

Analisis Sistem Logistik Rantai Pasok Substitusi Bahan Baku PLTU Batu Bara Menggunakan *Soft System Methodology* (SSM)

Wan Habibi Rahman Barus^{1*}, Iphov Kumala Sriwana², Nadiya Maharani¹, Muhammad Alif Ihsan³

¹Teknologi Rekayasa Logistik, Politeknik META Industri Cikarang,
Jl. Inti I No.007 Blok C1, Kab. Bekasi, 17530.

²Teknik Industri, Fakultas Rekayasa Industri, Universitas Telkom,
Jalan Telekomunikasi No.1, Kab. Bandung, 40257.

³Teknik Industri, Politeknik META Industri Cikarang,
Jl. Inti I No.007 Blok C1, Kab. Bekasi, 17530.

Penulis untuk Korespondensi/E-mail: wan@politeknikmeta.ac.id

Abstract – The use of coal as the primary raw material for Steam Power Plants (PLTU) poses serious challenges related to sustainability, particularly due to high emissions, pollution risks, and supply chain dependence on non-renewable energy sources. Partial coal substitution with biomass is considered an effective strategy to reduce environmental impacts while supporting new and renewable energy targets. This study aims to analyze the potential of palm oil solid waste, wood pellets, and charcoal briquettes as coal substitutes using the Soft System Methodology (SSM) approach. The study follows seven SSM stages, starting from problem identification, compiling a problem description, formulating a root definition, CATWOE analysis, building a conceptual model, a debating process, and recommending corrective actions. The analysis results indicate that biomass substitution is feasible if supported by an integrated logistics system, the availability of biomass supplies, and compliance with the technical specifications for PLTU combustion. Biomass from palm oil waste, wood waste, and agricultural residues has a fairly stable energy value and can be obtained through a more environmentally friendly supply chain. Overall, this study confirms that the SSM approach is effective in understanding the complexity of coal-fired power plant problems and formulating renewable energy-based solutions through strengthening the biomass logistics system.

Abstrak - Penggunaan batu bara sebagai bahan baku utama Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) memunculkan tantangan serius terkait keberlanjutan, terutama akibat tingginya emisi, risiko pencemaran, serta ketergantungan rantai pasok terhadap sumber energi tak terbarukan. Substitusi sebagian batu bara dengan biomassa menjadi salah satu strategi yang dinilai efektif untuk mengurangi dampak lingkungan sekaligus mendukung target energi baru terbarukan. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi biomassa seperti pelet kayu, limbah padat kelapa sawit dan arang briket sebagai bahan substitusi batu bara dengan pendekatan *Soft System Methodology* (SSM). Penelitian mengikuti tujuh tahapan SSM, mulai dari identifikasi masalah, penyusunan gambaran masalah, perumusan root definition, analisis CATWOE, pembangunan model konseptual, proses debating, hingga rekomendasi tindakan perbaikan. Hasil analisis menunjukkan bahwa substitusi biomassa layak diterapkan apabila didukung oleh integrasi sistem logistik, ketersediaan pasokan biomassa, serta kesesuaian spesifikasi teknis pembakaran PLTU. Biomassa dari limbah kelapa sawit, limbah kayu, dan residu pertanian memiliki nilai energi yang cukup stabil serta dapat diperoleh melalui rantai pasok yang lebih ramah lingkungan. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa pendekatan SSM efektif untuk memahami kompleksitas persoalan PLTU batu bara dan merumuskan solusi berbasis energi terbarukan melalui penguatan sistem logistik biomassa.

Keywords - Biomass, PLTU, Renewable Energy, Soft Systems Methodology, Supply Chain Logistics.

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batu bara masih menjadi andalan pemerintah dalam memenuhi kebutuhan listrik nasional. Selain biayanya yang relatif rendah, pasokan batu bara pun mudah diperoleh karena Indonesia memiliki banyak lokasi penambangan batu bara [1]. Pembangkit listrik selain berfungsi menghasilkan energi listrik juga menimbulkan berbagai jenis limbah, salah satunya emisi CO₂. Gas ini dilepaskan dari proses pembakaran maupun penguapan dan pada PLTU batu bara, emisi CO₂ menjadi keluaran utama dari proses pembakaran batu baranya. Emisi yang dihasilkan turut mempercepat terjadinya pemanasan global dan menguatkan efek gas rumah kaca (GRK) yang kemudian dapat memicu perubahan iklim yang semakin ekstrem. Selain itu, PLTU yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar juga melepaskan kontaminan radioaktif yang berpotensi mengancam kesehatan manusia [2].

Metode Co-firing merupakan teknologi substitusi parsial batu bara dengan biomassa atau bahan bakar padat lainnya di dalam boiler PLTU. Pemerintah melalui PLN menargetkan implementasi co-firing pada sejumlah PLTU untuk mendukung pencapaian bauran energi terbarukan serta penurunan emisi [3-4]. Program ini membuka peluang pemanfaatan sumber daya lokal yang melimpah seperti limbah padat kelapa sawit, pelet kayu dan arang briket sebagai bahan substitusi. Ketiga bahan tersebut dianggap potensial karena ketersediaannya yang relatif stabil di berbagai wilayah Indonesia serta karakteristik energi yang memungkinkan digunakan sebagai bahan bakar pendamping Batu bara [5].

Indonesia adalah salah satu produsen kelapa sawit terbesar di dunia, sehingga menghasilkan limbah padat sawit dalam jumlah yang sangat banyak, seperti cangkang, serat dan tandan kosong (EFB), yang sebenarnya memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber bahan bakar. Selain itu, pelet kayu memiliki densitas energi yang tinggi, mudah ditangani, dan relatif stabil, menjadikannya komoditas biomassa yang umum digunakan dalam praktik co-firing di berbagai negara [3]. Sementara itu, arang briket yang berasal dari limbah biomassa memiliki karakteristik pembakaran yang baik dan tingkat emisi yang relatif rendah. Meskipun memiliki potensi besar, perbedaan sifat fisik dan kimia ketiga bahan tersebut menimbulkan tantangan tersendiri dalam proses pengolahan, pengendalian

kualitas, dan penanganan selama penyimpanan serta distribusi [6-7].

Implementasi substitusi bahan baku pada PLTU tidak hanya dipengaruhi oleh aspek teknis pembakaran, tetapi juga oleh kesiapan sistem logistik dan rantai pasok. Limbah padat kelapa sawit biasanya tersebar di area perkebunan dan memiliki densitas rendah sehingga memerlukan armada transportasi besar untuk menjamin kuantitas pasokan. Pelet kayu umumnya diproduksi oleh industri tertentu yang jaraknya jauh dari PLTU, sehingga biaya transportasi menjadi komponen utama dalam struktur biaya, sedangkan arang briket membutuhkan fasilitas penyimpanan yang kering dan tertutup untuk menjaga stabilitas kualitasnya selama distribusi. Tantangan geografis, ketersediaan infrastruktur, karakteristik material dan koordinasi antar-*stakeholder* membuat sistem logistik substitusi biomassa menjadi kompleks dan membutuhkan pendekatan analisis yang komprehensif [8].

Mayoritas penelitian mengenai co-firing di Indonesia lebih banyak berfokus pada aspek teknis performa pembakaran, optimasi boiler, serta analisis karakteristik energi dari masing-masing bahan substitusi, namun kajian mengenai rantai pasok dan sistem logistik dari bahan biomassa seperti limbah sawit, pelet kayu dan arang briket masih sangat terbatas, terutama dalam konteks integrasi pasokan, transportasi, penyimpanan, serta kesiapan operasional menuju implementasi skala besar [9-10]. Selain itu, belum banyak pendekatan yang mampu memetakan permasalahan secara holistik dan mencakup dinamika antar-aktor yang terlibat dalam penyediaan bahan substitusi ini. Oleh karena itu, diperlukan kajian sistemik untuk memahami akar permasalahan dan peluang perbaikan dalam sistem logistik co-firing.

Dalam mengatasi kompleksitas tersebut, pendekatan *Soft System Methodology* (SSM) menjadi relevan karena mampu menangani permasalahan yang bersifat tidak terstruktur dan melibatkan banyak stakeholder [11]. SSM memungkinkan peneliti memetakan proses, aliran material, hubungan antar-aktor, serta mengidentifikasi kebutuhan perbaikan pada sistem logistik substitusi bahan baku [12]. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sistem logistik rantai pasok limbah padat kelapa sawit, pelet kayu dan arang briket sebagai bahan substitusi batu bara di PLTU menggunakan SSM, serta menyusun model konseptual yang dapat menjadi dasar rekomendasi peningkatan efektivitas dan keberlanjutan program co-firing. Hasil kajian

diharapkan memberikan kontribusi dalam pengembangan *supply chain* biomassa di sektor pembangkit listrik nasional.

METODE

Penelitian ini menggunakan Pendekatan *Soft System Methodology* (SSM) untuk menganalisis dan memodelkan sistem logistik rantai pasok substitusi bahan baku PLTU batu bara. SSM dipilih karena permasalahan substitusi batu bara melibatkan berbagai pemangku kepentingan, kondisi sistem yang kompleks dan ketidakjelasan struktur masalah. Secara umum, penelitian ini terdiri dari enam tahapan SSM yang kemudian dipadukan dengan analisis rantai pasok dan logistik.

Tahapan Penelitian

Terdapat 7 langkah dalam metode ini. Ketujuh langkah tersebut adalah [13]:

Tahap 1: Identifikasi Masalah. Pada tahap awal ini, peneliti atau analis mengamati situasi nyata secara keseluruhan tanpa memberikan penilaian atau solusi terlebih dahulu. Tujuannya adalah memahami konteks masalah yang masih kacau, kompleks dan tidak terdefinisi dengan jelas.

Tahap 2: Gambaran Masalah. Pada tahap ini, masalah mulai dijelaskan secara lebih rinci melalui *rich picture*, diagram atau narasi untuk memperlihatkan hubungan antar-aktor, proses, konflik dan isu utama [14].

Tahap 3: *Root Definition*. *Root definition* dirumuskan untuk mendeskripsikan sistem yang relevan berdasarkan transformasi utama [15].

Tahap 4: Analisis CATWOE. Setiap unsur CATWOE (*Customers, Actors, Transformation, Weltanschauung, Owners, Environmental Constraints*) dianalisis untuk memastikan bahwa *root definition* komprehensif dan mengakomodasi berbagai kepentingan *stakeholder* [16].

Tahap 5: Model Konseptual. Model aktivitas logis disusun berdasarkan *root definition* dan CATWOE. Model ini berisi rangkaian aktivitas ideal mulai dari identifikasi awal sampai akhir [17].

Tahap 6: Proses *Debating*. Model konseptual dibandingkan dengan kondisi nyata melalui diskusi dengan pihak terkait atau melalui data sekunder. Perbedaan antara model ideal dan realitas dianalisis

untuk menentukan perubahan yang *feasible* dan *desirable* [18].

Tahap 7: Tindakan Memperbaiki Masalah. Tahap akhir berupa perumusan rekomendasi dan langkah-langkah implementasi yang dapat dilakukan oleh pemerintah, PLN, masyarakat dan pelaku industri biomassa. Tindakan perbaikan dirancang bertahap, dimulai dari pembentukan rantai pasok biomassa, pengurangan bertahap penggunaan batu bara, hingga penerapan kebijakan energi terbarukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahap 1: Identifikasi Masalah

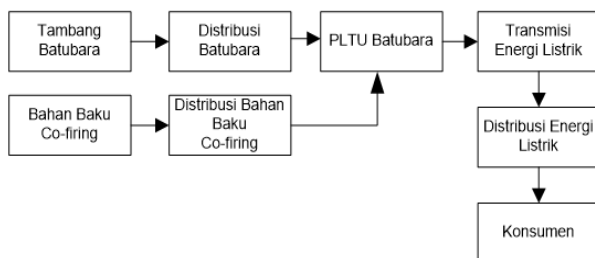
PT PLN (Persero) merupakan Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang memiliki peran strategis dalam penyediaan energi listrik nasional. Hingga saat ini, bauran energi pembangkit listrik di Indonesia masih didominasi oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar utama. Berdasarkan data Kementerian ESDM, kontribusi PLTU batu bara mencapai lebih dari 60% dari total kapasitas pembangkit listrik nasional, sehingga keberlanjutan pasokan batu bara menjadi faktor krusial dalam menjaga keandalan sistem kelistrikan nasional [19].

Ketergantungan tinggi terhadap batu bara menimbulkan berbagai permasalahan sistemik, baik dari sisi lingkungan, regulasi, maupun logistik rantai pasok. Secara global dan nasional, terdapat tekanan kuat terhadap penurunan emisi karbon sejalan dengan komitmen Indonesia dalam *Nationally Determined Contribution* (NDC) dan target *Net Zero Emission* (NZE) tahun 2060. PLTU batu bara menjadi salah satu penyumbang emisi CO₂ terbesar di sektor energi, sehingga mendorong kebutuhan akan substitusi bahan baku yang lebih ramah lingkungan, seperti biomassa (*co-firing*), RDF atau bahan bakar alternatif lainnya [20-21].

Dapat diketahui bahwa batu bara merupakan sebuah bahan baku energi tak terbarukan. Dimana suatu saat dapat mengalami penurunan/kehabisan sisa persediaan cadangan di bumi ini. Selain masalah pada ketersediaan bahan baku batu bara itu sendiri. Permasalahan lainnya ada pada hasil sampingan dengan menggunakan batu bara dari segi lingkungan. Batu bara sendiri mengeluarkan zat-zat radioaktif yang berbahaya bagi lingkungan serta manusia ketika dilakukan pembakaran, tidak hanya lingkungan sekitar PLTU saja yang menjadi dampak tetapi selama pendistribusian Batu bara dengan

menggunakan kapal tongkang di laut akan memberikan dampak yang sangat berbahaya bagi lingkungan sekitar laut yang dilalui kapal tongkang tersebut [2], [22].

Berdasarkan permasalahan diatas perlu dilakukan sebuah analisis mengenai permasalahan keberlanjutan pada PLTU Batu bara dengan mempertimbangkan 3 dimensi keberlanjutan yaitu dimensi ekonomi, dimensi lingkungan dan dimensi sosial. Dimensi yang menjadi permasalahan dalam PLTU Batu bara adalah dimensi Lingkungan dan dimensi sosial. Karena kedua dimensi ini memberikan suatu permasalahan yang sangat kompleks seperti dampak lingkungan sekitar mulai dari area tambang batu bara, pendistribusian batu bara ke tempat PLTU dan permasalahan pada saat PLTU akan beroperasi. Hal ini menyebabkan perlu analisis lebih lanjut mengenai kompleksitas permasalahan tersebut. Berikut gambar rantai pasok dari PLTU Batu bara dapat dilihat pada gambar 1.



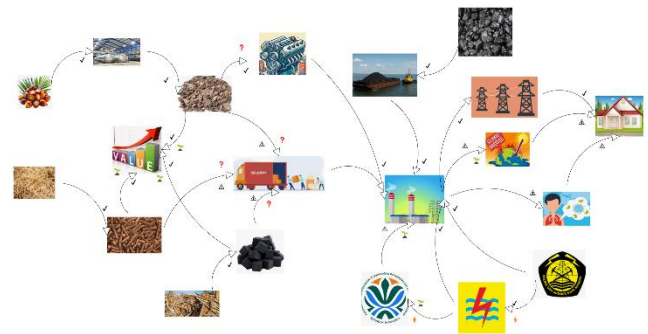
Gambar 1. Model Rantai Pasok PLTU Batu bara

Kompleksnya situasi problematik pada rantai pasok PLTU Batu bara dalam aspek keberlanjutan dengan menggunakan 3 dimensi keberlanjutan lingkungan, sosial dan ekonomi. Hal ini menyebabkan suatu pendekatan untuk menyelesaikan permasalahan kompleks tersebut, untuk menangani kompleksitas dalam rantai pasok PLTU Batu bara, penelitian ini menerapkan Pendekatan *Soft System Methodology* (SSM). Pendekatan SSM tidak membatasi analisis pada variabel tertentu, tetapi berupaya mengidentifikasi sebanyak mungkin aspek yang saling berinteraksi dalam sistem. Dengan demikian, perumusan masalah menjadi lebih komprehensif karena mempertimbangkan berbagai dimensi serta mampu mengantisipasi dinamika atau perubahan yang mungkin terjadi.

Tahap 2: Gambaran Masalah

Gambar berikut didapatkan bahwa dimensi lingkungan memiliki indikator yang cukup banyak untuk aspek keberlanjutan dalam PLTU Batu bara ini. Situasi permasalahan keberlanjutan PLTU Batu

bara tersebut divisualisasikan ke dalam suatu alat yaitu *rich picture* yang dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. *Rich Picture* PLTU Batu bara

Rich picture yang disederhanakan menggambarkan sistem logistik substitusi bahan baku PLTU sebagai sistem sosial-teknis yang melibatkan berbagai aktor dengan kepentingan yang berbeda. PLN sebagai operator PLTU berada pada posisi sentral, menghadapi tekanan untuk menjaga keandalan pembangkit dan efisiensi biaya, sekaligus memenuhi tuntutan regulator dan masyarakat untuk menurunkan emisi.

Sistem logistik bahan baku substitusi ditandai oleh permasalahan kualitas dan kontinuitas pasokan biomassa, keterbatasan infrastruktur logistik, serta peningkatan biaya operasional. Kondisi tersebut menimbulkan konflik antara tujuan lingkungan dan kebutuhan operasional PLTU. Hasil *Rich picture* menegaskan bahwa permasalahan substitusi bahan baku PLTU tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga dipengaruhi oleh aspek kebijakan, koordinasi aktor, dan persepsi risiko, sehingga memerlukan pendekatan *Soft System Methodology* untuk merumuskan perbaikan sistem yang *feasible* dan dapat diterima oleh seluruh pemangku kepentingan.

Tahap 3: *Root Definition*

Root Definition ini menggambarkan bahwa sistem yang dikaji adalah sistem yang bertujuan untuk menyediakan bahan baku energi alternatif berbasis biomassa terbarukan melalui pemanfaatan limbah padat perkebunan dan industri kayu sebagai substitusi batu bara di PLTU (Tabel 1). Sistem ini melibatkan aktor utama seperti pemerintah, PLN, Dinas Lingkungan Hidup, Dinas ESDM, pemasok biomassa, serta masyarakat penghasil limbah (petani tebu, pendados sawit dan industri kayu).

Sistem ini bertujuan memperbaiki situasi permasalahan PLTU yang bergantung pada batu bara, terutama dampak negatif terhadap lingkungan, fluktuasi pasokan batu bara, serta kurangnya

pemanfaatan limbah biomassa yang berpotensi sebagai sumber energi. Melalui serangkaian aktivitas identifikasi, evaluasi energi, pembentukan rantai pasok dan penyusunan kebijakan, sistem diharapkan mampu menghasilkan skema substitusi

bahan baku yang *feasible*, ekonomis dan ramah lingkungan. Perubahan ini mendukung pengurangan emisi, meningkatkan ketahanan energi, serta memberi manfaat ekonomi kepada masyarakat lokal.

Tabel 1. Identifikasi Akar Masalah dengan Analisis 5 *Whys*

Kategori	Whys 1	Whys 2	Whys 3	Whys 4	Whys 5
Man	Mengapa implementasi substitusi bahan baku belum optimal?	Mengapa operator belum terbiasa?	Mengapa pelatihan terbatas?	Mengapa masih <i>pilot project</i> ?	Mengapa risiko operasional tinggi?
	Karena operator PLTU dan pemasok belum terbiasa menangani bahan baku substitusi.	Karena kompetensi dan pelatihan terkait biomassa/ RDF masih terbatas.	Karena substitusi masih bersifat <i>pilot project</i> dan belum menjadi operasi utama.	Karena PLN masih berhati-hati terhadap risiko operasional.	Karena belum ada sistem logistik dan operasional yang matang untuk bahan baku substitusi.
Machine	Mengapa operasional PLTU berisiko terganggu?	Mengapa tidak kompatibel?	Mengapa perbedaan karakteristik menjadi masalah?	Mengapa belum dimodifikasi optimal?	Mengapa investasi terbatas?
	Karena peralatan PLTU belum sepenuhnya kompatibel dengan bahan baku substitusi.	Karena karakteristik biomassa berbeda dengan batu bara.	Karena sistem <i>feeding</i> dan <i>boiler</i> belum dimodifikasi optimal.	Karena investasi infrastruktur masih terbatas.	Karena ketidakpastian manfaat jangka panjang dan skema pendanaan.
Method	Mengapa proses logistik bahan baku substitusi tidak stabil?	Mengapa belum ada SOP baku?	Mengapa masih fokus batu bara?	Mengapa belum beralih ke sistem baru?	Mengapa koordinasi sulit dilakukan?
	Karena belum ada SOP baku pengelolaan bahan baku substitusi.	Karena standar operasional masih berfokus pada batu bara.	Karena sistem perencanaan energi historis berbasis batu bara.	Karena perubahan sistem membutuhkan koordinasi lintas pihak.	Karena belum ada kebijakan operasional terintegrasi untuk substitusi bahan baku.
Material	Mengapa kualitas bahan baku substitusi tidak konsisten?	Mengapa sumber lokal menjadi masalah?	Mengapa standar berbeda?	Mengapa standar belum ditetapkan?	Mengapa masih berkembang?
	Karena bahan baku berasal dari berbagai sumber lokal.	Karena standar kualitas berbeda-beda.	Karena belum ada standar nasional baku biomassa/ RDF PLTU.	Karena pemanfaatannya masih berkembang.	Karena ekosistem rantai pasok substitusi belum matang.
Money	Mengapa biaya logistik bahan baku substitusi relatif tinggi?	Mengapa densitas rendah berdampak biaya?	Mengapa volume besar bermasalah?	Mengapa infrastruktur belum siap?	Mengapa investasi belum optimal?
	Karena densitas energi biomassa rendah.	Karena volume angkut lebih besar.	Karena infrastruktur logistik belum siap.	Karena investasi belum optimal.	Karena insentif ekonomi dan regulasi pendukung masih terbatas.

Tahap 4: Analisis CATWOE

Root definition kemudian dievaluasi dan diperbaiki menggunakan analisis CATWOE (C = *Customer*, A = *Actors*, T = *Transformation*, W = *Worldview*, O = *Owners*, E = *Environmental constraints*). Hasil dari *root definition* dan analisis CATWOE tersebut menjadi dasar dalam merumuskan aktivitas-aktivitas pada *purposeful activity model* dalam sistem manajemen rantai pasok PLTU Batu bara.

Sistem yang dimiliki oleh PLTU Batu bara sebagai perusahaan yang memproduksi energi listrik yang kurang ramah bagi lingkungan (P) dengan melakukan pemilihan sumber energi baru terbarukan yaitu cangkang limbah padat kelapa sawit, arang briket dan pellet kayu (Q) dalam rangka dibangunnya pemanfaatan energi baru terbarukan sebagai bahan baku substitusi PLTU Batu bara (R). Berdasarkan hasil analisis pada tahapan 2 *root definition* dan CATWOE disusun sebagai berikut pada tabel 2.

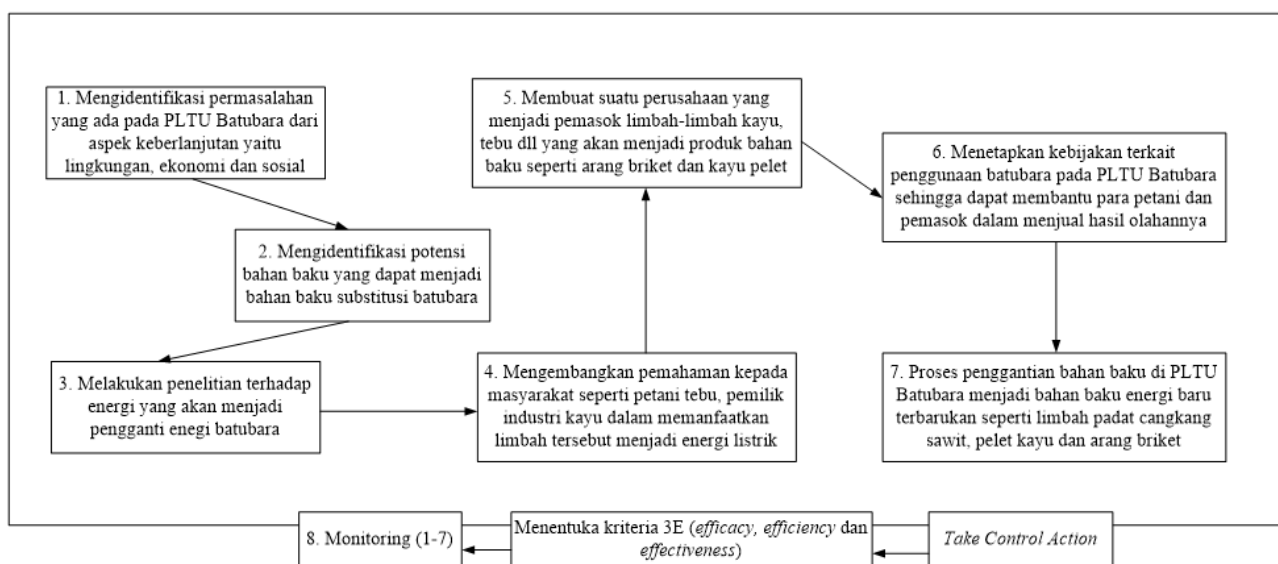
Tabel 2. Analisis CATWOE

Analisa CATWOE		Keterangan
C	<i>Customer</i> (Pelanggan)	Industri Manufaktur, Transportasi dan Masyarakat Pendodos Sawit, Pabrik PKS,
A	<i>Actors</i> (Pelaku)	Petani Tebu, Dinas Lingkungan Hidup, PLN, ESDM
T	<i>Transformation</i> (Transformasi)	Terwujudnya pengurangan penggunaan bahan baku batu bara pada PLTU Batu bara

Analisa CATWOE		Keterangan
W	<i>Weltanschauung</i> (Persepektif)	menjadi PLTU dengan bahan baku energi terbarukan
		Adanya bahan baku yang lebih ramah lingkungan dan menjamin kondisi lingkungan menjadi lebih baik
O	<i>Owners</i> (Pemilik)	Perusahaan Listrik Negara (PLN)
E	<i>Environment Constraint</i> (Lingkungan Sistem)	Seluruh kelembagaan pusat dan daerah yang berkoordinasi dengan PLN (Contoh: ESDM, Dinas Lingkungan Hidup)

Tahap 5: Model Konseptual

Esensi dari *system thinking* terletak pada pengembangan model konseptual sebagai perangkat analitis untuk memahami dan mengevaluasi kondisi nyata yang dianggap bermasalah. *Root definition* yang telah dirumuskan kemudian diterjemahkan ke dalam model konseptual yang dikenal sebagai *Purposeful Human Activity System (PHAS)* yang menggambarkan hubungan antar aktivitas yang diperlukan untuk mewujudkan proses transformasi yang diinginkan. Model konseptual tersebut disusun berdasarkan dimensi keberlanjutan yang dianalisis. Pada model konseptual terdapat sub sistem sub sistem yang indikator-indikator pada setiap dimensi. Dalam model konseptual tersebut ditentukan juga indikator krusial yang harus dibenahi dan diperbaiki, yang nantinya akan menjadi rencana aktivitas perbaikan guna meningkatkan indeks keberlanjutan perusahaan tersebut. Berdasarkan *root definition* dan CATWOE tersebut dibentuk suatu model konseptual yang dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Model Konseptual

Tahap 6 Proses *Debating*

Tahap keenam dalam *Soft System Methodology* melibatkan proses membandingkan model dengan kondisi nyata yaitu menilai kesesuaian antara representasi situasi dunia nyata dengan model yang dikembangkan. Perbandingan ini bertujuan untuk mengidentifikasi area yang membutuhkan perbaikan

serta aspek-aspek penting dalam sistem, sehingga hasilnya dapat dijadikan dasar dalam menentukan arah perubahan yang diperlukan. Aktivitas tersebut dianalisis kondisi aktual dan permasalahannya kemudian dievaluasi dengan saran perbaikan. Saran perbaikan sistem tersebut dijabarkan sebagai berikut pada tabel 3.

Tabel 3. *Debating*

No	Aktivitas	Syarat	Perangkat	Langkah	Hasil	Refleksi dengan tujuan
1	Mengidentifikasi permasalahan yang ada pada PLTU Batu bara dari aspek keberlanjutan yaitu lingkungan, ekonomi dan sosial	Mengetahui permasalahan yang timbul akibat dari PLTU Batu bara	PLTU Batu bara	Membentuk sebuah peneliti dalam menganalisis permasalahan yang ada pada PLTU Batu bara	Didapatkan sebuah permasalahan dalam pengoperasian PLTU Batu bara	Masyarakat mengetahui dampak yang diakibatkan oleh penggunaan batu bara di PLTU
2	Mengidentifikasi potensi bahan baku yang dapat menjadi bahan baku substitusi batu bara	Dinas terkait melakukan identifikasi bahan baku yang memiliki potensi dan juga sumber EBT sehingga dapat menggantikan penggunaan batu bara	Dinas Lingkungan Hidup, ESDM dan PLN	Melakukan pengukuran nilai energi kalor yang dihasilkan dari setiap bahan baku yang memiliki potensi energi	Didapatkan bahan-bahan yang memiliki potensi dalam penggantian sumber energi PLTU Batu bara	Masyarakat pendodus kelapa sawit, petani tebu dan industri furniture kayu mengetahui potensi yang dapat dihasilkan dari limbah tersebut.
3	Melakukan penelitian terhadap energi yang akan menjadi pengganti energi batu bara	Pemilihan dilakukan berdasarkan hasil penelitian dengan membahas berbagai aspek yaitu, ekonomi, sosial, lingkungan dan kualitas sumber energi	Dinas Lingkungan Hidup, ESDM dan PLN	Melakukan penilaian terhadap potensi energi dan memilih bahan baku yang memiliki potensi energi tertinggi	Pemerintah mengetahui bahan baku yang akan dijadikan prioritas dalam melakukan pengembangan selanjutnya	Pemerintah lebih menggalakkan lagi penggunaan energi baru terbarukan sebagai wujud pengurangan emisi karbon dan efek gas rumah kaca.
4	Mengembangkan pemahaman kepada masyarakat seperti petani tebu, pemilik industri kayu dalam memanfaatkan limbah tersebut menjadi energi listrik	Diketahui bahan baku apa saja yang menjadi prioritas dalam penggantian bahan baku PLTU Batu bara	Peraturan pemerintah dan Dinas lingkungan hidup	Mensosialisasikan bahwasanya pemanfaatan limbah hasil kebun dan petani dapat dimanfaatkan menjadi bahan baku pengganti PLTU Batu bara	Masyarakat menjadi mengetahui keuntungan yang mereka dapatkan ketika mengumpulkan limbah tersebut dan menjualkan kepada para pemasok	Masyarakat menjadi lebih peduli dengan lingkungan dengan memanfaatkan limbah yang dapat diolah menjadi pellet kayu dan arang briket sehingga dapat membantu meningkatkan perekonomian mereka.
5	Membuat suatu perusahaan yang menjadi pemasok limbah-limbah kayu, tebu dll yang akan menjadi produk bahan baku	Masyarakat memahami betapa pentingnya limbah kayu yang dihasilkan dari kebun tebu maupun limbah	Peraturan pemerintah	Membentuk sebuah perusahaan yang dapat menjembatani para petani sehingga menjadi	Bertambahnya perusahaan dalam pengolahan limbah kayu, tebu dll sehingga dapat menjadi produk	Terbentuknya suatu masyarakat yang paham terkait pemahaman limbah padat kayu, tebu dll yang dapat menjadi pemasukan bagi

No	Aktivitas	Syarat	Perangkat	Langkah	Hasil	Refleksi dengan tujuan
	seperti arang briket dan kayu pelet	kayu sisa hasil industri kayu sebagai bahan baku energi baru terbarukan		pemasok bahan baku	sebagai bahan baku PLTU	mereka dan menjadi nilai tambah bagi limbah tersebut.
6	Menetapkan kebijakan terkait penggunaan batu bara pada PLTU Batu bara sehingga dapat membantu para petani dan pemasok dalam menjual hasil olahannya	Kebijakan-kebijakan yang dibuat merupakan suatu hasil diskusi bersama mulai dari pihak pemerintah dengan instansi terkait penggantian energi batu bara tersebut	Peraturan pemerintah	Proses penetapan kebijakan yang dilakukan oleh pihak pemerintah menjadi sebuah peraturan pemerintah	Kebijakan - kebijakan dapat digunakan sebagai penguat bagi PLTU Batu bara untuk segera dilakukan penggantian bahan baku EBT	Terdapat kebijakan-kebijakan dari pemerintah agar segera dilakukannya penggantian bahan baku PLTU Batu bara menjadi bahan baku EBT.
7	Proses penggantian bahan baku di PLTU Batu bara menjadi bahan baku energi baru terbarukan seperti limbah padat cangkang sawit, pelet kayu dan arang briket	Penggantian bahan baku batu bara diharapkan akan menjadikan dampak lingkungan yang lebih baik lagi.	Peraturan pemerintah	Proses pergantian bahan baku batu bara di PLTU dilakukan secara bertahap dan diawasi oleh pemerintah	Pengurangan penggunaan batu bara di PLTU dan menjaga ketersediaan batu bara di Indonesia	Terjadi pengurangan penggunaan batu bara sebagai bahan baku PLTU dan mengatasi kondisi persediaan batu bara di Indonesia.

Tahap 7: Tindakan Memperbaiki Masalah

Melaksanakan tindakan perbaikan yang telah direkomendasikan dan menerapkannya pada kondisi nyata dengan mempertimbangkan berbagai aspek permasalahan. Pada tahap akhir, dilakukan penyusunan rekomendasi untuk meningkatkan kinerja sistem yang sebelumnya digunakan. Rincian usulan perbaikan tersebut disajikan pada tabel 4.

Tabel 4. Perbaikan Situasi

Usulan Perubahan yang dapat dilakukan	Aksi dalam Perbaikan Situasi
Mensosialisasikan kepada masyarakat dan para petani kelapa sawit, tebu dan industri furniture kayu bahwa limbah yang dihasilkan dapat diolah menjadi bahan baku pengganti sumber energi listrik di PLTU	Menjadwalkan kegiatan secara rutin sehingga masyarakat ataupun petani mengetahui keuntungan yang dapat mereka peroleh dengan mengumpulkan limbah hasil pertanian tersebut
Pengurangan penggunaan batu bara sebagai bahan baku utama di PLTU demi mengurangi dampak lingkungan yang diakibatkan penggunaan batu bara tersebut	Proses pengurangan dilakukan secara bertahap dan berkala demi keberlanjutan dari PLTU tersebut agar nantinya tidak terjadi permasalahan pada PLTU ketika proses pengurangannya dilakukan

Usulan Perubahan yang dapat dilakukan	Aksi dalam Perbaikan Situasi
	secara mendadak dan menyeluruh
Pemerintah membuat kebijakan ataupun target sehingga ada target yang jelas demi mengurangi penggunaan pemakaian batu bara di PLTU	Adanya Rancangan Jangka Panjang terkait penggunaan EBT pada PLTU sehingga dapat mengurangi pemakaian batu bara

Berdasarkan analisis menggunakan *Soft System Methodology* (SSM), ditemukan bahwa permasalahan keberlanjutan pada PLTU Batu bara terutama dipengaruhi oleh dua dimensi utama yaitu lingkungan dan sosial, sementara dimensi ekonomi turut menjadi faktor pendukung. Hasil identifikasi menunjukkan bahwa ketergantungan PLTU terhadap batu bara menimbulkan dampak signifikan berupa pencemaran udara, emisi GRK, risiko radioaktif dan potensi kerusakan ekosistem laut akibat aktivitas distribusi batu bara. Selain itu, minimnya pemanfaatan limbah biomassa lokal menyebabkan peluang energi terbarukan belum terkelola secara optimal. Melalui tahapan *root definition* dan analisis CATWOE, dirumuskan bahwa transformasi yang diperlukan adalah mengalihkan sebagian bahan baku batu bara menuju biomassa terbarukan seperti cangkang sawit, limbah tebu dan residu industri kayu. Transformasi ini

melibatkan berbagai aktor seperti pemerintah, PLN, dinas terkait, pemasok biomassa dan masyarakat penghasil limbah, dengan tujuan meningkatkan keberlanjutan sekaligus menekan dampak lingkungan jangka panjang.

Model konseptual yang dihasilkan menunjukkan bahwa substitusi batu bara dengan biomassa tidak hanya *feasible* secara teknis, tetapi juga memberikan manfaat sosial-ekonomi bagi masyarakat sekitar, terutama petani dan industri kecil penghasil limbah padat biomassa. Melalui proses perbandingan antara model dan kondisi aktual (*debating*), ditemukan beberapa celah yang perlu diperkuat antara lain minimnya perusahaan pengolah biomassa, belum adanya kebijakan detail yang mengatur skema co-firing, serta kurangnya sosialisasi kepada masyarakat. Rekomendasi perbaikan mencakup penyusunan kebijakan jangka panjang penggunaan EBT di PLTU, pembangunan rantai pasok biomassa yang lebih terstruktur, serta peningkatan edukasi kepada masyarakat mengenai nilai ekonomi limbah biomassa. Implementasi bertahap terhadap perubahan ini diharapkan mampu mengurangi ketergantungan pada batu bara, menekan dampak lingkungan, serta mendukung target transisi energi nasional yang lebih bersih dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Soft System Methodology* (SSM) untuk menganalisis permasalahan kompleks dalam substitusi bahan baku PLTU batu bara menuju energi baru terbarukan berbasis biomassa. Melalui tujuh tahapan SSM, diperoleh gambaran bahwa penggunaan batu bara menimbulkan tantangan besar terhadap keberlanjutan, baik dari sisi lingkungan, sosial, maupun ekonomi. Masyarakat sekitar PLTU, pemilik industri kayu, petani tebu dan pendodol kelapa sawit memahami bahwa limbah padat yang mereka hasilkan memiliki potensi sebagai sumber energi alternatif.

Hasil analisis CATWOE dan model konseptual menunjukkan bahwa terdapat peluang kuat untuk memanfaatkan limbah padat kelapa sawit, pelet kayu dan arang briket sebagai bahan baku substitusi batu bara dengan dukungan pemerintah dan instansi terkait seperti Dinas Lingkungan Hidup, ESDM dan PLN. Selain menghasilkan potensi energi yang memadai, substitusi biomassa ini mampu memberikan nilai tambah ekonomi bagi masyarakat dan mengurangi dampak negatif PLTU batu bara.

REFERENSI

- [1] T. A. W. Sabubu, "Pengaturan Pembangkit Listrik Tenaga Uap Batu bara Di Indonesia Prespektif Hak Atas Lingkungan Yang Baik Dan Sehat," vol. 5, no. 1, pp. 72–90, 2020. <https://doi.org/10.20885/JLR.vol5.iss1.art5>.
- [2] W. H. R. Barus and I. K. Sriwana, "Pemilihan Energi Baru Terbarukan Sebagai Substitusi Bahan Baku Pltu Batu bara Di Provinsi Sumatera Utara Menggunakan Metode Fuzzy Analytical Hierarchy Process (F-AHP)," *J. Ilm. Tek. Ind.*, vol. 10, no. 2, pp. 118–129, 2022. DOI: <https://doi.org/10.24912/jitiuntar.v10i2.16184>.
- [3] M. Triani, F. Tanbar, N. Cahyo, R. Sitanggang, and D. Sumiarsa, "The Potential Implementation of Biomass Co-firing with Coal in Power Plant on Emission and Economic Aspects : A Review," vol. 3, no. 2, pp. 83–94, doi: 10.20885/EKSAKTA.vol3.iss. <https://journal.uin.ac.id/Eksakta/article/view/25105>.
- [4] C. Yosiana, *Legal Aspects in the Regulation of Environmental Approval for Co-Firing Biomass Energy Projects in Indonesia*. Atlantis Press SARL, 2024. doi: 10.2991/978-2-38476-218-7.
- [5] M. F. Praevia, "Analisis Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Cofiring pada PLTU Batu bara," vol. 3, no. 1, pp. 28–37, 2025, doi: 10.14710/jebt.2022.13367.
- [6] Y. N. Irbah, T. H. Nufus, and N. Hidayati, "Analisis Nilai Kalori dan Laju Pembakaran Briket Campuran Cangkang Nyamplung dan Tempurung Kelapa," pp. 689–694, 2022. <https://prosiding.pnj.ac.id/index.php/sntm/article/view/96>.
- [7] P. Ambrosius and R. A. Wicaksono, "Briket Janjang Kosong Kelapa Sawit Sebagai Energi Alternatif Pembangkit Listrik Tenaga Uap," vol. 3, no. 2, pp. 15–20, 2022. <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jtm/article/view/55713>.
- [8] M. Yanti and N. Razan, "Analisis Pustaka: Hubungan Logistik, Energi, dan Kebijakan Maritim," *J. Cakrawala Bahari*, vol. x, no. x, pp. 1–12, 2025. DOI: <https://doi.org/10.70031/jkb.v8i2.170>.
- [9] Y. C. Dwiaji, "Analisis Pengaruh Co-Firing Biomassa Terhadap Kinerja Peralatan Boiler PLTU Batu bara Unit 1 PT . XYZ," *J. Appl. Mech.*, vol. 3, no. 1, pp. 7–15, 2023. <https://doi.org/10.52158/jamere.v3i1.445>.

- [10] J. Kuncara, S. Jamilatun, A. V. Febriani, M. Idris, and M. Setyawan, "Potensi dan Tantangan Pemanfaatan Refuse Derived Fuel dalam Co-Firing PLTU di Indonesia: A Review," no. November, pp. 208–220, 2024. https://www.researchgate.net/publication/389289158_Potensi_dan_Tantangan_Pemanfaatan_Refuse_Derived_Fuel_dalam_Co-Firing_PLTU_di_Indonesia_A_Review.
- [11] D. G. Saputri and I. K. Sriwana, "Analisis Kebutuhan Sistem Monitoring untuk Perbaikan Proses Bisnis dengan Soft System Methodology (SSM) pada UMKM Ibumanis Coklat," no. 3, pp. 1–16, 2024. DOI: <https://doi.org/10.47134/jtsi.v1i3.2578>.
- [12] A. Zuniawan and I. K. Sriwana, "Handling Of Coal Dust At Coal Handling Facility In Coal Power Plant Using Soft System Methodology (SSM) Approach," vol. 23, no. 3, pp. 223–232, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.22441/sinergi.2019.3.006>.
- [13] D. Rimantho, "Soft System Methodology Approach : Case Study of Renewable Energy Development of Wood Pellets as an Implementation of a Circular Economy," *J. Asimetrik J. Ilm. Rekayasa Dan Inov.*, vol. 6, pp. 165–174, 2024. <https://doi.org/10.35814/asiimetrik.v6i1.5958>.
- [14] T. T. D. Susanto, L. Lusiana, R. Trimiltin, and M. Runiasih, "Penerapan Soft Systems Methodology (SSM) Dalam Penyelesaian Masalah Kompleks Di Lembaga," vol. 10, no. 2, pp. 462–475, 2025. DOI: <https://doi.org/10.34125/jmp.v10i2.475>.
- [15] M. Zarezadeh, "Applying Soft Systems Methodology to Implement Strategy in the Organization : A Case Study of Improving the Motivation System of Statistic Center," pp. 85–105, 2024, doi: 10.22067/JSTINP.2024.86313.1087.
- [16] R. E. Mauboy *et al.*, "Information Systems Using Soft System Methodology At Bpd East Nusa Tenggara," vol. 3, no. 6, pp. 1783–1790, 2022. DOI: <https://doi.org/10.20884/1.jutif.2022.3.6.634>.
- [17] J. Firmansyah, H. Saputra, and Ibrahim, "Analyzing the Perceptions and Expectations of Students Towards Science Using Soft System Methodology Juli," *J. Pendidik. Progresif*, vol. 14, no. 01, pp. 451–467, 2024, doi: 10.23960/jpp.v14.i1.202433.
- [18] A. Nuryanto, "Aplikasi Soft System Methodology (SSM) Untuk Pengembangan Strategi Pemberantasan Dalam Pandemi Covid-19 di Selandia Baru," vol. 13, no. 1, pp. 59–70, 2021. <https://doi.org/10.20473/jap.v13i1.29356>
- [19] Sansuadi, N. Mazidah, and E. Nurcahyanto, "Statistik Ketenagalistrikan 2024," no. 38, 2025, [Online]. Available: https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/91fa8-buku-statistik-ketenagalistrikan-2024.pdf
- [20] M. Veranita and H. Hatimatunnisani, "Kualitas Pelayanan Publik Pengaruhnya Terhadap Kepuasan Pelanggan PT. PLN (Persero) Rayon Bandung Selatan Mira," *J. E-Bis*, vol. 5, no. 1, pp. 249–259, 2021. <https://doi.org/10.37339/e-bis.v5i1.580>.
- [21] I. R. I. for Decarbonization, "Mengenal Net-Zero Emission," 2021, [Online]. Available: https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/91fa8-buku-statistik-ketenagalistrikan-2024.pdf
- [22] M. H. Azis and A. Nurwaskito, "Identifikasi Bahaya Dan Pengendalian Risiko Sebagai Upaya Mencegah Dan Mengurangi Risiko Kecelakaan Kerja Pada Tambang Batu bara Provinsi Kalimantan Timur," vol. 1, no. 1, pp. 8–12, 2023, doi: 10.58227/jmi.v1i1.33.