13. Model Input-Proses-Output diterapkan pada pembangkit energi terbarukan

Untuk memahami bagaimana model Input Proses Output (IPO) diterapkan pada pembangkitan energi terbarukan, kita dapat menguraikan model tersebut menjadi tiga komponen dan melihat bagaimana kaitannya dengan sistem energi terbarukan.

**Input** Dalam konteks pembangkitan energi terbarukan, input merujuk pada sumber daya dan teknologi yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi. Sumber daya alam: Sinar matahari, angin, air, dan biomassa. Sumber daya teknologi: Panel surya, turbin angin, pembangkit listrik tenaga air, dan sistem pembakaran biomassa [42][43][20]. Sumber daya ekonomi: Investasi dalam infrastruktur, subsidi untuk teknologi terbarukan, dan kebijakan yang mendukung pengembangan energi terbarukan [44][22][45].

**Proses** melibatkan konversi masukan alami dan teknologi ini menjadi energi yang dapat digunakan teknologi konversi energi: Sel fotovoltaik yang mengubah sinar matahari menjadi listrik, turbin angin yang mengubah energi angin menjadi energi mekanik, dan pembangkit listrik tenaga air yang menggunakan aliran air untuk menghasilkan listrik [42][43][20]. Manajemen operasional: Sistem dan model yang mengoptimalkan efisiensi dan output sumber energi terbarukan. Misalnya, konverter DC/DC canggih yang mengelola aliran daya dari berbagai sumber terbarukan [46][47][48]. Kemajuan teknologi: Peningkatan teknologi yang berkelanjutan, seperti pengembangan panel surya dan turbin angin yang lebih efisien, yang dimodelkan menggunakan kurva pembelajaran untuk memprediksi kinerja dan biaya di masa mendatang [43].

**Output/Keluaran** dari pembangkitan energi terbarukan meliputi Listrik: Keluaran utama, yang disalurkan ke jaringan listrik atau digunakan secara lokal [42][43][20]. Manfaat lingkungan untuk Pengurangan emisi gas rumah kaca dan polutan lainnya dibandingkan dengan pembangkitan energi berbasis bahan bakar fosil [42][44][22].

**Dampak ekonomi** Penciptaan lapangan kerja di sektor energi terbarukan, perubahan struktur ekonomi akibat peralihan dari bahan bakar fosil ke sumber terbarukan, dan pertumbuhan ekonomi secara keseluruhan [44][45][21].

## **Penerapan Model IPO dalam Pembangkitan Energi Terbarukan**

Model IPO membantu dalam memahami dan mengoptimalkan seluruh siklus hidup pembangkitan energi terbarukan mencaup tiga aspek, pertama Analisis Input, Kedua Optimalisasi proses dan Ketiga Ealuasi Output.

Aspek Pertama menjelaskan Mengidentifikasi dan mengukur sumber daya dan teknologi yang diperlukan. Aspek kedua menjelaskan Optimalisasi Proses: Menggunakan model dan simulasi untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan proses konversi energi. Misalnya, model inputoutput dapat mensimulasikan dampak ekonomi dan lingkungan dari kebijakan energi terbarukan dan perubahan teknologi [42][20][22]. Aspek ketiga menjelaskan Evaluasi Output: Menilai efektivitas sistem energi terbarukan dalam hal produksi energi, manfaat lingkungan, dan dampak ekonomi. Ini termasuk mengevaluasi efisiensi berbagai negara dalam pembangkitan energi terbarukan menggunakan analisis data envelopment [49].

Dari penjelasan diatas model IPO menyediakan kerangka kerja yang komprehensif untuk menganalisis pembangkitan energi terbarukan dengan berfokus pada input yang diperlukan, proses yang terlibat, dan output yang dihasilkan. Pendekatan ini membantu dalam mengoptimalkan penggunaan sumber daya, meningkatkan efisiensi teknologi, dan memaksimalkan manfaat ekonomi dan lingkungan dari sistem energi terbarukan [42][43][20][44][22].

### **2.14. Penilaian Kelayakan Manajemen Pengembangan sistem Hibrida PLTS dan PLTBm.**

Untuk menilai kelayakan manajemen dalam mengembangkan sistem hibrida tenaga surya dan biomassa, beberapa faktor kunci perlu dipertimbangkan. Faktor-faktor ini dapat dikategorikan ke dalam aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan.

#### **2.14.1. Kelayakan Teknis**

Desain dan Optimasi Sistem desain sistem hibrida harus mengintegrasikan komponen tenaga surya dan biomassa secara efektif. Hal ini melibatkan pemilihan teknologi yang tepat seperti pengumpul panas matahari dan ketel uap biomassa, dan

mengoptimalkan konfigurasinya untuk aplikasi dan lokasi tertentu [50] [51]. Alat-alat seperti Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER) dapat digunakan untuk simulasi dan optimasi [52] [53].

Metrik Kinerja untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam hal pembangkitan energi, efisiensi, dan keandalan. Misalnya, sistem hibrida dapat mencapai penghematan biomassa yang signifikan dan peningkatan efisiensi termal [54][40]. Sistem harus mampu memenuhi kebutuhan energi secara konsisten, bahkan dalam kondisi lingkungan yang berbeda-beda [55]

#### **2.14.2. Kelayakan Ekonomi**

Analisis Biaya dilakukan untuk menganalisis biaya-manfaat secara menyeluruh, termasuk biaya modal awal, biaya operasi dan pemeliharaan (O&M), dan biaya energi yang diratakan (LCOE. Sebagai contoh, biaya energi untuk sistem hibrida dapat bersaing dengan sumber energi terbarukan lainnya, meskipun mungkin memerlukan subsidi agar layak secara ekonomi [56].

Metrik Finansial menilai metrik keuangan seperti nilai sekarang bersih (NPV), tingkat pengembalian internal (IRR), dan periode pengembalian modal. Analisis sensitivitas dapat membantu mengidentifikasi titik-titik biaya dan area potensial untuk pengurangan biaya [57]. Misalnya, mengurangi biaya O&M atau meningkatkan efisiensi sistem dapat secara signifikan meningkatkan kelayakan ekonomi [56]].

#### **2.14.3. Kelayakan Lingkungan**

Pengurangan Emisi dilakukan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari sistem hibrida, terutama potensinya untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Sistem hibrida dapat secara signifikan menurunkan emisi CO<sub>2</sub> dibandingkan dengan sumber energi konvensional [58] [8]. Metode penilaian siklus hidup (LCA) dapat digunakan untuk menganalisis dampak lingkungan selama siklus hidup sistem [59].

Keberlanjutan Pertimbangkan keberlanjutan sistem dalam hal kontribusi energi terbarukan dan pemanfaatan sumber daya. Sistem hibrida dapat mengoptimalkan penggunaan sumber daya matahari dan biomassa yang tersedia, berkontribusi pada proporsi energi terbarukan yang lebih tinggi dalam bauran energi.

Pertimbangan Implementasi Lokasi dan Ketersediaan Sumber Daya: Kelayakan sistem hibrida sangat bergantung pada ketersediaan sumber daya surya dan biomassa di lokasi yang dituju. Melakukan penilaian sumber daya sangat penting untuk memastikan bahwa sistem dapat beroperasi secara efisien [60]. Serta dukungan Regulasi dan Kebijakan: Keberhasilan sistem hibrida dapat dipengaruhi oleh kebijakan dan insentif dari pemerintah. Subsidi dan peraturan yang mendukung dapat membuat sistem hibrida menjadi lebih menarik dan layak secara finansial [61] [17].

Dengan menangani faktor-faktor ini secara komprehensif, sesuai tabel ringkasan 2.3 ringkasan kelayakan manajemen pengembangan sistem hibrida surya dan biomassa dapat dinilai secara efektif, memastikan bahwa sistem tersebut baik secara teknis, layak secara ekonomi, dan ramah lingkungan.

Tabel Ringkasan

<b>Aspek</b>	<b>Pertimbangan Utama</b>	<b>Contoh/Alat</b>
<b>Teknikal</b>	Desain sistem, pengoptimalan, metrik kinerja	HOMER, NSGA-II, TOPSIS
<b>Ekonomi</b>	Analisis biaya, metrik keuangan, analisis sensitivitas	NPV, IRR, LCOE, payback period
<b>Lingkungan</b>	Pengurangan emisi, keberlanjutan, penilaian siklus hidup	LCA, Penghematan CO2
<b>Implementasi</b>	Ketersediaan sumber daya, dukungan peraturan dan kebijakan	Penilaian sumber daya, insentif pemerintah

Tabel 2.3 Faktor-faktor kelayakan manajemen pengembangan sistem Hibrida Surya dan Biomassa

## **2.15. Kerangka Kerja Input-Output Manajemen Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa**

Untuk mengelola pembangkit listrik tenaga biomassa secara efektif, kerangka kerja input-output (I-O) bisa sangat bermanfaat. Kerangka kerja ini membantu dalam memahami dan mengoptimalkan aspek ekonomi, lingkungan, dan operasional pembangkit listrik. Komponen Utama dari Kerangka Kerja Input-Output untuk Pengelolaan Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa.

### **2.15.1. Analisis Dampak Ekonomi mencakup dua aspek: Pertama, Model I-O Hibrida. Kedua, Model I-O Dinamis.**

Aspek pertama menjelaskan Model I-O Hibrida model ini mengevaluasi dampak ekonomi dari produksi sumber daya dan konsumsi oleh pembangkit listrik tenaga biomassa. Penyesuaian dalam koefisien teknis diperlukan untuk secara akurat mencerminkan perubahan dalam struktur produksi ekonomi karena operasi pembangkit listrik [62]. Aspek kedua menjelaskan model I-O dinamis model-model ini mensimulasikan dinamika rantai pasokan bioenergi, menyesuaikan tingkat produksi berdasarkan surplus atau defisit output. Hal ini membantu dalam mengelola fluktuasi dan memastikan stabilitas dalam rantai pasokan [63].

### **2.15.2. Pengoptimalan Proses dan Efisiensi mencakup dua aspek: Pertama, Desain proses. Kedua, Simulator Pelatihan.**

Aspek pertama menjelaskan pengembangan desain proses yang terperinci dan keseimbangan massa/energi untuk berbagai sistem pembangkit listrik berbasis biomassa (mis. siklus berbasis gasifikasi, siklus uap-Rankine) membantu dalam mengoptimalkan efisiensi dan biaya modal [64]. Aspek kedua menjelaskan Simulator ini dapat memodelkan berbagai skenario untuk mengoptimalkan penanganan bahan bakar dan manajemen proses, yang mengarah pada peningkatan efisiensi yang signifikan [65].

### **2.15.3. Penilaian Lingkungan dan Keberlanjutan mencakup dua aspek: Pertama, Penilaian Siklus Hidup. Kedua, Dampak lingkungan.**

Aspek pertama menjelaskan cara menggabungkan analisis proses dengan analisis I-O ekonomi untuk mengukur konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca di seluruh siklus hidup sistem pembangkit listrik tenaga biomassa [66]. Aspek kedua menjelaskan dampak Lingkungan dari Co-firing dan CCS Menilai dampak lingkungan dari penggabungan pembakaran biomassa dengan penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS) untuk mencapai emisi CO<sub>2</sub> negatif bersih [67].

### **2.15.4. Fleksibilitas dan Kontrol Operasional**

Fleksibilitas Bahan Bakar: Menerapkan strategi kontrol proses berbasis model untuk meningkatkan fleksibilitas bahan bakar pembangkit listrik tenaga biomassa. Hal ini melibatkan pemantauan komposisi bahan bakar secara online dan menyesuaikan operasi yang sesuai [68]. Kontrol Emisi Primer: Mengoptimalkan kualitas bahan bakar dan proses pembakaran untuk mengontrol emisi secara ekonomis, terutama pada pembangkit listrik skala kecil dan menengah [69].

### **2.15.5. Rantai Pasokan dan Manajemen Sumber Daya**

Pengoptimalan Rantai Pasokan: Menggunakan optimasi matematis untuk merancang rantai pasokan bioenergi yang hemat biaya, termasuk lokasi optimal untuk pra-pengolahan dan pembangkit listrik [70]. Pemanfaatan Sumber Daya Regional: Mengembangkan model I-O dinamis untuk menilai kinerja energi, ekonomi, dan lingkungan dari teknologi bioenergi dalam konteks regional [71]. Dengan mengintegrasikan komponen-komponen tersebut seperti yang di tunjukkan pada ringkasan Table 2.4, pengelolaan pembangkit listrik tenaga biomassa dapat dioptimalkan untuk kelangsungan ekonomi, kelestarian lingkungan, dan efisiensi operasional.

## Ringkasan Tabel

Aspek	Penjelasan	Pustaka
Dampak Ekonomi	Model I-O hibrida dan dinamis untuk mengevaluasi dampak ekonomi dan mengelola rantai pasokan	[62] [63]
Pengoptimalan Proses	Desain dan simulator terperinci untuk peningkatan efisiensi	[64] [65]
Penilaian Lingkungan	LCA dan penilaian dampak lingkungan untuk keberlanjutan	[66] [67]
Fleksibilitas Operasional	Fleksibilitas bahan bakar dan kontrol emisi primer	[68] [69]
Manajemen Rantai Pasokan	Pengoptimalan rantai pasokan dan pemanfaatan sumber daya regional	[70] [71].

Tabel 2.4 Kerangka kerja Input-Output Pembangkit listrik tenaga biomassa

Sebagai kesimpulan, kerangka kerja input-output untuk manajemen pembangkit listrik tenaga biomassa mencakup berbagai komponen yang berkontribusi terhadap efisiensi, implikasi lingkungan, dan manfaat ekonomi. Kerangka kerja ini memberikan dukungan keputusan untuk desain yang optimal, memfasilitasi penilaian dampak ekonomi dan lingkungan, dan memungkinkan estimasi dan penilaian kinerja energi, ekonomi, dan lingkungan dari teknologi bioenergi. Namun, penting untuk dicatat bahwa meskipun abstrak ini memberikan wawasan tentang manfaat potensial dari kerangka kerja input-output, penelitian lebih lanjut dan aplikasi praktis diperlukan untuk sepenuhnya memahami implikasinya dalam manajemen pembangkit listrik tenaga biomassa.

#### **2.16. Komponen utama dari kerangka kerja input-output untuk mengelola pembangkit listrik tenaga biomassa**

Untuk mengelola pembangkit listrik tenaga biomassa secara efektif, kerangka kerja input-output sangat penting. Kerangka kerja ini melibatkan beberapa komponen utama yang memastikan operasi yang efisien dan keberlanjutan pembangkit listrik. Berikut adalah komponen utama berdasarkan abstrak yang disediakan, Komponen Kunci dari Kerangka Kerja Input-Output Sistem Penanganan dan Pengolahan Bahan Bakar

**1. Kerja Input-Output Sistem Penanganan dan Pengolahan Bahan Bakar Biomassa mencakup dua aspek, pertama Penangan Bahan bakar. Kedua, Pemantauan kualitas bahan bakar.**

Aspek pertama menjelaskan Fleksibilitas dalam Penanganan Bahan Bakar Pembangkit listrik tenaga biomassa harus menangani berbagai macam sifat dan karakteristik bahan bakar biomassa, yang membutuhkan sistem bahan bakar yang fleksibel [72]. Aspek kedua menjelaskan Pemantauan Kualitas Bahan Bakar dimana Pemantauan komposisi bahan bakar secara terus menerus, termasuk nilai kalor, kadar air, dan komposisi unsur, sangat penting untuk menyesuaikan proses pembakaran dan memastikan pembakaran bahan bakar yang efisien serta pengendalian emisi [68].

**2. Kontrol Pembakaran dan Emisi mencakup dua aspek: Pertama, Kontrol proses. Kedua, Kontrol emisi primer dan sekunder.**

Aspek pertama menjelaskan Kontrol Sistem kontrol canggih, seperti sensor aliran udara virtual dan loop kontrol pembakaran yang didesain ulang, membantu mengelola proses pembakaran secara dinamis, mengurangi emisi seperti NOx dan meningkatkan stabilitas [73]. Aspek kedua menjelaskan untuk pabrik yang lebih kecil, kontrol emisi primer sangat penting untuk menghindari pembentukan polutan, sementara pabrik yang lebih besar juga dapat menggunakan kontrol sekunder [69].

**3. Teknologi Konversi Energi mencakup dua aspek: Pertama, sistem gasifikasi. Kedua, sitem Pembangkit listrik tenaga panas dan gabungan**

Aspek pertama menjelaskan gasifikasi biomassa adalah teknologi utama, mengubah biomassa menjadi syngas untuk pembangkit listrik. Proses ini efisien dan memiliki emisi gas rumah kaca yang lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga batu bara tradisional [74][64]. Aspek kedua menjelaskan Sistem Sistem CHP mengintegrasikan berbagai bentuk pembangkit energi, meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan secara keseluruhan [54].

#### 4. Manajemen Rantai Pasokan mencakup dua aspek: Pertama, Rantai Pasok, Kedua, Pengangkutan dan Penyimpanan.

Aspek pertama menjelaskan Manajemen rantai pasokan biomassa yang efektif sangat penting. Hal ini mencakup pengumpulan biomassa dari berbagai pemasok dan memastikan pasokan yang stabil melalui kontrak jangka panjang [75][76]. Aspek kedua menjelaskan sistem transportasi dan penyimpanan yang efisien diperlukan untuk meminimalkan penggunaan energi dan emisi gas rumah kaca, terutama untuk pembangkit listrik yang lebih besar [77].

#### 5. Analisis Dampak Ekonomi dan Lingkungan mencakup dua aspek: Pertama, Analisis Input-Output, Kedua, Penilaian siklus hidup.

Aspek pertama menjelaskan metodologi kuantitatif ini memodelkan interaksi antara berbagai komponen pembangkit listrik tenaga biomassa dan ekonomi yang lebih luas, menangkap efek riak dari konsumsi sumber daya dan timbulan limbah [78][79]. Aspek kedua menjelaskan LCA mengevaluasi dampak lingkungan dari pembangkit listrik tenaga biomassa di sepanjang siklus hidupnya, mulai dari produksi bahan bakar hingga pengelolaan limbah, untuk memastikan keberlanjutan [80][66].

Dengan mengintegrasikan komponen-komponen ini, pembangkit listrik tenaga biomassa dapat mencapai operasi yang efisien dan berkelanjutan, berkontribusi pada tujuan energi terbarukan dan mengurangi dampak lingkungan sesuai penjelasan Tabel Ringkasan 2.5.

Komponen	Penjelasan	Pustaka
Penanganan dan Pengolahan Bahan Bakar	Sistem yang fleksibel untuk beragam sifat biomassa, pemantauan kualitas bahan bakar secara terus menerus	[72]. [68]
Kontrol Pembakaran dan Emisi	Sistem kontrol yang canggih, kontrol emisi primer dan sekunder	[73]. [69].
Teknologi Konversi Energi	Sistem gasifikasi, Sistem Gabungan Panas dan Daya (CHP)	[74][64]. [77]
Manajemen Rantai Pasokan	Agregasi biomassa, kontrak pasokan yang stabil, transportasi yang efisien	[75][76] [77].

Analisis Dampak Ekonomi dan Lingkungan	Analisis Masukan-Keluaran, Penilaian Siklus Hidup (LCA)	[78][79] [80][66]
--	---	----------------------

Tabel 2.5 Komponen utama kerangka kerja Input-Output Pembangkit listrik Biomassa

### 2.17. Komponen kunci utama kerangka kerja Input-Output dalam proses pembangkit listrik tenaga biomassa.

Kerangka kerja input-output (I-O) adalah metodologi kuantitatif yang digunakan untuk memodelkan sistem dengan komponen-komponen yang saling bergantung, sehingga sangat berguna untuk menganalisis operasi pembangkit listrik tenaga biomassa. Berikut adalah komponen-komponen utama dari kerangka kerja ini:

#### 1. Komponen Input mencakup tiga aspek utama: Aspek Pertama Bahan baku. Aspek kedua, Masukan Energi. Ketiga, Masukan tambahan.

Aspek pertama menjelaskan Input utama adalah biomassa itu sendiri, yang dapat berupa serpihan kayu, residu pertanian, dan bahan organik lainnya [81] [2]. Kualitas dan komposisi biomassa, seperti kandungan air dan komposisi unsur (C, H, O, N, S), sangat penting untuk pembakaran yang efisien dan termasuk energi yang dibutuhkan untuk memanen, memproses, dan mengangkut biomassa ke pembangkit listrik [81]. Input energi siklus hidup juga mencakup energi yang digunakan dalam produksi pertanian dan proses industri [74]. Aspek ketiga menjelaskan Ini adalah sumber daya tambahan yang diperlukan untuk pengoperasian pembangkit listrik, seperti air untuk pendinginan dan bahan kimia untuk pengendalian emisi [81] [74].

#### 2. Komponen Keluaran mencakup tiga aspek utama: Aspek pertama, Listrik dan Panas. Aspek kedua, Emisi dan Limbah. Aspek ketiga, produk sampingan.

Aspek pertama menjelaskan keluaran utama adalah listrik dan, dalam beberapa kasus, panas, yang dapat digunakan untuk pemanasan distrik atau proses industri

[54][82]. Efisiensi output ini dapat bervariasi tergantung pada teknologi yang digunakan, seperti gasifikasi atau siklus uap-Rankine [64]. Aspek kedua menjelaskan Keluaran juga mencakup emisi seperti CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, dan SO<sub>x</sub>, serta limbah padat seperti abu[68] [69]. Pengendalian emisi yang efektif sangat penting untuk meminimalkan dampak lingkungan [69].Aspek ketiga menjelaskan beberapa proses dapat menghasilkan produk sampingan seperti biochar atau syngas, yang dapat digunakan untuk aplikasi lain atau produksi energi lebih lanjut [74] [82].

**3. Interaksi dan Umpan Balik Sistem mencakup tiga aspek: Aspek pertama Keseimbangan Massa. Aspek Kedua, dampak ekonomi. Aspek ketiga penyesuaian dinamis.**

Aspek pertama menjelaskan tentang Kerangka kerja I-O menggunakan neraca massa dan energi untuk melacak aliran material dan energi melalui sistem, memastikan bahwa semua input dan output diperhitungkan [68] [64].

Aspek kedua menjelaskan kerangka kerja ini juga menilai dampak ekonomi dari pembangkit listrik tenaga biomassa terhadap ekonomi lokal, termasuk penciptaan lapangan kerja dan nilai tambah produksi [62][80][83]. Dampak lingkungan, seperti emisi gas rumah kaca dan penipisan sumber daya, dievaluasi dengan menggunakan penilaian siklus hidup (LCA) dan metodologi lainnya [74] [80] [66]. Aspek ketiga menjelaskan Kerangka kerja I-O dapat memasukkan penyesuaian dinamis untuk memperhitungkan perubahan kualitas biomassa, kondisi pasar, dan intervensi kebijakan, sehingga memastikan sistem tetap efisien dan berkelanjutan dari waktu ke waktu [82] [63].

**4. Pertimbangan Teknologi dan Operasional mencakup dua aspek: Aspek pertama, Matrik teknologi. Aspek kedua, Data Operasional.**

Aspek pertama menjelaskan Ini termasuk teknologi spesifik yang digunakan di pembangkit listrik, seperti gasifier, turbin, dan sistem kontrol emisi [64] [69] . Pilihan teknologi mempengaruhi efisiensi dan kinerja lingkungan pembangkit listrik. Aspek kedua menjelaskan data Operasional: Pemantauan dan pengumpulan data secara terus menerus sangat penting untuk mengoptimalkan operasi pabrik. Hal ini termasuk melacak komposisi bahan bakar, efisiensi pembakaran, dan emisi

[68][84]. Kerangka kerja ringkasan pada table 2.6 memastikan pemahaman yang komprehensif tentang operasi pembangkit listrik biomassa, memfasilitasi pengoptimalan kinerja ekonomi dan lingkungan

### Ringkasan Tabel

<b>Komponen</b>	<b>Penjelasan</b>	<b>Pustaka</b>
Biomass Feedstock	Serpihan kayu, residu pertanian, kualitas dan komposisi	[81] [68]
Input Energi	Energi untuk pemanenan, pengolahan, pengangkutan biomassa	[81] [74]
Input Tambahan	Air, bahan kimia untuk pengendalian emisi	[81] [74]
Listrik dan Panas	Keluaran utama, efisiensi bervariasi menurut teknologi	[54][82] [64]
Emisi dan Limbah	CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , abu, diperlukan pengendalian yang efektif	[68] [69]
Produk Sampingan	iochar, syngas untuk aplikasi lebih lanjut	[74] [82]
Keseimbangan Massa dan Energi	Melacak aliran bahan dan energi	[68] [64]
Dampak Ekonomi	Penciptaan lapangan kerja, produksi bernilai tambah	produksi [62][80][83]
Dampak Lingkungan	Emisi gas rumah kaca, penipisan sumber daya	[74] [80] [66]
Penyesuaian Dinamis	Beradaptasi terhadap perubahan kualitas, pasar, kebijakan	[82] [63]

Matrixa Teknologi	Gasifier, turbin, sistem kontrol emisi	emisi [64] [69]
Data Operasional	Memonitor komposisi bahan bakar, efisiensi, emisi	[68][84]

Tabel 2.6 Komponen kunci utama dalam kerangka kerja Input output Pembangkit listrik tenaga listrik Biomassa.

### 2.18. Tahapan yang terlibat dalam kerangka input-output pembangkit listrik biomassa

Tahap-tahap dalam Kerangka Input-Output Pembangkit Listrik Biomassa Kerangka input-output pembangkit listrik biomassa melibatkan beberapa tahap, yang masing-masing penting untuk konversi biomassa menjadi energi secara efisien. Berdasarkan abstrak yang diberikan, tahap-tahap tersebut dapat diringkas sebagai berikut:

#### 1. Pengumpulan dan Penyiapan Biomassa mencakup dua aspek: Aspek pertama Sumber biomassa. Apek kedua, Persiapan.

Aspek pertama menjelaskan biomassa bersumber secara lokal karena jumlahnya yang banyak dan kepadatan energinya yang rendah, yang membuat transportasi jarak jauh menjadi tidak efisien [85]. Aspek kedua menjelaskan biomassa disiapkan dengan cara dikeringkan dan terkadang dilakukan pra-perlakuan untuk memastikannya sesuai untuk proses konversi. Ini mungkin melibatkan pengurangan kadar air dan penyesuaian ukuran partikel [68].

#### 2. Konversi Biomassa mencakup dua aspek: Pertama Proses termokimia. Kedua, Proses Biokimia.

Aspek pertama menjelaskan Proses Termokimia termasuk pembakaran, gasifikasi, dan pirolisis. Setiap proses memiliki persyaratan dan keluaran yang berbeda: Pembakaran: Pembakaran langsung biomassa dengan adanya oksigen untuk menghasilkan panas [85] [86]. Gasifikasi: Oksidasi parsial biomassa untuk menghasilkan syngas (campuran hidrogen dan karbon monoksida) [85] [86]. Pirolisis: Dekomposisi biomassa tanpa adanya oksigen untuk menghasilkan

bio-oil, syngas, dan biochar [85] [86]. Aspek kedua menjelaskan proses Biokimia dimana proses ini meliputi fermentasi dan pencernaan anaerobik, yang utamanya digunakan untuk biomassa basah guna menghasilkan biogas [85]

**3. Konversi Energi mencakup dua aspek utama: Aspek pertama, Pembangkit Panas dan tenaga. Kedua, Panad dan tenaga gabungan (CHP).**

Aspek pertama menjelaskan tentang energi termal dari pembakaran atau energi kimia dalam syngas diubah menjadi listrik dan panas menggunakan berbagai teknologi: Siklus Rankine Uap: Menggunakan uap yang dihasilkan dari pembakaran biomassa untuk menggerakkan turbin [87][86]. Turbin dan Mesin Gas: Memanfaatkan syngas yang dihasilkan dari gasifikasi untuk menghasilkan listrik [87][86][64]. Aspek kedua menjelaskan Panas dan Tenaga Gabungan (CHP) pada sistem yang secara bersamaan menghasilkan listrik dan panas yang berguna, meningkatkan efisiensi secara keseluruhan [87][88].

**4. Pengendalian Emisi dan Pengelolaan Limbah mencakup dua aspek utama: Aspek pertama, pembersiahn gas buang. Kedua, Pengelolaan Limbah.**

Aspek pertama menjelaskan tentang Pentingnya untuk menghilangkan polutan dari gas buang agar sesuai dengan peraturan lingkungan. Ini termasuk filter partikulat, scrubber, dan konverter katalitik [85][74]. Aspek kedua menjelaskan Penanganan produk sampingan seperti abu dari pembakaran atau biochar dari pirolisis, yang dapat digunakan sebagai amandemen tanah atau dibuang dengan aman [85][74].

**5. Output dan Distribusi mencakup dua aspek utama: Aspek pertama, Distribuksi listrik. Apek kedua, Pemanfaatan panas.**

Aspek pertama menjelaskan Listrik yang dihasilkan disalurkan ke jaringan listrik atau digunakan secara lokal [85]. Aspek kedua menjelaskan Pemanfaatan Panas

dalam sistem CHP, panas digunakan untuk pemanasan distrik atau proses industri [87][88].

**6. Pemantauan dan Kontrol mencakup dua aspek utama, aspek pertama, Kontrol proses. Aspek kedua, Mekanisme umpan balik.**

Aspek pertama menjelaskan Pemantauan berkelanjutan terhadap komposisi biomassa dan output energi untuk mengoptimalkan kinerja dan memastikan operasi yang stabil. Ini melibatkan pengumpulan data waktu nyata dan penyesuaian parameter proses [68][87]. Aspek kedua menerapkan kontrol umpan balik untuk menyesuaikan tingkat produksi berdasarkan surplus atau defisit output, memastikan operasi yang efisien [63].

Tahapan-tahapan ini secara kolektif memastikan operasi pembangkit listrik biomassa yang efisien dan berkelanjutan sesuai yang ditunjukkan pada ringkasan table 2.7, mengubah biomassa menjadi energi yang dapat digunakan sambil mengelola dampak lingkungan.

Tahapan-tahapan ini secara kolektif memastikan operasi pembangkit listrik biomassa yang efisien dan berkelanjutan, mengubah biomassa menjadi energi yang dapat digunakan sambil mengelola dampak lingkungan [85] [86][87][86].

Tahap/Proses	Penjelasan
Pengumpulan Biomassa	Pengadaan dan penyiapan biomassa secara lokal
Konversi Biomassa	Proses termokimia (pembakaran, gasifikasi, pirolisis) dan biokimia
Konversi Energi	Penggunaan siklus Rankine uap, turbin gas, mesin, dan sistem CHP
Pengendalian Emis	Pembersihan gas buang dan pengelolaan produk limbah
Keluaran dan Distribusi	Pendistribusian listrik dan pemanfaatan panas
Pemantauan dan Pengendalian	Pemantauan waktu nyata, pengendalian proses, dan mekanisme umpan balik

Tabel 2.7 Tahapan yang terlibat dalam kerangka input output pembangkit listrik biomassa

### **2.19. Tahap Output Pembangkit Listrik Biomassa dalam Pembangkitan Listrik**

Ringkasan Tahap Keluaran Pembangkit Listrik Biomassa dalam Pembangkitan Listrik. Tahap keluaran pembangkit listrik biomassa memainkan peran penting dalam mengubah biomassa menjadi listrik. Proses ini melibatkan beberapa langkah dan teknologi utama yang memastikan pembangkitan listrik yang efisien dan berkelanjutan. Komponen dan Proses Utama Pembakaran dan Pembangkitan Uap Pembangkit listrik biomassa biasanya membakar bahan biomassa seperti limbah kayu dalam boiler untuk menghasilkan uap. Uap ini menggerakkan turbin uap konvensional yang terhubung ke generator, menghasilkan listrik [89][90]. Proses pembakaran harus dikelola dengan hati-hati untuk mengendalikan emisi dan memastikan pembakaran bahan bakar yang efisien [91].

#### **1. Gasifikasi**

Biomassa juga dapat diubah menjadi syngas (campuran hidrogen dan karbon monoksida) melalui gasifikasi. Syngas ini kemudian dapat digunakan untuk bahan bakar turbin gas atau pembangkit listrik siklus gabungan, yang dapat mencapai efisiensi lebih tinggi dan emisi lebih rendah dibandingkan dengan pembakaran langsung [90] [82]. Gasifikasi memungkinkan penggunaan bahan baku biomassa yang lebih luas dan dapat diintegrasikan dengan sistem canggih seperti Biomass Integrated Gasification - Gas Turbine (BIG-GT) untuk meningkatkan kinerja [82].

#### **2. Co-firing dengan Batubara**

Co-firing biomassa dengan batubara di pembangkit listrik tenaga batubara yang sudah ada merupakan metode lain untuk menghasilkan listrik. Pendekatan ini dapat mengurangi emisi CO<sub>2</sub> dan meningkatkan efisiensi pembangkit listrik secara keseluruhan. Pendekatan ini juga membantu dalam memanfaatkan infrastruktur yang sudah ada, sehingga menjadi solusi yang hemat biaya [92][93][94].

Co-firing biasanya melibatkan persentase kecil biomassa yang dicampur dengan batubara, yang berdampak minimal pada kinerja pembangkit listrik sekaligus mendorong penggunaan energi terbarukan [92][93].

### 3. Gabungan Panas dan Tenaga (CHP):

Pembangkit listrik biomassa juga dapat dirancang untuk aplikasi Gabungan Panas dan Tenaga (CHP), yang menghasilkan listrik dan panas yang berguna. Hal ini meningkatkan efisiensi pembangkit secara keseluruhan dan memberikan manfaat tambahan seperti pemanasan untuk proses industri atau sistem pemanas distrik [95][96]. Pertimbangan Lingkungan dan Ekonomi: Pengendalian Emisi: Proses pembakaran dan gasifikasi biomassa harus mengatasi emisi seperti CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, dan partikulat. Teknologi canggih dan pengelolaan yang tepat dapat mengurangi emisi ini, menjadikan biomassa sebagai alternatif yang lebih bersih untuk bahan bakar fosil [91][97][81].

Kelangsungan Ekonomi: Keberhasilan ekonomi pembangkit listrik biomassa bergantung pada faktor-faktor seperti ketersediaan bahan baku, biaya transportasi, dan efisiensi teknologi konversi. Aplikasi co-firing dan CHP dapat meningkatkan kelangsungan ekonomi dengan memanfaatkan infrastruktur yang ada dan memaksimalkan keluaran energi [92][93][94].

Tahap keluaran pembangkit listrik biomassa merupakan bagian integral dari konversi biomassa menjadi listrik melalui berbagai metode seperti pembakaran langsung, gasifikasi, dan co-firing. Proses-proses ini, jika dikelola secara efektif, dapat memberikan cara yang berkelanjutan dan efisien untuk menghasilkan energi terbarukan sambil mengatasi masalah lingkungan [89][90] [82].

#### **2.20. Studi Literatur Penelitian sebelumnya Konsep Manajemen Energi Pada Pembangkit Listrik Hibrid Surya dan Biomassa**

Berdasarkan ringkasan penelitian sebelumnya tentang penerapan konsep manajemen pada sistem pembangkit listrik hibrida solar PV dan biomassa.

##### **b. Konsep Manajemen pada Sistem Hibrida PV-Biomassa**

Dalam dekade terakhir, berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengoptimalkan sistem pembangkit listrik hibrida yang menggabungkan energi surya (PV) dan biomassa. Salah satu fokus utama adalah manajemen daya,

diantaranya melalui algoritma MPTT yang dimodifikasi dan penggunaan filter LC untuk mengurangi harmonisa (THD), sehingga menghasilkan pengiriman daya yang stabil ke jaringan [98]. Selain itu, pendekatan konfigurasi optimal antara biogas dan PV mampu meningkatkan Internal Rate of Return (IRR) sebesar 6,13% dalam jangka waktu 12 tahun, sekaligus menurunkan harga listrik hingga 20% [99].

**c. Integrasi dan Optimalisasi Sistem Hibrida**

Integrasi antara energi panas matahari (CSP) dan boiler biomassa terbukti meningkatkan efisiensi konversi listrik hingga 18,13%, mengurangi konsumsi biomassa 22,53%, serta menurunkan biaya energi rata-rata [100]. Sementara itu, sistem hibrida off-grid yang dirancang untuk daerah pedesaan menunjukkan keandalan dan efisiensi biaya melalui strategi manajemen daya berbasis kecerdasan komputasional [101]

**d. Dampak Ekonomi dan Lingkungan**

Studi menunjukkan bahwa sistem hibrida surya-biomassa tidak hanya menurunkan biaya listrik, tetapi juga mengurangi emisi CO<sub>2</sub> dibandingkan dengan sistem biomassa konvensional [102]. Selain itu, implementasi Energy Management System (EMS) pada sistem hibrida PV-diesel-baterai di wilayah Mashreq berhasil mengatasi masalah pasokan energi sekaligus memberikan manfaat ekonomi [103].

**e. Inovasi dalam Penyimpanan dan Kontrol Energi**

Penggunaan thermal energy storage (TES) dalam kombinasi dengan PV dan biomassa menghasilkan faktor kapasitas tahunan yang tinggi serta biaya listrik yang lebih rendah [104]. Di sisi lain, penerapan mikrogrid hibrida dengan penyimpanan baterai dan gasifier biomassa mampu mencapai operasi yang ekonomis melalui optimasi ukuran komponen [104].

### f. Tantangan dan Peluang Pengembangan

Meskipun sistem hibrida PV-biomassa menawarkan berbagai keunggulan, tantangan seperti kendala kapasitas jaringan, manajemen reservoir, dan koordinasi multi-sumber energi masih perlu diperhatikan [105]. Namun, dengan perkembangan teknologi kontrol dinamis dan optimasi ukuran sistem, potensi implementasi skala besar semakin terbuka lebar [106][107].

Ringkasan penelitian sebelumnya (sepuluh tahun terakhir) tentang penerapan konsep manajemen pada sistem pembangkit listrik hibrida solar PV dan biomassa dalam format Tabel 2.8. Tabel ini merangkum konsep dan temuan manajemen utama dari berbagai penelitian tentang sistem pembangkit listrik hibrida biomassa dan tenaga surya fotovoltaik selama sepuluh tahun terakhir.

<b>Fokus Studi</b>	<b>Konsep Manajemen</b>	<b>Temuan Utama</b>	<b>Pustaka</b>
<b>HRGS dengan PV dan Biomassa</b>	Manajemen daya menggunakan algoritma MPPT yang dimodifikasi dan filter LC untuk mengurangi THD	Pengiriman daya berkelanjutan ke jaringan, produktivitas maksimum, dan manajemen daya yang memuaskan	[98]
<b>Sistem Hibrida Biomassa dan PV</b>	Konfigurasi optimal untuk pengurangan biaya energi dan dampak lingkungan	Kombinasi optimal biogas dan PV menghasilkan IRR sebesar 6,13% selama 12 tahun, diskon harga listrik sebesar 20%	[99]
<b>Hibridisasi CSP-Biomassa</b>	Integrasi siklus gabungan, hibridisasi biomassa matahari, dan penyimpanan syngas	Desain seri memiliki biaya tertinggi, desain paralel memiliki kapasitas tertinggi, desain ekstraksi uap menyeimbangkan	[104]

<b>Fokus Studi</b>	<b>Konsep Manajemen</b>	<b>Temuan Utama</b>	<b>Pustaka</b>
		faktor kapasitas dan pembangkitan energi	
<b>Sistem Hibrida Surya-Biomassa</b>	Integrasi Energi Panas Matahari dan Boiler Uap Biomassa	Peningkatan efisiensi konversi tenaga surya menjadi listrik (18,13%), pengurangan konsumsi biomassa sebesar 22,53%, dan penurunan biaya energi rata-rata	[100]
<b>Produksi dan Penyimpanan Energi Hibrida</b>	Optimalisasi produksi dan penyimpanan energi untuk kebutuhan domestik dan industri	Sistem hibrida yang efisien dan andal dengan panel PV dan kolektor surya	[108]
<b>HES untuk Irigasi dalam Produksi Tebu</b>	Evaluasi PV surya untuk irigasi dan integrasi dengan teknologi ECODRIVE VSD	Sistem hibrida yang andal dan ekonomis, meningkatkan produktivitas pertanian	[109]
<b>Sistem Tenaga Hibrida Mandiri</b>	Sistem manajemen energi cerdas menggunakan MATLAB/SIMULINK	Ketersediaan energi yang dioptimalkan dan meminimalkan biaya operasional serta dampak lingkungan	[110]
<b>Sistem Energi Terbarukan Hibrida</b>	Sinkronisasi dan pengelolaan berbagai sumber terbarukan	Efektif dalam menjaga tegangan dan frekuensi, mengoptimalkan ukuran modul pembangkit daya	[111]

<b>Fokus Studi</b>	<b>Konsep Manajemen</b>	<b>Temuan Utama</b>	<b>Pustaka</b>
<b>Pembangkit Listrik Hibrida Surya-Biomassa</b>	Perbandingan sistem hibrida baru dengan sistem biomassa standar	Biaya listrik yang lebih rendah dan emisi CO2 yang berkurang dalam konfigurasi yang diusulkan	[102]
<b>Sistem Hibrida Hidro-Surya</b>	Koordinasi pengiriman pembangkit listrik tenaga surya dan tenaga air	Peningkatan produksi energi, perbaikan manajemen reservoir, kendala kapasitas jaringan	[105]
<b>Hibridisasi Tenaga Surya dengan Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa</b>	Kombinasi tenaga surya termal dengan sistem PV dan TES	Faktor kapasitas tahunan yang tinggi, biaya listrik yang lebih rendah dengan kemampuan pengiriman	[104].
<b>Sistem Energi Hibrida di Daerah Mashreq</b>	Implementasi EMS untuk sistem hibrida dengan PV, diesel, dan ESS	Pengurangan masalah energi, menarik bagi sektor ekonomi	[103]
<b>Sistem Hibrida Biomassa, Angin, Tenaga Surya, dan Baterai</b>	Model optimasi untuk pasokan dan penyimpanan energi	Manajemen energi yang efektif, analisis ekonomi menunjukkan biaya energi sebesar Rs. 4,20 (US\$ 0,1095)	[112]
<b>Unit Daya Hibrida PV-Bio untuk Pengolahan Air Limbah</b>	Analisis neraca energi untuk pengolahan air limbah mandiri	Unit energi pilihan dengan penyimpanan energi surya jangka pendek	[109]
<b>Sistem Hibrida Off-Grid untuk</b>	Strategi manajemen daya menggunakan	Sistem yang andal dan hemat biaya, ukuran	[101]

<b>Fokus Studi</b>	<b>Konsep Manajemen</b>	<b>Temuan Utama</b>	<b>Pustaka</b>
<b>Komunitas Pedesaan</b>	algoritma kecerdasan komputasional	komponen yang optimal	
<b>Sistem Hibrida Angin/Surya/Sel Bahan Bakar</b>	Strategi manajemen daya menggunakan kontrol MPPT	Manajemen aliran daya yang efisien di antara berbagai sumber energi	[109]
<b>Mikrogrid Hibrida yang Terhubung ke Jaringan</b>	Rencana operasi pengendalian menggunakan penyimpanan baterai dan gasifier biomassa	Pengiriman ekonomis, ukuran optimal menggunakan algoritma GWCSO	[104]
<b>Optimasi Tekno-ekonomi Generator Hibrida</b>	Strategi ukuran awal untuk meminimalkan biaya	Biaya energi yang lebih rendah, desain optimal untuk berbagai skenario	[106][107]
<b>Desain Pabrik Hibrida CSP-Biomassa</b>	Metodologi desain untuk operasi berkelanjutan dan kemampuan pengiriman	Peningkatan manajemen energi, produksi energi listrik tahunan sebesar 2,77 GWh/tahun	[108]
<b>Unit m-CHP Bertenaga Biomassa dengan PV dan Baterai</b>	Pemodelan dinamis untuk kontrol optimal dan manajemen aliran energi	Dampak lingkungan yang sangat rendah, operasi otonom oleh sumber daya lokal	[106][107]

**Tabel 2.8** Ringkasan penelitian sebelumnya (sepuluh tahun terakhir) tentang penerapan konsep manajemen pada sistem pembangkit listrik hibrida solar PV dan biomassa