

Penilaian Kinerja Pemasok Biomassa untuk Pembangkit Listrik Tenaga Batubara Menggunakan Pendekatan Pengambilan Keputusan Multi-Kriteria

Andy Tri Hermawan*, Maria Anityasari

Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

Email: andy3hermawan@gmail.com*, maria@ie.its.ac.id

Keywords:

Biomass;
co-firing;
supplier evaluation;
Fuzzy AHP;
TOPSIS.

Abstract

The energy transition toward a low-carbon system is driving the utilization of biomass as an alternative fuel through co-firing schemes in coal-fired power plants. The successful implementation of this strategy relies heavily on the performance of biomass suppliers capable of ensuring supply continuity, raw material quality, cost efficiency, and environmental sustainability. This study aims to develop a comprehensive and systematic biomass supplier performance evaluation framework to support multidimensional decision-making in biomass supply chain management—based on cost, quality, supply reliability, and environmental criteria—and to generate supplier assessments that facilitate decision-making. The methodology combines Multi-Criteria Decision Making (MCDM) approaches: Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP) to determine criterion weights, and the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) to evaluate and rank 124 biomass suppliers for the PLN Group. The results indicate that cost is the criterion with the highest weight (0.3287), followed by supply reliability (0.2854), quality (0.2767), and environment (0.1092), while the biomass selling price emerged as the sub-criterion with the highest global weight (0.2607). TOPSIS results reveal varying levels of relative performance among suppliers, with relative closeness (Ci) values ranging from 0.168 to 0.855 (average 0.788). The framework developed through the integration of Fuzzy AHP and TOPSIS serves as a systematic approach to supplier performance evaluation, simultaneously considering multiple performance dimensions. The findings can be utilized as a decision-support tool for monitoring supplier performance and identifying priorities for performance improvement.

Kata Kunci:

Biomassa;
co-firing;
evaluasi pemasok;
Fuzzy AHP;
TOPSIS.

Abstrak

Transisi energi menuju sistem rendah karbon mendorong pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar alternatif melalui skema co-firing pada pembangkit listrik tenaga batubara. Keberhasilan implementasi strategi ini sangat bergantung pada kinerja pemasok biomassa yang mampu menjamin kontinuitas pasokan, kualitas bahan baku, efisiensi biaya, serta aspek keberlanjutan lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan kerangka kerja evaluasi kinerja pemasok biomassa yang komprehensif dan sistematis sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan rantai pasok biomassa secara multidimensional berdasarkan kriteria biaya, kualitas, keandalan pasokan, dan lingkungan, serta menghasilkan penilaian pemasok sebagai dasar pendukung pengambilan keputusan. Metodologi yang digunakan mengombinasikan pendekatan Multi-Criteria Decision Making (MCDM), yaitu Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP) untuk menentukan bobot kriteria dan

Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) untuk melakukan evaluasi dan pemeringkatan 124 pemasok biomassa PLN Grup. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biaya merupakan kriteria dengan bobot tertinggi (0,3287), diikuti keandalan pasokan (0,2854), kualitas (0,2767), dan lingkungan (0,1092), sedangkan harga jual biomassa menjadi subkriteria dengan bobot global tertinggi (0,2607). Hasil TOPSIS menunjukkan adanya perbedaan tingkat kinerja relatif antar pemasok, dengan nilai relative closeness (C_i) berkisar antara 0,168 hingga 0,855 (rata-rata 0,788). Kerangka kerja yang dikembangkan dari integrasi Fuzzy AHP–TOPSIS dapat digunakan sebagai pendekatan sistematis untuk supplier performance evaluation dengan mempertimbangkan berbagai dimensi kinerja secara simultan. Hasil penelitian dapat dimanfaatkan sebagai decision-support tool untuk supplier performance monitoring dan identifikasi prioritas perbaikan kinerja pemasok.

PENDAHULUAN

Perubahan paradigma energi global menuju sistem energi rendah karbon mendorong peningkatan pemanfaatan energi terbarukan sekaligus menurunkan emisi dari sektor ketenagalistrikan (Kabeyi & Olanrewaju, 2022). Biomassa menjadi salah satu sumber energi yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar pendamping pada pembangkit listrik berbahan bakar batubara melalui teknologi co-firing, yaitu pencampuran bahan baku biomassa dengan batubara untuk digunakan pada coal-fired boiler dalam pembangkitan listrik (Squire et al., 2024). Pemanfaatan biomassa melalui co-firing memungkinkan pembangkit listrik berbahan bakar batubara memanfaatkan biomassa sebagai bahan bakar pendamping tanpa menggantikan seluruh infrastruktur pembangkit yang telah tersedia, sehingga mendukung diversifikasi bahan bakar dan pencapaian target bauran energi rendah karbon (Ahmad & Wilkins, 2025). Namun, peningkatan pemanfaatan biomassa juga menimbulkan kebutuhan baru terhadap rantai pasok penyediaan bahan bakar yang mampu menjamin ketersediaan biomassa secara berkelanjutan.

Indonesia memiliki potensi biomassa yang sangat besar untuk mendukung agenda transisi energi. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) mencatat bahwa Indonesia memiliki potensi biomassa yang signifikan, mencapai sekitar 50 GW apabila pengembangannya dilakukan secara maksimal. Total produksi biomassa nasional mencapai sekitar 146,7 juta ton per tahun, dengan nilai energi setara 470 GJ, di mana residu pertanian memberikan kontribusi terbesar (sekitar 150 GJ per tahun), diikuti kayu karet (sekitar 120 GJ per tahun). Distribusi potensi tersebut menegaskan bahwa biomassa memiliki peran strategis sebagai sumber energi terbarukan untuk mendukung agenda dekarbonisasi nasional sekaligus mempercepat transisi energi yang berkelanjutan (Yana et al., 2022).

Keberlanjutan rantai pasok biomassa sangat dipengaruhi oleh desain jaringan pasokan dan pengelolaan ketidakpastian yang muncul akibat adanya variasi permintaan yang tidak terduga, fluktuasi harga bahan baku, dan perubahan ketersediaan biomassa dari waktu ke waktu (Gerogiannis & Kazantzi, 2012). (Andersson et al., 2002) menekankan bahwa keberadaan fasilitas penyimpanan biomassa dapat mengurangi ketergantungan pada faktor musiman, sementara pendekatan lain untuk mengatasi permasalahan musiman dalam kebutuhan pasokan biomassa adalah melalui pengadaan dari berbagai pemasok (Toka et al., 2010). Kemitraan dengan pemasok perlu diintegrasikan ke dalam perencanaan jangka panjang untuk menghadapi ketidakpastian lingkungan dan menjaga kesinambungan pasokan bioenergy (Nguyen & Chen,

2018). Meskipun biomassa pada dasarnya merupakan bahan baku murah, biaya yang terkait dengan transportasi, penyimpanan, dan prapengolahan dapat meningkatkan total biaya secara signifikan, sehingga keberhasilan pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar co-firing tidak hanya bergantung pada ketersediaan potensi biomassa, tetapi juga pada kemampuan rantai pasok dalam menyediakan biomassa dengan kuantitas, kualitas, biaya, dan waktu pengiriman yang sesuai.

Dalam rantai pasok tersebut, pemasok memiliki peran strategis karena menjadi pihak yang secara langsung menentukan kemampuan penyediaan biomassa sesuai kebutuhan pembangkit. Kinerja pemasok tidak hanya ditentukan oleh harga, tetapi juga oleh kemampuan memenuhi kuantitas kontraktual, menjaga kualitas biomassa, memenuhi jadwal pengiriman, serta memenuhi persyaratan lingkungan dan keberlanjutan, sehingga evaluasi kinerja pemasok biomassa perlu mempertimbangkan berbagai dimensi secara simultan. Penelitian Minahan dan Vigoroso (2002) menunjukkan bahwa implementasi evaluasi kinerja pemasok berpotensi meningkatkan kinerja pemasok secara keseluruhan sebesar 26,6%, tidak hanya berguna untuk kebutuhan internal perusahaan tetapi juga bermanfaat dalam pengembangan kinerja pemasok dan penentuan kelanjutan kerja sama di masa mendatang.

Saat ini, tercatat 47 unit pembangkit listrik di Indonesia yang telah menerapkan co-firing dengan memanfaatkan limbah pertanian maupun industri, dan proyeksi ke depan menunjukkan bahwa sekitar 50% pasokan biomassa diperkirakan akan bersumber dari hutan tanaman energi (energy plantation forests/EPF) yang ditanam secara khusus untuk mendukung co-firing (Squire et al., 2024). Penyediaan pasokan biomassa untuk pembangkit listrik tenaga batubara milik PLN Grup mencakup penyediaan biomassa berskala besar, pengembangan ekosistem biomassa, optimalisasi sumber daya biomassa lokal, dan penyiapan sistem untuk keberlanjutan pasokan biomassa. Realisasi pasokan biomassa PLN Grup selama tahun 2025 mencapai 2,353 juta ton, disuplai dari 124 pemasok biomassa yang berasal dari berbagai daerah dan melibatkan jaringan petani, koperasi, BUMDes, UMKM, hingga perusahaan swasta, memenuhi 78,43% dari target RKAP Triwulan IV tahun 2025 sebesar 3 juta ton. Pengelolaan pemasok biomassa dalam jumlah relatif banyak dengan karakteristik yang beragam menyebabkan evaluasi kinerja pemasok menjadi semakin kompleks, karena setiap pemasok dapat memiliki keunggulan dan kelemahan berbeda pada aspek biaya, kualitas, keandalan pasokan, maupun lingkungan; apabila evaluasi hanya didasarkan pada satu indikator, pemasok yang unggul pada satu aspek belum tentu memiliki kinerja keseluruhan yang optimal.

Sejak awal 1970-an, pendekatan Multi-Criteria Decision Making (MCDM) telah dikembangkan untuk membantu proses pengambilan keputusan (Gocer & Sener, 2022), dengan berbagai metode seperti Analytic Hierarchy Process (AHP) oleh (Saaty, 1980), Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) oleh (Hwang & Yoon, 1981), hingga metode-metode lain seperti TODIM, MOORA, dan VIKOR. Sebagian besar metode MCDM konvensional masih menggunakan himpunan crisp yang memiliki keterbatasan dalam menghadapi permasalahan nyata yang sarat ketidakpastian; sejak diperkenalkannya konsep fuzzy logic oleh Zadeh pada tahun 1965, pernyataan-pernyataan linguistik mulai dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah melalui mekanisme gradasi fuzzy sets (Göçer, 2022). Sejumlah penelitian telah menerapkan pendekatan MCDM dalam pemilihan dan evaluasi pemasok, termasuk AHP, Fuzzy AHP, TOPSIS, dan Fuzzy TOPSIS, namun penerapan integrasi Fuzzy AHP dan TOPSIS secara spesifik untuk evaluasi kinerja pemasok biomassa

sebagai bahan bakar co-firing masih memiliki ruang untuk dikembangkan, terutama dalam konteks yang mempertimbangkan dimensi biaya, kualitas, keandalan pasokan, dan lingkungan secara bersamaan.

Dengan demikian, kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka evaluasi kinerja pemasok biomassa yang mengintegrasikan Fuzzy AHP dan TOPSIS secara simultan dengan mempertimbangkan dimensi biaya, kualitas, keandalan pasokan, dan lingkungan pada konteks rantai pasok biomassa untuk co-firing PLTU batubara di Indonesia, dengan objek evaluasi mencakup 124 pemasok biomassa PLN Grup yang memiliki karakteristik beragam dan tersebar di berbagai daerah, yang belum pernah dilakukan pada skala dan kompleksitas demikian dalam penelitian sebelumnya. Melalui penelitian ini, disusun skema evaluasi kinerja pemasok biomassa untuk pembangkit listrik tenaga batubara menggunakan kombinasi Fuzzy AHP untuk menentukan bobot prioritas kriteria dengan mengakomodasi ketidakpastian dalam penilaian pakar, dan TOPSIS untuk menentukan peringkat pemasok berdasarkan kedekatannya terhadap solusi ideal (Sa'abun et al., 2020).

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus pada permasalahan terkait proses evaluasi kinerja alternatif pemasok biomassa untuk mendukung program co-firing pada Pembangkit Listrik Tenaga Batubara. Permasalahan utama yang dikaji meliputi penentuan kriteria evaluasi alternatif pemasok biomassa beserta pembobotan setiap kriteria yang digunakan, pengembangan kerangka kerja untuk mengevaluasi kinerja pemasok biomassa, serta penerapan kerangka kerja tersebut dalam proses evaluasi kinerja pemasok pada Pembangkit Listrik Tenaga Batubara. Sejalan dengan rumusan masalah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menentukan kriteria evaluasi alternatif pemasok biomassa beserta bobot masing-masing kriteria, mengembangkan kerangka kerja evaluasi kinerja pemasok biomassa, serta menerapkan kerangka kerja tersebut untuk menilai kinerja pemasok biomassa secara sistematis dan objektif. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pendekatan evaluasi yang lebih komprehensif dalam mendukung pengambilan keputusan terkait pemilihan dan pengelolaan pemasok biomassa.

METODE PENELITIAN

Diagram Alir dan Tahapan Penelitian

Penelitian dilakukan secara sistematis melalui beberapa tahapan utama, dari pengumpulan informasi terkait permasalahan perusahaan hingga penentuan rencana implementasi dari rekomendasi yang dihasilkan. Secara umum, penelitian ini terbagi menjadi dua tahap besar: (1) pengembangan model Fuzzy AHP untuk memperoleh bobot kriteria dan sub-kriteria penilaian kinerja pemasok biomassa, dan (2) perancangan mekanisme penilaian kinerja pemasok menggunakan metode TOPSIS berdasarkan bobot yang telah diperoleh. Tahapan penelitian secara ringkas disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tahapan Penelitian

Tahap	Kegiatan
1. Identifikasi masalah	Kajian literatur mengenai co-firing, rantai pasok biomassa, dan evaluasi kinerja pemasok; perumusan masalah, tujuan, dan ruang lingkup penelitian.

2. Pengembangan kriteria	Penyusunan struktur hierarki kriteria dan sub-kriteria berdasarkan studi literatur (Gerogiannis et al., 2012; Lu et al., 2019), divalidasi melalui focus group discussion (FGD) bersama para ahli perusahaan.
3. Konfirmasi key person	Konfirmasi enam key person sebagai pengambil keputusan dalam perbandingan berpasangan Fuzzy AHP.
4. Perbandingan berpasangan	Penyusunan matriks perbandingan berpasangan fuzzy oleh key person, pengukuran indeks konsistensi (CR), dan revisi penilaian bila CR melebihi 0,10.
5. Pembobotan Fuzzy AHP	Agregasi matriks (fuzzy geometric mean), de-fuzzifikasi (Center of Area), dan normalisasi bobot kriteria serta sub-kriteria.
6. Perancangan scorecard	Penyusunan supplier performance scorecard berdasarkan sub-kriteria terbobot beserta data historis kinerja pemasok periode Januari–Desember 2025.
7. Perangkingan TOPSIS	Normalisasi matriks keputusan, pembobotan matriks, penentuan solusi ideal positif dan negatif, perhitungan relative closeness (Ci), dan pemeringkatan 124 pemasok biomassa.
8. Analisis dan rekomendasi	Analisis hasil pembobotan dan pemeringkatan, penyusunan kesimpulan serta implikasi manajerial.

Sumber: Diolah oleh peneliti, 2026.

Pengembangan Kriteria dan Sub-kriteria

Berdasarkan studi literatur, ditetapkan empat kriteria utama penilaian kinerja pemasok biomassa, yaitu Biaya, Kualitas, Keandalan, dan Lingkungan, yang kemudian diturunkan menjadi sepuluh sub-kriteria melalui proses FGD bersama pegawai PT PLN Energi Primer Indonesia (PLN EPI). Pada kriteria kualitas, sub-kriteria rasio produk yang ditolak digantikan oleh frekuensi terjadinya rejection dan ditambahkan impuritas (pengotor) bahan bakar; pada kriteria lingkungan, sub-kriteria pengurangan emisi karbon per unit bahan bakar dan green certification digantikan oleh sertifikasi keberlanjutan dan ketertelusuran (traceability), yang dinilai lebih relevan dengan karakteristik pengadaan biomassa di perusahaan. Struktur kriteria dan sub-kriteria final disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Struktur Kriteria dan Sub-kriteria Penilaian Kinerja Pemasok Biomassa

Kriteria	Sub-kriteria	Kode	Deskripsi Singkat
Biaya	Harga Jual Biomassa	HJB	Harga kesepakatan kontrak untuk penjualan biomassa (Rp/ton/kalori, skema free on board).
	Biaya Transportasi	BTR	Biaya pengangkutan biomassa dari fasilitas pemasok ke fasilitas pelanggan (Rp/ton).
Kualitas	Calorific Value	CLV	Kapasitas termogenik bahan bakar biomassa (kcal/kg).
	Impuritas Bahan Bakar	IBB	Kandungan material asing/kontaminan dalam biomassa yang dapat menurunkan kualitas pembakaran.
	Frekuensi Rejection	FTR	Frekuensi biomassa yang dikirim tidak memenuhi spesifikasi teknis sehingga ditolak/dikenakan penalti.
Keandalan	Kuantitas Sesuai Kontrak	KSK	Kesesuaian kuantitas biomassa yang dipasok dengan kuantitas yang disepakati dalam kontrak.

Lingkungan	Jaminan Penyediaan (JPB)	JPB	Jaminan pemasok dalam menyediakan biomassa sesuai kontrak.
	Pengiriman Sesuai Jadwal	PSJ	Ketepatan waktu pengiriman biomassa sesuai jadwal konfirmasi.
	Sertifikasi Keberlanjutan	SKB	Pengakuan resmi lembaga independen atas pemenuhan standar keberlanjutan lingkungan, sosial, dan tata kelola.
	Ketertelusuran (Traceability)	TRC	Kemampuan menelusuri asal-usul dan riwayat biomassa sepanjang rantai pasok.

Sumber: Diadaptasi dari Gerogiannis et al. (2012) dan Lu et al. (2019), divalidasi melalui FGD, 2026.

Key Person dan Pengumpulan Data

Proses perbandingan berpasangan Fuzzy AHP dilakukan oleh enam key person yang mewakili berbagai divisi yang terlibat langsung dalam penyediaan biomassa ke pembangkit, dengan pengalaman minimal lima tahun, sebagaimana disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Profil Key Person

Kode	Jabatan	Divisi	Pengalaman (tahun)
KP1	Vice President	Strategi dan Pengembangan Bisnis Biomassa	10
KP2	Vice President	Produksi dan Rantai Pasok Biomassa	13
KP3	Manager	Pemasaran Biomassa	7
KP4	Manager	Pengendalian dan Administrasi Kontrak Biomassa	7
KP5	Manager	Rantai Pasok dan Settlement Biomassa	5
KP6	Manager	Koordinator Operasi dan Stakeholder Biomassa	5

Sumber: Data primer, diolah 2026.

Data kinerja aktual 124 pemasok biomassa PLN Grup dikumpulkan untuk periode Januari–Desember 2025 sebagai input matriks keputusan TOPSIS, mencakup nilai pada seluruh sepuluh sub-kriteria yang telah dibobotkan.

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui dua tahap utama. Pertama, pembobotan kriteria dan sub-kriteria menggunakan Fuzzy AHP: penilaian linguistik key person dikonversi ke Triangular Fuzzy Numbers, diuji konsistensinya ($CR \leq 0,10$), diagregasi menggunakan fuzzy geometric mean, di-de-fuzzifikasi menggunakan metode Center of Area (COA), lalu dinormalisasi sehingga total bobot kriteria dan sub-kriteria bernilai satu. Kedua, pemeringkatan pemasok menggunakan TOPSIS: data kinerja pemasok dikonversi menjadi data kuantitatif dan dinormalisasi, dibobotkan berdasarkan hasil Fuzzy AHP, dihitung jaraknya terhadap solusi ideal positif (A^+) dan solusi ideal negatif (A^-), kemudian dihitung nilai relative closeness ($C_i = S^- / (S^+ + S^-)$) sebagai dasar pemeringkatan (Lai et al., 1994).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembobotan Kriteria dan Sub-kriteria

Salah satu tantangan yang ditemukan selama proses pembobotan adalah diperolehnya nilai Consistency Ratio (CR) yang melebihi batas toleransi 0,10 pada beberapa matriks perbandingan berpasangan, mengindikasikan bahwa penilaian yang diberikan responden belum sepenuhnya konsisten—kondisi yang umum dijumpai dalam AHP maupun Fuzzy AHP karena penilaian sangat bergantung pada persepsi subjektif key person. Penggunaan Fuzzy AHP tidak secara otomatis menghilangkan inkonsistensi tersebut, karena apabila matriks perbandingan dasar telah mengandung inkonsistensi tinggi, hasil agregasi fuzzy tetap dapat menghasilkan bobot yang kurang optimal. Ketidakkonsistenan dalam penelitian ini turut dipengaruhi oleh metode agregasi arithmetic mean yang digunakan untuk menggabungkan penilaian enam key person, yang tidak mempertahankan sifat resiprokal matriks sebagaimana metode geometric mean yang direkomendasikan Saaty (1980) dan Buckley (1985). Untuk mengatasi hal ini, dilakukan evaluasi ulang terhadap matriks dengan CR di atas ambang batas, dengan meminta responden meninjau kembali penilaian pada pasangan kriteria yang paling berpotensi menyebabkan inkonsistensi, mengikuti prosedur identifikasi ε_{ij} yang diusulkan Saaty (2003), hingga diperoleh tingkat konsistensi yang dapat diterima.

Hasil rekapitulasi pembobotan kriteria dan sub-kriteria menggunakan Fuzzy AHP disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Pembobotan Kriteria dan Sub-kriteria

Kriteria	Bobot Kriteria	Sub-kriteria	Bobot Lokal	Bobot Global	Peringkat Global
Biaya	0,3287	Harga Jual Biomassa	0,7930	0,2607	1
		Biaya Transportasi	0,2070	0,0680	9
Kualitas	0,2767	Calorific Value	0,4472	0,1237	3
		Impuritas Bahan Bakar	0,2544	0,0704	7
		Frekuensi Rejection	0,2985	0,0826	4
Keandalan	0,2854	Kuantitas Sesuai Kontrak	0,4611	0,1316	2
		Jaminan Penyediaan (JPB)	0,2653	0,0757	6
		Pengiriman Sesuai Jadwal	0,2737	0,0781	5
Lingkungan	0,1092	Sertifikasi Keberlanjutan	0,3715	0,0406	10
		Ketertelusuran (Traceability)	0,6285	0,0686	8

Sumber: Hasil pengolahan Fuzzy AHP, 2026.

Hasil pembobotan menunjukkan bahwa harga jual biomassa merupakan sub-kriteria dengan bobot tertinggi (0,2607), mengindikasikan bahwa aspek ekonomi masih menjadi pertimbangan utama dalam evaluasi pemasok biomassa. Kondisi ini sejalan dengan tantangan ekonomi implementasi co-firing biomassa, terutama tingginya biaya rantai pasok mulai dari pengumpulan, pengolahan, penyimpanan, hingga distribusi ke lokasi PLTU. Biomassa umumnya memiliki nilai kalor (Gross Calorific Value) yang lebih rendah dibandingkan batubara sehingga diperlukan volume yang lebih besar untuk menghasilkan energi setara, ditambah tingginya permintaan biomassa dari sektor industri lain seperti oleokimia, makanan, pakan ternak, dan kosmetik yang memicu persaingan bahan baku dan mendongkrak harga pasar.

Keandalan pasokan memperoleh bobot kriteria kedua terbesar setelah biaya (0,2854), menunjukkan bahwa kontinuitas dan kepastian pasokan merupakan faktor strategis dalam penyediaan biomassa untuk pembangkit listrik, karena keberhasilan implementasi co-firing tidak hanya ditentukan oleh ketersediaan potensi biomassa secara agregat, tetapi juga oleh kemampuan rantai pasok dalam menyediakan biomassa secara konsisten, tepat waktu, dan sesuai kebutuhan pembangkit. Sebaliknya, sub-kriteria sertifikasi keberlanjutan memperoleh bobot terendah (0,0406), mengindikasikan bahwa dalam konteks pengadaan biomassa untuk co-firing PLTU, aspek ekonomi dan keandalan pasokan masih menjadi prioritas utama dibandingkan aspek lingkungan—kondisi yang dapat dijelaskan oleh tahap pengembangan industri biomassa Indonesia yang masih berfokus pada pemenuhan kebutuhan pasokan, stabilitas harga, dan kontinuitas distribusi, serta oleh dominasi pemasok berskala kecil dan menengah yang umumnya memiliki keterbatasan dalam memenuhi persyaratan administratif, pembiayaan, dan proses sertifikasi keberlanjutan. Hasil ini tidak menunjukkan bahwa sertifikasi keberlanjutan tidak penting, melainkan mengindikasikan bahwa pada kondisi industri saat ini, para pengambil keputusan masih memberikan prioritas lebih besar pada aspek ekonomi dan operasional.

Dibandingkan dengan penelitian Lu et al. (2019) pada industri biomassa jerami di Tiongkok, penelitian ini menunjukkan perbedaan urutan prioritas kriteria. Meskipun kriteria biaya tetap memperoleh bobot tertinggi dan kriteria lingkungan memperoleh bobot terendah pada kedua penelitian, penelitian ini menempatkan keandalan pasokan pada urutan kedua, lebih tinggi dibandingkan kualitas biomassa. Kondisi ini dapat dijelaskan oleh karakteristik rantai pasok biomassa Indonesia yang memiliki tingkat ketidakpastian tinggi akibat ketersediaan bahan baku yang bersifat musiman, lokasi sumber biomassa yang tersebar, serta risiko gangguan selama pengumpulan, penyimpanan, dan distribusi (Liu et al., 2017). Dalam operasional co-firing, variasi kualitas biomassa masih dapat dikendalikan melalui proses handling di stockpile dan blending dengan batubara, sedangkan gangguan pasokan berpotensi langsung menghambat pencapaian target pemanfaatan biomassa, sehingga para pengambil keputusan cenderung memberikan prioritas lebih tinggi pada keandalan pasokan.

Pemeringkatan Kinerja Pemasok Biomassa dengan TOPSIS

Salah satu tantangan utama dalam penelitian ini adalah belum tersedianya mekanisme penilaian kinerja pemasok biomassa yang terstandarisasi di perusahaan; meskipun perusahaan telah memiliki proses evaluasi pemasok, belum terdapat supplier scorecard yang secara khusus dirancang untuk mengukur kinerja pemasok biomassa secara komprehensif. Untuk mengatasi keterbatasan ini, penelitian menggunakan indikator yang dikembangkan Prihartono et al. (2026) sebagai acuan awal penyusunan supplier performance scorecard, yang kemudian divalidasi bersama eksekutif senior dan disempurnakan menjadi ukuran kuantitatif dan terukur sesuai karakteristik operasional pengadaan biomassa, guna mendukung normalisasi dan pemeringkatan yang akurat dalam TOPSIS.

Berdasarkan matriks keputusan yang telah dinormalisasi dan dibobotkan, dihitung jarak setiap pemasok terhadap solusi ideal positif dan negatif, kemudian nilai relative closeness (Ci) dari 124 pemasok biomassa PLN Grup diperingkatkan dari nilai tertinggi ke terendah. Nilai Ci berkisar antara 0,168 hingga 0,855, dengan rata-rata 0,788, menunjukkan adanya perbedaan tingkat kinerja relatif yang cukup bervariasi antar pemasok berdasarkan keseluruhan kriteria

yang dipertimbangkan. Sepuluh pemasok dengan peringkat tertinggi dan lima pemasok dengan peringkat terendah disajikan pada Tabel 5 sebagai ilustrasi hasil pemeringkatan; identitas pemasok dianonimkan menjadi kode PT A, PT B, dan seterusnya untuk menjaga kerahasiaan data perusahaan.

Tabel 5. Sepuluh Pemasok dengan Peringkat Tertinggi dan Lima Peringkat Terendah

Peringkat	Kode Pemasok	Relative Closeness (Ci)
1	PT DC	0,855
2	PT AW	0,854
3	PT DT	0,853
4	PT BC	0,852
5	PT L	0,847
6	PT CX	0,845
7	PT AV	0,842
8	PT DF	0,841
9	PT CK	0,838
10	PT BX	0,837
120	PT AH	0,720
121	PT BM	0,703
122	PT BY	0,702
123	PT E	0,658
124	PT N	0,168

Sumber: Hasil pengolahan TOPSIS terhadap 124 pemasok biomassa PLN Grup, data kinerja Januari–Desember 2025.

Terdapat perbedaan hasil pemeringkatan antara penelitian ini dengan kategori penyedia terbaik dalam pemenuhan kuantitas pasokan biomassa pada tahun 2025 menurut penghargaan internal perusahaan. Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa hasil evaluasi sangat dipengaruhi oleh ruang lingkup dan indikator yang digunakan dalam proses penilaian: penghargaan perusahaan lebih menitikberatkan pada pencapaian indikator operasional tertentu, khususnya kemampuan pemasok dalam memenuhi target kuantitas pasokan, sedangkan penelitian ini menggunakan pendekatan multikriteria yang mempertimbangkan aspek biaya, kualitas, keandalan pasokan, dan lingkungan secara simultan. Dengan Fuzzy AHP–TOPSIS, setiap kriteria diberikan bobot sesuai tingkat kepentingannya sebelum seluruh sub-kriteria dievaluasi secara simultan, sehingga pemasok yang memiliki kinerja terbaik pada satu indikator belum tentu memperoleh nilai preferensi tertinggi apabila terdapat kelemahan pada indikator lain yang memiliki bobot lebih besar. Perbedaan hasil pemeringkatan ini bukan berarti sistem evaluasi perusahaan kurang tepat, melainkan mencerminkan perbedaan tujuan penilaian—sistem penghargaan perusahaan dirancang untuk mengapresiasi pencapaian indikator operasional tertentu, sedangkan model Fuzzy AHP–TOPSIS bertujuan mendukung pengambilan keputusan pemilihan dan evaluasi pemasok secara lebih komprehensif melalui integrasi berbagai aspek kinerja.

Ringkasan Temuan Utama

Berdasarkan analisis penentuan kriteria dan sub-kriteria, pembobotan menggunakan Fuzzy AHP, serta pemeringkatan menggunakan TOPSIS, temuan utama dan kemanfaatannya dirangkum pada Tabel 6.

Tabel 6. Temuan Utama dan Kemanfaatan

No.	Temuan	Penjelasan	Kemanfaatan
1	Harga jual menjadi subkriteria paling dominan	Harga biomassa menjadi faktor paling menentukan dalam preferensi pengambil keputusan.	Perlu penguatan pengendalian dan evaluasi competitiveness harga pemasok.
2	Keandalan pasokan memiliki prioritas tinggi	Kontinuitas dan kepastian pasokan merupakan faktor strategis dalam co-firing.	Evaluasi pemasok tidak cukup hanya berdasarkan harga, tetapi juga kemampuan memenuhi komitmen pasokan.
3	Sustainability certification memiliki bobot relatif rendah	Aspek sustainability belum menjadi faktor dominan dalam keputusan supplier.	Menjadi area yang dapat diperkuat dalam pengembangan sistem evaluasi supplier di masa mendatang.
4	TOPSIS menghasilkan ranking multidimensi	Kinerja supplier merupakan hasil agregasi Cost, Quality, Reliability, dan Environment.	Ranking dapat digunakan sebagai dasar supplier performance monitoring.
5	Ranking TOPSIS berbeda dengan existing assessment	Perbedaan terjadi karena basis dan dimensi evaluasi berbeda.	Fuzzy AHP-TOPSIS dapat menjadi complementary decision-support tool bagi sistem evaluasi yang telah ada.
6	Terdapat perbedaan performa antar supplier	Tidak semua supplier memiliki kekuatan dan kelemahan yang sama.	Hasil dapat digunakan untuk menentukan prioritas evaluasi dan area perbaikan supplier.

Sumber: Diolah oleh peneliti, 2026.

Secara keseluruhan, kerangka evaluasi kinerja pemasok biomassa berbasis Fuzzy AHP–TOPSIS yang dikembangkan dalam penelitian ini tidak hanya menghasilkan bobot prioritas kriteria dan ranking pemasok, tetapi juga menyediakan informasi kinerja multidimensi sebagai dasar supplier performance monitoring dan pengambilan keputusan manajerial dalam pengelolaan rantai pasok biomassa untuk mendukung keberlanjutan implementasi co-firing pada pembangkit listrik tenaga batubara.

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan menentukan kriteria dan mengembangkan kerangka kerja evaluasi kinerja pemasok biomassa untuk Pembangkit Listrik Tenaga Batubara menggunakan integrasi Fuzzy AHP dan TOPSIS. Hasil pembobotan Fuzzy AHP menunjukkan bahwa kriteria Biaya memperoleh bobot tertinggi (0,3287), diikuti Keandalan (0,2854), Kualitas (0,2767), dan Lingkungan (0,1092), dengan Harga Jual Biomassa sebagai subkriteria berbobot global tertinggi (0,2607) dan Sertifikasi Keberlanjutan sebagai subkriteria terendah (0,0406). Berdasarkan kriteria dan subkriteria tersebut, dikembangkan supplier performance scorecard yang memuat indikator, unit, dan rumus skor sebagai kerangka penilaian kinerja pemasok. Penerapan TOPSIS terhadap data kinerja 124 pemasok biomassa periode Januari–Desember 2025 menghasilkan nilai relative closeness berkisar 0,168 hingga 0,855, dengan urutan

peringkat yang berbeda dari sistem penghargaan operasional perusahaan karena perbedaan dimensi dan ruang lingkup penilaian. Temuan ini menegaskan bahwa aspek ekonomi dan keandalan pasokan masih menjadi prioritas utama dibandingkan aspek lingkungan pada tahap perkembangan industri biomassa Indonesia saat ini, sementara pendekatan multikriteria mampu memberikan evaluasi yang lebih komprehensif dibandingkan penilaian berbasis satu indikator. Perusahaan disarankan menggunakan mekanisme pembobotan kriteria yang telah dikembangkan sebagai standar evaluasi pemasok biomassa, mengadaptasi scorecard yang diusulkan sebagai acuan penilaian, serta memanfaatkan profil kinerja per-subkriteria untuk menentukan prioritas perbaikan pemasok secara lebih terarah. Bagi penelitian selanjutnya, disarankan untuk menyempurnakan indikator scorecard agar lebih kuantitatif dan berbasis data historis, mengintegrasikan penilaian risiko pemasok seperti risiko kegagalan pasokan, perubahan harga, cuaca, regulasi, dan keberlanjutan, mengembangkan segmentasi pemasok berdasarkan capability dan willingness, serta mengimplementasikan model penilaian ke dalam Decision Support System yang terintegrasi dengan sistem informasi perusahaan agar proses evaluasi dan pemeringkatan pemasok biomassa dapat dilakukan secara real-time sebagai bagian dari pengambilan keputusan strategis.

REFERENSI

- Ahmad, M., & Wilkins, S. (2025). Purposive sampling in qualitative research: A framework for the entire journey. *Quality & Quantity*, 59(2), 1461–1479.
- Ahmad, N., & Qahmash, A. (2020). Implementing Fuzzy AHP and FUCOM to evaluate critical success factors for sustained academic quality assurance and ABET accreditation. *PLOS ONE*, 15(9), e0239140. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239140>
- Andersson, G., Asikainen, A., Björheden, R., Hall, P. W., Hudson, J. B., Jirjis, R., Mead, D. J., Nurmi, J., & Weetman, G. F. (2002). Production of forest energy. In *Bioenergy from Sustainable Forestry* (pp. 49–123). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/0-306-47519-7_3
- Ansariipour, H., Haeussler, K. L., Ferguson, S. J., & Flohr, M. (2023). Prioritizing biomaterials for spinal disc implants by a fuzzy AHP and TOPSIS decision making method. *Scientific Reports*, 13(1), 21531. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48735-9>
- Bachtiar, N. K., Fariz, M., & Arif, M. S. (2024). Conducting a focus group discussion in qualitative research. *Innovation, Technology, and Entrepreneurship Journal*, 1(2), 94–101. <https://doi.org/10.31603/itej.11466>
- Ballesteros, E., & Romero, C. (1998). Multiple criteria decision making: An introduction. In *Multiple Criteria Decision Making and its Applications to Economic Problems* (pp. 1–10). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2827-9_1
- Behzadian, M., Khanmohammadi Otaghsara, S., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051–13069. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>
- Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 17(3), 233–247. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(85\)90090-9](https://doi.org/10.1016/0165-0114(85)90090-9)
- Chen, A., & Liu, Y. (2023). Designing globalized robust supply chain network for sustainable biomass-based power generation problem. *Journal of Cleaner Production*, 413. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137403>
- Chen, J., & Guo, Z. (2014). Strategic sourcing in the presence of uncertain supply and retail competition. *Production and Operations Management*, 23(10), 1748–1760. <https://doi.org/10.1111/poms.12078>

- Dabbene, F., Gay, P., & Tortia, C. (2014). Traceability issues in food supply chain management: A review. *Biosystems Engineering*, 120, 65–80. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.09.006>
- Dey, P. K., Bhattacharya, A., & Ho, W. (2015). Strategic supplier performance evaluation: A case-based action research of a UK manufacturing organisation. *International Journal of Production Economics*, 166, 192–214. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.09.021>
- Emrouznejad, A., & Ho, W. (2018). *Fuzzy analytic hierarchy process*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Franek, J., & Kresta, A. (2014). Judgment scales and consistency measure in AHP. *Procedia Economics and Finance*, 12, 164–173. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00332-3](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00332-3)
- Frish, S., Talmor, I., Hadar, O., Shoshany, M., & Shapira, A. (2025). Enhancing consistency of AHP-based expert judgements: A new approach and its implementation in an interactive tool. *MethodsX*, 14, 103341. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103341>
- Gerogiannis, V. C., & Kazantzi, V. (2012). Selecting suppliers for biomass supply networks with an IFS-multi periodic optimization method. In *Industrial Engineering and Operations Management Istanbul*.
- Gerogiannis, V. C., Kazantzi, V., & Anthopoulos, L. (2012). A hybrid method for evaluating biomass suppliers—Use of intuitionistic fuzzy sets and multi-periodic optimization. *IFIP AICT*, 381.
- Gital, Y., & Bilgen, B. (2024). Biomass supply chain network design under uncertainty, risk and resilience: A systematic literature review. *Computers and Industrial Engineering*, 193. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110270>
- Giuffrida, L. M., & Rovigatti, G. (2022). Supplier selection and contract enforcement: Evidence from performance bonding. *Journal of Economics & Management Strategy*, 31(4), 980–1019. <https://doi.org/10.1111/jems.12492>
- Gocer, F. (2021). A novel interval value extension of picture fuzzy sets into group decision making: An approach to support supply chain sustainability in catastrophic disruptions. *IEEE Access*, 9, 117080–117096. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3105734>
- Göçer, F. (2022). Limestone supplier selection for coal thermal power plant by applying integrated PF-SAW and PF-EDAS approach. *Soft Computing*, 26(13), 6393–6414. <https://doi.org/10.1007/s00500-022-07157-x>
- Gocer, F., & Sener, N. (2022). Spherical fuzzy extension of AHP-ARAS methods integrated with modified k-means clustering for logistics hub location problem. *Expert Systems*, 39(2). <https://doi.org/10.1111/exsy.12886>
- Govindan, K., Azevedo, S. G., Carvalho, H., & Cruz-Machado, V. (2014). Impact of supply chain management practices on sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 85, 212–225. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.068>
- Govindan, K., Khodaverdi, R., & Jafarian, A. (2013). A fuzzy multi criteria approach for measuring sustainability performance of a supplier based on triple bottom line approach. *Journal of Cleaner Production*, 47, 345–354. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.04.014>
- Huang, F. (2022). Low-carbon supplier selection using fuzzy AHP and goal programming approach. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2022(1). <https://doi.org/10.1155/2022/3115490>
- Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2022). Sustainable energy transition for renewable and low carbon grid electricity generation and supply. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.743114>
- Kementerian ESDM. (2022, August 29). Akselerasi transisi energi, co-firing biomassa di PLTU jadi teknologi pilihan. *Siaran Pers Nomor: 324.Pers/04/SJI/2022*.

- Krishnadevarajan, P. K., Ravichandran, V., Balasubramanian, S., & Kannan, N. (2015). Supplier management: A framework for selection, evaluation and performance. *International Journal of Management*, 6(9), 16–28.
- Kuchler, C., Schön, C., Kuptz, D., Dietz, E., Zimmermann, D., Rist, E., Mack, R., Riebler, M., Blum, U., Borchert, H., & Hartmann, H. (2024). Fuel upgrade and soil contamination effects on wood chip quality and combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 183, 107150. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107150>
- Lai, Y. J., Liu, T. Y., & Hwang, C. L. (1994). TOPSIS for MODM. *European Journal of Operational Research*, 76(3), 486–500. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90282-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90282-8)
- Li, Z., Liu, Y., Liao, W., Chen, S., & Zemetra, R. S. (2011). Bioethanol production using genetically modified and mutant wheat and barley straws. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 542–548. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.10.006>
- Liu, Z., Wang, S., & Ouyang, Y. (2017). Reliable biomass supply chain design under feedstock seasonality and probabilistic facility disruptions. *Energies*, 10(11), 1895. <https://doi.org/10.3390/en10111895>
- Lu, Z., Sun, X., Wang, Y., & Xu, C. (2019). Green supplier selection in straw biomass industry based on cloud model and possibility degree. *Journal of Cleaner Production*, 209, 995–1005. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.130>
- Luthra, S., Govindan, K., Kannan, D., Mangla, S. K., & Garg, C. P. (2017). An integrated framework for sustainable supplier selection and evaluation in supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 140, 1686–1698. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.078>
- Minahan, T. A., & Vigoroso, M. W. (2002). The supplier performance measurement benchmarking report. Aberdeen Group.
- Nguyen, D. H., & Chen, H. (2018). Supplier selection and operation planning in biomass supply chains with supply uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 118, 103–117. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.07.012>
- Noorul Haq, A., & Kannan, G. (2006). Fuzzy analytical hierarchy process for evaluating and selecting a vendor in a supply chain model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(7–8), 826–835. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-2562-8>
- Nunes, L. J. R., Causer, T. P., & Ciolkosz, D. (2020). Biomass for energy: A review on supply chain management models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109658>
- Nunes, L. J. R., & Silva, S. (2023). Optimization of the residual biomass supply chain: Process characterization and cost analysis. *Logistics*, 7(3), 48. <https://doi.org/10.3390/logistics7030048>
- O'Brien, J. (2022). *Supplier relationship management: Unlocking the value in your supply base* (3rd ed.). Kogan Page Publishers.
- Okay, N. C., Sencer, A., & Taskin, N. (2024). Quantitative indicators for environmental and social sustainability performance assessment of the supply chain. *Environment, Development and Sustainability*, 28(3), 6049–6069. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05210-3>
- Pehlivan, N. Y., Paksoy, T., & Çalik, A. (2018). Comparison of methods in FAHP with application in supplier selection. In A. Emrouznejad & W. Ho (Eds.), *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (pp. 45–75). CRC Press.
- Permana, I., & Salisah, F. N. S. (2022). Pengaruh normalisasi data terhadap performa hasil klasifikasi algoritma backpropagation. *Indonesian Journal of Informatic Research and Software Engineering*, 2(1), 67–72. <https://doi.org/10.57152/ijirse.v2i1.311>
- Prihartono, B., Darmawan, R. A., Kamilah, M., & Rizkiana, A. (2026). Perancangan mekanisme penilaian dan evaluasi kinerja supplier pada pusat penjualan dan distribusi

- X dengan pendekatan fuzzy multi-criteria decision making (FMCDM) dan ISM-fuzzy MICMAC. *J@ti Undip: Jurnal Teknik Industri*, 1(1), 47–57. <https://doi.org/10.14710/jati.1.1.47-57>
- PT PLN (Persero). (2025, February 1). Co-firing biomassa di PLTU PLN hasilkan 1,67 juta MWh listrik hijau sepanjang 2024. Siaran Pers 01 Feb 2025.
- PT PLN Energi Primer Indonesia. (2025, May 7). Biomassa.
- Pujawan, I. N., & Er, M. (2017). *Supply chain management* (3rd ed.). ANDI.
- Rao, C., Wang, C., Hu, Z., Meng, Y., & Liu, M. (2018). Sustainable procurement decision of electric coal under fuzzy information environment. *Scientia Iranica*. <https://doi.org/10.24200/sci.2018.5054.1065>
- Saaty, T. L. (2003). Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. *European Journal of Operational Research*, 145(1), 85–91. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00227-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00227-8)
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Saaty, T. L. (2013). Analytic hierarchy process. In *Encyclopedia of Operations Research and Management Science* (pp. 52–64). Springer.
- Salabun, W., Watróbski, J., & Shekhovtsov, A. (2020). Are MCDA methods benchmarkable? A comparative study of TOPSIS, VIKOR, COPRAS, and PROMETHEE II methods. *Symmetry*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/SYM12091549>
- Sitorus, F., Cilliers, J. J., & Brito-Parada, P. R. (2019). Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing: Applications and trends. *Expert Systems with Applications*, 121, 393–417. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.12.001>
- Squire, C. V., Lou, J., & Hilde, T. C. (2024). The viability of co-firing biomass waste to mitigate coal plant emissions in Indonesia. *Communications Earth and Environment*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01588-0>
- Sun, F., Aguayo, M. M., Ramachandran, R., & Sarin, S. C. (2018). Biomass feedstock supply chain design—A taxonomic review and a decomposition-based methodology. *International Journal of Production Research*, 56(17), 5626–5659. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1475766>
- Swami, S. (2013). Executive functions and decision making: A managerial review. *IIMB Management Review*, 25(4), 203–212. <https://doi.org/10.1016/j.iimb.2013.07.005>
- Toka, A., Iakovou, E., & Vlachos, D. (2010). Biomass supply chain management for energy polygeneration systems. In *1st International Conference on Supply Chains*.
- Vafaei, N., Ribeiro, R. A., & Camarinha-Matos, L. M. (2021). Assessing normalization techniques for TOPSIS method (pp. 132–141). https://doi.org/10.1007/978-3-030-78288-7_13
- Van Weele, A. J., & Rozemeijer, F. (2022). *Procurement and supply chain management* (8th ed.). Annabel Ainscow.
- Vilakazi, L., & Madyira, D. (2025). Estimation of gross calorific value of coal: A literature review. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 45(2), 390–404. <https://doi.org/10.1080/19392699.2024.2339340>
- Yana, S., Nizar, M., Irhamni, & Mulyati, D. (2022). Biomass waste as a renewable energy in developing bio-based economies in Indonesia: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112268. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112268>