



Evaluasi Sistem Tenaga dan Intensitas Karbon Proses *Milling* Industri Pangan Berbasis Integrasi LCA – ANP

Rayhan Fatur Maulana^{1*}, Farida Pulansari², Isna Nugraha³

^{1,2} Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional
"Veteran" Jawa Timur, Indonesia

Jl. Raya Rungkut Madya Gunung Anyar Surabaya 60294, Indonesia

E-Mail*: 22032010069@student.upnjatim.ac.id

ABSTRACT

High electricity consumption in industrial milling systems significantly increases carbon intensity and reduces energy efficiency in food processing industries. This study evaluates the energy performance and carbon emission profile of a wheat flour production system using an integrated Life Cycle Assessment (LCA) and Analytic Network Process (ANP) approach. The LCA was conducted under a cradle-to-gate boundary covering cleaning, dampening, conditioning, milling, packaging, and distribution processes. The results indicate that the milling process is the primary energy hotspot, contributing approximately 70–90% of total system impact with a single score of $\pm 2.41E3$ Pt out of $\pm 2.5E3$ Pt. The climate change category ($\pm 2-3$ Pt) is strongly influenced by electricity consumption. Based on a Specific Energy Consumption (SEC) of 60 kWh/ton and a national grid emission factor of 0.749 kgCO₂/kWh, the carbon intensity of the milling process is calculated at 44.94 kgCO₂/ton of product. Distribution contributes an additional ± 78.3 Pt, mainly due to diesel fuel use. ANP results show that Technical Energy Performance obtained the highest weight (0.39120), followed by Cost Impact (0.34732) and Operational Feasibility (0.26148). The top-ranked mitigation strategy is optimizing electricity consumption in the milling system (0.10921). The integration of LCA–ANP provides a structured framework for improving motor-driven system efficiency and reducing carbon intensity in high-load industrial milling operations.

Keywords: *Analytic Network Process, Carbon Intensity, Energy Efficiency, Industrial Energy Management, Life Cycle Assessment*

ABSTRAK

Konsumsi energi listrik yang tinggi pada sistem *milling* industri berkontribusi signifikan terhadap peningkatan intensitas karbon dan rendahnya efisiensi energi pada industri pengolahan pangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja energi dan profil emisi karbon sistem produksi tepung terigu melalui integrasi metode *Life Cycle Assessment* (LCA) dan *Analytic Network Process* (ANP) dengan batas sistem *cradle-to-gate* yang mencakup proses *cleaning*, *dampening*, *conditioning*, *milling*, *packaging*, dan distribusi. Hasil LCA menunjukkan bahwa proses *milling* merupakan *hotspot* utama dengan kontribusi sekitar 70–90% dari total dampak sistem dan nilai *single score* sebesar $\pm 2,41E3$ Pt dari total $\pm 2,5E3$ Pt. Kategori perubahan iklim ($\pm 2-3$ Pt) dipengaruhi dominan oleh konsumsi energi listrik. Berdasarkan nilai *Specific Energy Consumption* (SEC) sebesar 60 kWh/ton dan faktor emisi grid nasional sebesar 0,749 kgCO₂/kWh, diperoleh intensitas karbon proses *milling* sebesar 44,94 kgCO₂/ton produk. Tahap distribusi memberikan kontribusi tambahan sebesar $\pm 78,3$ Pt akibat penggunaan bahan bakar diesel. Hasil ANP menunjukkan bahwa kriteria *Technical Energy Performance* memiliki bobot tertinggi (0,39120), diikuti *Cost Impact* (0,34732) dan *Operational Feasibility* (0,26148), dengan strategi prioritas utama berupa optimasi konsumsi energi listrik pada proses *milling* (0,10921). Integrasi LCA–ANP menghasilkan kerangka manajemen energi industri yang terstruktur melalui peningkatan efisiensi sistem motor listrik dan reduksi intensitas karbon pada operasi *milling* berdaya tinggi.

Kata Kunci : *Analytic Network Process, Efisiensi Energi, Intensitas Karbon, Life Cycle Assessment, Manajemen Energi Industri*



1. PENDAHULUAN

Industri pengolahan pangan merupakan salah satu sektor dengan konsumsi energi listrik yang tinggi, terutama pada sistem produksi yang didominasi oleh penggunaan motor listrik. Sistem penggerak motor berkontribusi signifikan terhadap konsumsi energi industri sehingga peningkatan efisiensinya menjadi strategi penting dalam pengendalian biaya energi sekaligus penurunan intensitas karbon pada proses produksi (Golmohamadi, 2022; Sadeq dkk., 2024). Ketergantungan sistem kelistrikan terhadap pembangkit berbasis bahan bakar fosil juga meningkatkan urgensi pengelolaan energi secara efisien melalui optimasi konsumsi daya, perbaikan faktor daya, serta pengendalian profil beban listrik secara sistematis (*International Energy Agency*, 2023; *Energy Institute*, 2023). Oleh karena itu, manajemen energi pada sektor industri tidak hanya berfokus pada pengurangan konsumsi energi total, tetapi juga pada peningkatan efisiensi konversi energi listrik menjadi *output* produksi serta pengendalian profil beban listrik secara terukur.

Pada industri pengolahan gandum menjadi tepung terigu, proses *milling* merupakan tahapan dengan beban listrik terbesar karena melibatkan motor induksi berkapasitas tinggi yang beroperasi secara kontinu. Karakteristik operasi kontinu ini memengaruhi profil permintaan daya pabrik dan berkontribusi terhadap tingginya nilai *specific energy consumption* (SEC) pada level proses produksi (Liu dkk., 2022). Evaluasi kinerja energi pada sistem industri umumnya menggunakan indikator intensitas energi seperti konsumsi energi per unit produk (kWh/ton produk) serta intensitas karbon (kgCO₂/ton produk) sebagai *Energy Performance Indicator* (EPI) untuk menilai efisiensi penggunaan energi terhadap *output* produksi (Bakare dkk., 2023; Williams dkk., 2023). Nilai SEC yang tinggi mengindikasikan adanya potensi optimasi pada sistem penggerak motor, pengaturan beban listrik, serta efisiensi distribusi energi internal sehingga peningkatan performa sistem tenaga dapat dicapai secara lebih efektif.

Pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) banyak digunakan untuk mengidentifikasi tahapan proses dengan kontribusi dampak lingkungan terbesar, khususnya pada kategori perubahan iklim yang berkaitan langsung dengan konsumsi energi listrik (Valdivia dkk., 2021; Notarnicola dkk., 2021). Pada sektor pengolahan pangan, tahapan proses dengan konsumsi listrik tinggi sering kali teridentifikasi sebagai *hotspot* utama dalam kategori dampak *climate change* (Brilliantina dkk., 2023; Videgar dkk., 2021). Studi LCA pada produk pangan berbasis bahan baku pertanian juga menunjukkan bahwa dampak lingkungan dapat didominasi oleh tahapan proses tertentu yang bersifat intensif energi atau material sehingga identifikasi *hotspot* menjadi langkah penting dalam perumusan strategi perbaikan proses produksi (Boenzi dkk., 2022; Giongo dkk.,

2025). Namun demikian, sebagian besar penelitian LCA masih terbatas pada tahap identifikasi dampak lingkungan tanpa mengintegrasikan hasil kuantitatif tersebut ke dalam kerangka pengambilan keputusan yang mempertimbangkan keterkaitan aspek teknis, ekonomi, dan operasional secara simultan (Costa dkk., 2023).

Dalam konteks pengambilan keputusan multikriteria, metode seperti *Analytic Hierarchy Process* (AHP) sering digunakan untuk menentukan prioritas strategi perbaikan pada sistem industri. Metode ini terbukti mampu menyusun prioritas alternatif secara terstruktur melalui pendekatan perbandingan berpasangan antar kriteria, sebagaimana ditunjukkan pada studi sistem pendukung keputusan (Ikhwani & Chotijah, 2022). Meskipun demikian, pendekatan hierarkis memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan hubungan timbal balik antar elemen keputusan pada sistem industri yang kompleks. Dalam praktiknya, peningkatan efisiensi energi dapat memengaruhi biaya investasi, kelayakan implementasi operasional, serta perubahan profil beban listrik secara bersamaan. Interaksi tersebut menunjukkan adanya interdependensi antar kriteria sehingga diperlukan model pengambilan keputusan berbasis jaringan yang mampu menangkap hubungan umpan balik antar variabel keputusan.

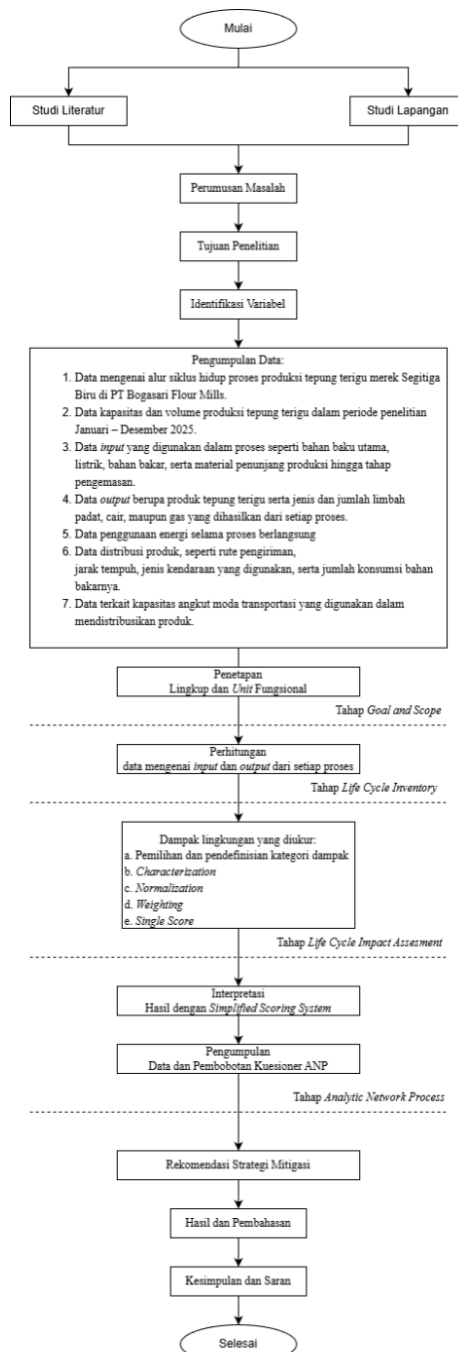
Untuk menjembatani kesenjangan tersebut, penelitian ini mengintegrasikan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) dan *Analytic Network Process* (ANP) guna menghubungkan hasil analisis intensitas energi dan karbon dengan penentuan prioritas strategi peningkatan performa sistem tenaga. ANP memungkinkan pemodelan hubungan timbal balik antara kriteria *technical energy performance*, *cost impact*, dan *operational feasibility* sehingga lebih representatif dalam menggambarkan dinamika sistem *milling* yang memiliki karakteristik beban listrik tinggi (Saaty & Vargas, 2016; Lei dkk., 2023). Penilaian dalam model ANP dilakukan oleh tiga responden yang memiliki kompetensi teknis serta tanggung jawab langsung terhadap operasional sistem produksi dan distribusi sehingga pembobotan kriteria dan alternatif strategi dapat merepresentasikan kondisi operasional nyata.

Fokus penelitian ini diarahkan pada evaluasi nilai SEC, intensitas karbon listrik, serta penentuan strategi peningkatan performa sistem tenaga pada proses *milling* sebagai tahapan dengan beban listrik dominan. Melalui pendekatan terintegrasi LCA–ANP, penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan rekomendasi teknis yang lebih terukur dan aplikatif dalam mendukung peningkatan efisiensi energi, pengendalian profil beban listrik, serta reduksi intensitas karbon pada industri pengolahan tepung terigu.

2. METODE

2.1 Desain Penelitian dan Batasan Sistem

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan integrasi *Life Cycle Assessment* (LCA) dan *Analytic Network Process* (ANP) untuk menganalisis dampak *Technical Energy Performance* serta menentukan prioritas strategi optimasi konsumsi energi dan peningkatan performa sistem tenaga pada proses produksi dan distribusi tepung terigu Segitiga Biru kemasan 25 kg. Sistem dibatasi pada lingkup *cradle to gate*, sehingga analisis mencakup proses produksi utama (*cleaning, dampening, conditioning, milling, packaging*) dan distribusi awal, sesuai pembagian tahap inventori pada skripsi.



Gambar 1. Alur Penelitian

2.2 Life Cycle Assessment (LCA)

Tahap LCA dilakukan melalui penyusunan *Life Cycle Inventory* (LCI) pada setiap sub-proses dengan mencatat seluruh *input* (material dan energi) serta *output* (produk dan emisi). Basis perhitungan inventori disesuaikan dengan kapasitas operasi harian proses produksi.

Rumus konversi kapasitas produksi per hari:

$$Q_{\text{hari}} = Q_{\text{jam}} \times 24 \quad (1)$$

Tahap inventori selanjutnya digunakan untuk menghitung emisi dari konsumsi energi listrik pada setiap proses produksi.

Rumus perhitungan emisi listrik:

$$E_{CO_2} = E_{\text{listrik}} \times FE \quad (2)$$

Nilai faktor emisi listrik (FE) sebesar 0,749 kgCO₂/kWh yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada nilai faktor emisi grid nasional Indonesia yang dipublikasikan oleh Kementerian (ESDM) tahun 2023 dengan E_{listrik} adalah konsumsi energi listrik (kWh) dan FE adalah faktor emisi listrik. Contoh penerapan perhitungan emisi listrik:

$$E_{CO_2} = 1080 \times 0,749 = 808,92 \text{ kg} \quad (3)$$

Pada tahap distribusi, emisi dihitung berdasarkan jarak tempuh kendaraan dan faktor emisi masing-masing polutan.

Rumus perhitungan emisi distribusi:

$$E_{\text{polutan}} = d \times EF_{\text{polutan}} \quad (4)$$

Analisis Intensitas Energi

Rumus perhitungan intensitas energi:

$$\text{Energy Intensity} = \frac{E_{\text{listrik}}}{Q_{\text{produk}}} \quad (5)$$

Intensitas energi digunakan untuk mengukur tingkat efisiensi penggunaan energi listrik terhadap jumlah produk yang dihasilkan. Nilai ini menunjukkan besarnya konsumsi energi listrik (kWh) untuk setiap satu ton produk. Semakin rendah nilai intensitas energi, semakin efisien proses produksi dalam memanfaatkan energi Listrik dengan menganalisis Intensitas Karbon Listrik

Rumus perhitungan intensitas karbon listrik:

$$\text{Carbon Intensity} = \frac{E_{CO_2}}{Q_{\text{produk}}} \quad (6)$$

Dengan E_{CO_2} adalah total emisi karbon dari konsumsi listrik (kgCO₂) dan Q_{produk} adalah jumlah produk yang dihasilkan (ton).

Satuan intensitas karbon dinyatakan dalam kgCO₂/ton produk. Karena emisi listrik dihitung berdasarkan faktor emisi, maka:

$$E_{CO_2} = E_{listrik} \times FE \quad (7)$$

dengan FE adalah faktor emisi listrik (kgCO₂/kWh).

Dengan $E_{listrik}$ adalah konsumsi energi listrik (kWh) dan Q_{produk} adalah jumlah produk yang dihasilkan (ton). Satuan intensitas energi dinyatakan dalam kWh/ton produk.

Hasil inventori selanjutnya dianalisis pada tahap *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) menggunakan perangkat lunak LCA untuk mengidentifikasi tahapan proses dengan kontribusi dampak *Technical Energy Performance* terbesar (*hotspot*).

Metode ANP digunakan untuk menentukan prioritas strategi reduksi intensitas karbon berdasarkan keterkaitan antar kriteria dan alternatif keputusan. Struktur jaringan ANP terdiri atas tujuan, kriteria (*Technical Energy Performance*, *Cost Impact*, dan *Operational Feasibility*), serta alternatif strategi reduksi intensitas karbon. Data penilaian diperoleh melalui kuesioner perbandingan berpasangan dengan skala penilaian 1-9. Penilaian dari beberapa responden digabungkan menggunakan *geometric mean*. Rumus *geometric mean*:

$$GM = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} \quad (8)$$

Konsistensi penilaian diuji menggunakan *Consistency Ratio* (CR), dengan ketentuan matriks perbandingan berpasangan dinyatakan konsisten apabila:

$$CR \leq 0,10 \quad (9)$$

Selain itu, tingkat kesepakatan antarresponden dianalisis menggunakan koefisien kesepakatan penilai (*rater agreement*). Rumus koefisien kesepakatan (*Kendall's W*):

$$W = \frac{S}{MaxS} \quad (10)$$

2.3 Analisis Kinerja Sistem Tenaga Milling

Analisis kinerja sistem tenaga dilakukan untuk mengevaluasi performa konsumsi daya listrik pada proses *milling* sebagai tahapan dengan beban energi terbesar dalam sistem produksi. Proses *milling* pada industri tepung terigu didominasi oleh motor listrik berkapasitas besar yang beroperasi secara kontinu (*continuous load*), sehingga berkontribusi signifikan terhadap profil beban listrik (*electrical demand profile*) pabrik. Evaluasi kinerja sistem tenaga difokuskan pada beberapa parameter utama, yaitu:

1. Konsumsi energi listrik total (kWh),
2. *Specific Energy Consumption* (SEC) atau intensitas energi (kWh/ton produk),
3. Intensitas karbon listrik (kgCO₂/ton produk).

Specific Energy Consumption (SEC) dihitung menggunakan persamaan:

$$Specific\ Energy\ Consumption = \frac{E_{listrik}}{Q} \quad (11)$$

dengan $E_{listrik}$ adalah total konsumsi energi listrik (kWh) dan Q adalah jumlah produk yang dihasilkan (ton). Nilai SEC berfungsi sebagai *Energy Performance Indicator* (EPI) untuk menilai tingkat efisiensi penggunaan energi listrik pada sistem *milling*. Semakin rendah nilai SEC, semakin efisien sistem penggerak motor dalam mengonversi energi listrik menjadi *output* produksi.

2.4 Karakteristik Responden

Penilaian perbandingan berpasangan dalam model ANP dilakukan oleh tiga responden yang memiliki kompetensi dan pengalaman langsung dalam sistem produksi dan distribusi, yaitu:

1. *Deputy Head Miller*, bertanggung jawab terhadap operasional sistem penggilingan dan pengendalian performa mesin *milling*.
2. *Deputy Head Miller Support*, bertanggung jawab pada dukungan teknis operasional dan pemeliharaan sistem produksi.
3. *Section Head Transportation & Depo Support*, bertanggung jawab terhadap sistem distribusi dan efisiensi operasional transportasi.

Ketiga responden dipilih menggunakan metode *purposive sampling* karena memiliki pengalaman profesional dan pemahaman teknis terhadap konsumsi energi, sistem tenaga, serta pengelolaan operasional produksi. Pemilihan responden berbasis keahlian ini dilakukan untuk memastikan validitas pembobotan dalam ANP, mengingat metode ini sangat bergantung pada expert judgment.

3. PEMBAHASAN

Pembahasan penelitian ini meliputi analisis dampak *Technical Energy Performance* pada proses produksi dan distribusi tepung terigu Segitiga Biru kemasan 25 kg menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA), serta penentuan prioritas strategi optimasi konsumsi energi dan peningkatan performa sistem tenaga menggunakan metode *Analytic Network Process* (ANP). Pembahasan diawali dengan analisis kondisi awal sistem produksi dan distribusi, dilanjutkan dengan hasil analisis LCA, hasil analisis ANP, serta integrasi kedua metode untuk menghasilkan rekomendasi strategi reduksi intensitas karbon yang paling prioritas.

3.1 Analisis Kondisi Awal Sistem Produksi dan Distribusi

Kondisi awal sistem produksi dan distribusi tepung terigu Segitiga Biru menunjukkan bahwa proses produksi masih didominasi oleh penggunaan energi listrik pada beberapa tahapan utama, khususnya proses *milling*, *dampening*, *conditioning*, dan *packaging*. Penggunaan energi yang relatif tinggi pada

tahapan tersebut berimplikasi langsung terhadap besarnya emisi dan dampak *Technical Energy Performance* yang dihasilkan. Selain itu, aktivitas distribusi produk dari pabrik menuju depo dan agen turut memberikan kontribusi terhadap emisi akibat penggunaan bahan bakar kendaraan dan jarak tempuh pengiriman.

Tabel 1 menyajikan data produksi dan distribusi tepung terigu Segitiga Biru selama periode Januari hingga Desember 2025 yang digunakan sebagai dasar dalam penentuan unit fungsional dan penyusunan inventori siklus hidup.

Tabel 1. Data Produksi Tepung Terigu Segitiga Biru

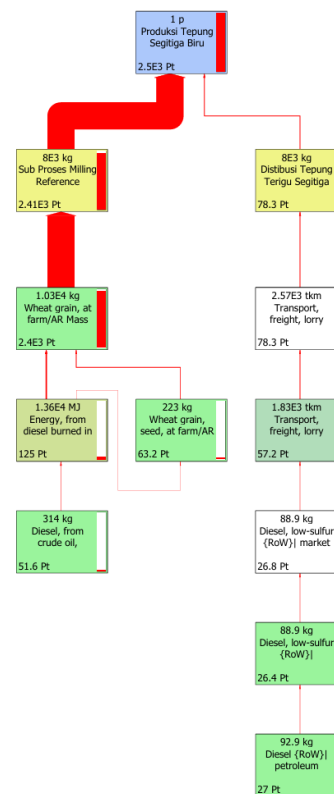
Bulan	25 Kg (Ton)	5 Kg (Ton)	1 Kg (Ton)	500 Gram (Ton)	Bulk
Jan	9.996,34	192,24	5.767,12	2.883,56	384,47
Feb	10.998,52	211,51	6.345,30	3.172,65	423,02
Mar	8.894,57	171,05	5.131,48	2.565,74	342,10
Apr	11.900,77	228,86	6.865,83	3.432,91	457,72
Mei	9.741,37	187,33	5.620,02	2.810,01	374,67
Juni	9.765,24	187,79	5.633,79	2.816,90	375,59
Juli	12.834,58	246,82	7.404,57	3.702,28	0,00
Ags	7.217,46	138,80	4.163,92	2.081,96	277,59
Sep	2.909,98	55,96	1.678,83	839,42	111,92
Okt	9.788,23	188,24	5.647,06	2.823,53	376,47
Nov	9.438,10	181,50	5.445,06	2.722,53	363,00
Des	9.371,38	180,22	5.406,56	2.703,28	360,44
Total	112.856,52	2.170,32	65.109,53	32.554,77	3.847,00

3.2 Analisis Dampak *Technical Energy Performance* Menggunakan *Life Cycle Assessment* (LCA)

Analisis dampak *Technical Energy Performance* pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk mengidentifikasi kontribusi dampak *Technical Energy Performance* pada setiap tahapan proses produksi dan distribusi tepung terigu Segitiga Biru kemasan 25 kg. Tahapan analisis LCA meliputi penyusunan inventori siklus hidup, analisis aliran material dan energi, *characterization*, *damage assessment*, *normalization*, *weighting*, hingga perhitungan nilai dampak agregat (*single score*).

Tahap awal analisis ditunjukkan melalui *diagram Sankey* yang menggambarkan aliran material dan energi pada setiap tahapan proses produksi dan distribusi. Diagram ini digunakan untuk memvisualisasikan hubungan antara *input* dan *output* sistem serta menunjukkan tahapan proses dengan aliran energi terbesar.

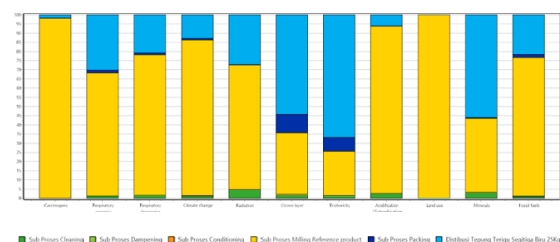
Berdasarkan Gambar 1, proses *milling* memberikan kontribusi dampak *Technical Energy Performance* terbesar dengan total dampak sebesar 2,41E3 Pt dari keseluruhan sistem produksi 1 kg tepung terigu Segitiga Biru (2,5E3 Pt). Kontribusi utama pada proses *milling* berasal dari penggunaan energi listrik sebesar 1,36E4 MJ yang menghasilkan dampak 125 Pt, serta konsumsi diesel dari *crude oil* sebesar 314 kg dengan dampak 51,6 Pt. Selain itu, penggunaan gandum di *farm/AR mass* sebesar 1,03E4 kg juga berkontribusi signifikan dengan nilai dampak 2,46E3 Pt.



Gambar 1. Diagram Sankey Aliran Material dan Energi Proses Produksi dan Distribusi Tepung Terigu

Pada tahap distribusi, total dampak yang dihasilkan relatif lebih kecil, yaitu sebesar 78,3 Pt, yang didominasi oleh aktivitas transportasi truk sejauh 1,83E3 tkm dengan kontribusi dampak 57,2 Pt, serta penggunaan diesel low-sulfur sebesar 88,9 kg dengan dampak sekitar 26,4-26,8 Pt.

Hasil ini menunjukkan bahwa proses *milling* merupakan *hotspot* utama dampak *Technical Energy Performance*, sehingga menjadi fokus utama pada tahap *characterization* dan pengembangan strategi optimasi konsumsi energi dan reduksi intensitas karbon selanjutnya.

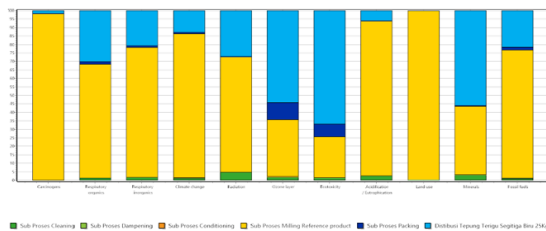


Gambar 2. Hasil *Characterization* Dampak *Technical Energy Performance*

Berdasarkan Gambar 2, kontribusi dampak *Technical Energy Performance* terbesar pada kategori *Climate Change* masih didominasi oleh Sub Proses *milling* (*reference product*) dengan kontribusi sekitar 70–90% dibandingkan proses lainnya. Tingginya kontribusi ini berkaitan langsung dengan konsumsi energi listrik pada mesin *milling* yang beroperasi secara kontinu dengan beban daya besar.

Pada kategori *Human Health* dan *Ecosystem Quality*, *milling* juga menyumbang lebih dari 80% total dampak, menunjukkan bahwa intensitas energi proses penggilingan memberikan pengaruh signifikan terhadap sistem produksi.

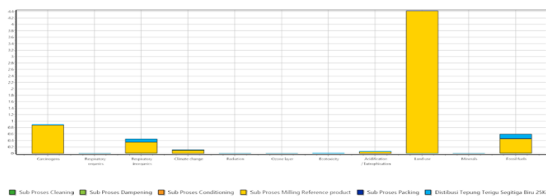
Meskipun kategori *Land Use* menunjukkan nilai absolut sekitar ± 14 Pt atau $\pm 70\%$ dari total dampak, kontribusi tersebut terutama berasal dari tahap hulu (penggunaan bahan baku gandum). Dalam konteks pengendalian dampak berbasis proses industri, kategori *Climate Change* lebih relevan karena berkaitan langsung dengan konsumsi energi listrik dan bahan bakar.



Gambar 3. Hasil *Damage Assessment* Kategori Dampak *Technical Energy Performance*

Berdasarkan Gambar 3, Sub Proses *milling* masih menjadi kontributor terbesar terhadap seluruh kategori dampak dengan rentang kontribusi sekitar 70–90%. Pada kategori *Climate Change*, dampak yang dihasilkan berkisar ± 2 –3 Pt atau sekitar 10–15% dari total dampak keseluruhan.

Nilai tersebut dipengaruhi oleh tingginya konsumsi energi listrik pada tahap *milling*. Sementara itu, proses distribusi memberikan kontribusi sekitar 20–30% pada kategori *Resources* dan *Climate Change* akibat penggunaan bahan bakar diesel, namun nilainya masih lebih rendah dibandingkan dampak dari konsumsi listrik pada tahap *milling*.



Gambar 4. Hasil *Normalization* Kategori Kerusakan *Technical Energy Performance*

Berdasarkan Gambar 4, Sub Proses *milling* memiliki nilai normalisasi tertinggi dibandingkan proses lainnya, menunjukkan dominasi kontribusi terhadap *single score* dampak *Technical Energy Performance*. Nilai ini secara signifikan lebih besar dibandingkan *cleaning*, *conditioning*, *dampening*, dan *packing* yang masing-masing memberikan kontribusi kurang dari 10%.

Proses distribusi menempati posisi kedua, namun nilainya masih jauh lebih kecil dibandingkan *milling*. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar akumulasi dampak *Technical Energy Performance* dalam sistem produksi tepung terigu Segitiga Biru. Hal

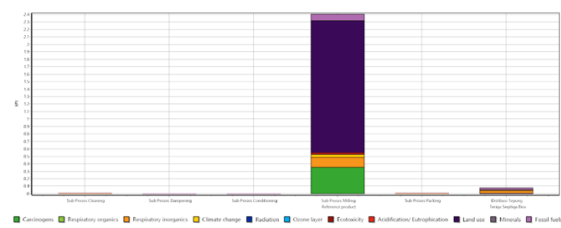
ini mengindikasikan bahwa sebagian besar akumulasi dampak *Technical Energy Performance* dalam sistem produksi tepung terigu Segitiga Biru berasal dari konsumsi energi listrik pada proses *milling*. Dari sisi sistem tenaga, kondisi ini menunjukkan dominasi beban motor listrik dalam struktur konsumsi energi pabrik. Beban kontinu tersebut berpotensi meningkatkan *demand* maksimum serta memperbesar kontribusi *losses* apabila tidak dilakukan *load optimization* dan *demand management* secara terstruktur.



Gambar 5. Hasil *Weighting* Kategori Kerusakan *Technical Energy Performance*

Berdasarkan Gambar 5, hasil *weighting* menunjukkan bahwa Sub Proses *milling* tetap menjadi penyumbang terbesar terhadap total dampak ternormalisasi dengan kontribusi dominan dibandingkan tahapan lainnya. Proses distribusi berada pada urutan kedua, sedangkan *cleaning*, *conditioning*, *dampening*, dan *packing* masing-masing memberikan kontribusi relatif kecil ($< 10\%$).

Temuan ini sejalan dengan hasil perhitungan intensitas energi dan intensitas karbon yang menunjukkan bahwa proses *milling* memiliki konsumsi energi listrik per ton produk yang paling tinggi, sehingga berkontribusi signifikan terhadap total emisi karbon sistem.



Gambar 6. Hasil *Single Score* Dampak *Technical Energy Performance*

Berdasarkan Gambar 6, kategori *Land Use* menunjukkan nilai dampak tertinggi sekitar ± 14 Pt atau sekitar 70% dari total dampak *Technical Energy Performance*. Nilai tersebut terutama dipengaruhi oleh penggunaan bahan baku gandum pada tahap hulu (*upstream process*), sehingga kontribusinya lebih berkaitan dengan aspek agrikultural dibandingkan konsumsi energi listrik di dalam sistem produksi pabrik.

Sebaliknya, dalam konteks evaluasi sistem produksi industri berbasis energi listrik, kategori *Climate Change* dengan nilai sekitar ± 2 –3 Pt (setara dengan ± 10 –15% dari total dampak) menjadi indikator yang lebih relevan karena secara langsung dipengaruhi

oleh konsumsi energi listrik dan penggunaan bahan bakar operasional. Meskipun nilainya lebih kecil dibandingkan *Land Use*, kategori ini mencerminkan dampak yang dapat dikendalikan melalui optimasi sistem tenaga internal.

Satuan Pt (*points*) pada metode *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) merupakan nilai agregat yang diperoleh melalui proses normalisasi dan pembobotan berbagai kategori dampak lingkungan ke dalam satu indeks komposit. Nilai ini bersifat relatif terhadap sistem referensi global, sehingga semakin besar nilai Pt menunjukkan semakin besar kontribusi suatu proses terhadap total dampak sistem. Oleh karena itu, meskipun *Land Use* memiliki nilai absolut lebih tinggi, pengendalian berbasis sistem tenaga industri lebih tepat difokuskan pada kategori *Climate Change* yang sensitif terhadap perubahan konsumsi energi listrik.

Kontribusi dampak perubahan iklim tersebut terutama berasal dari emisi CO₂ akibat konsumsi listrik pada proses *milling* serta penggunaan bahan bakar diesel pada tahap distribusi. Dominasi dampak pada proses *milling* menunjukkan bahwa beban listrik (*electrical load*) sistem penggilingan merupakan faktor utama pembentuk intensitas karbon produksi. Dengan demikian, peningkatan efisiensi sistem motor listrik, pengendalian faktor daya, serta optimasi profil beban (*load profile optimization*) menjadi langkah teknis yang secara langsung berpotensi menurunkan intensitas energi dan intensitas karbon sistem produksi secara signifikan.

Tabel 2. *Simplified Scoring System*

Tahap	Emisi Karbon	Konsumsi Energi	Penggunaan Bahan Baku	Produk Limbah	Total
<i>Cleaning</i>	1	1	1	1	4
<i>Dampening</i>	1	1	1	1	4
<i>Conditioning</i>	1	1	1	1	4
<i>Milling</i>	5	5	5	3	18
<i>Packaging</i>	1	1	1	2	5
Distribusi	2	3	1	5	11

Berdasarkan tabel penilaian, proses *milling* memiliki skor total tertinggi yaitu 18, yang terdiri dari

emisi karbon (5), konsumsi energi (5), penggunaan bahan baku (5), dan produksi limbah (3). Nilai ini menunjukkan bahwa *milling* merupakan tahap dengan kontribusi dampak *Technical Energy Performance* paling dominan dibandingkan tahapan lainnya.

Tahap distribusi menempati urutan kedua dengan total skor 11, yang didominasi oleh produksi limbah (5) dan konsumsi energi (3), terutama akibat penggunaan bahan bakar pada aktivitas transportasi. Sementara itu, proses *packaging* memiliki skor total 5, dan proses *cleaning*, *dampening*, serta *conditioning* masing-masing memiliki skor terendah yaitu 4, yang menunjukkan kontribusi dampak *Technical Energy Performance* relatif kecil. Hasil ini menegaskan bahwa prioritas mitigasi sebaiknya difokuskan pada proses *milling* dan distribusi.

Secara keseluruhan, rangkaian analisis LCA mulai dari *diagram Sankey* hingga *single score* menunjukkan konsistensi hasil bahwa proses *milling* menjadi tahapan dengan kontribusi dampak *Technical Energy Performance* terbesar. Oleh karena itu, hasil analisis ini digunakan sebagai dasar utama dalam penyusunan alternatif strategi optimasi konsumsi energi dan peningkatan performa sistem tenaga yang selanjutnya dianalisis menggunakan metode *Analytic Network Process* (ANP).

3.3 Penentuan Prioritas Strategi Peningkatan Performa Sistem Tenaga Menggunakan ANP

Berdasarkan hasil identifikasi *hotspot* dari analisis *Life Cycle Assessment* (LCA), disusun sejumlah alternatif strategi optimasi konsumsi energi dan peningkatan efisiensi sistem tenaga yang difokuskan pada proses *milling* dan peningkatan efisiensi proses produksi. Penyusunan alternatif strategi reduksi intensitas karbon ini mempertimbangkan karakteristik sistem produksi dan distribusi tepung terigu Segitiga Biru kemasan 25 kg, serta difokuskan pada tahapan proses dengan kontribusi dampak *Technical Energy Performance* terbesar. Alternatif strategi yang disusun mencakup aspek teknis, manajerial, dan operasional yang relevan untuk mendukung pengelolaan dampak *Technical Energy Performance* secara berkelanjutan.

Tabel 3. Alternatif Strategi Optimasi Konsumsi Energi dan Peningkatan Performa Sistem Tenaga

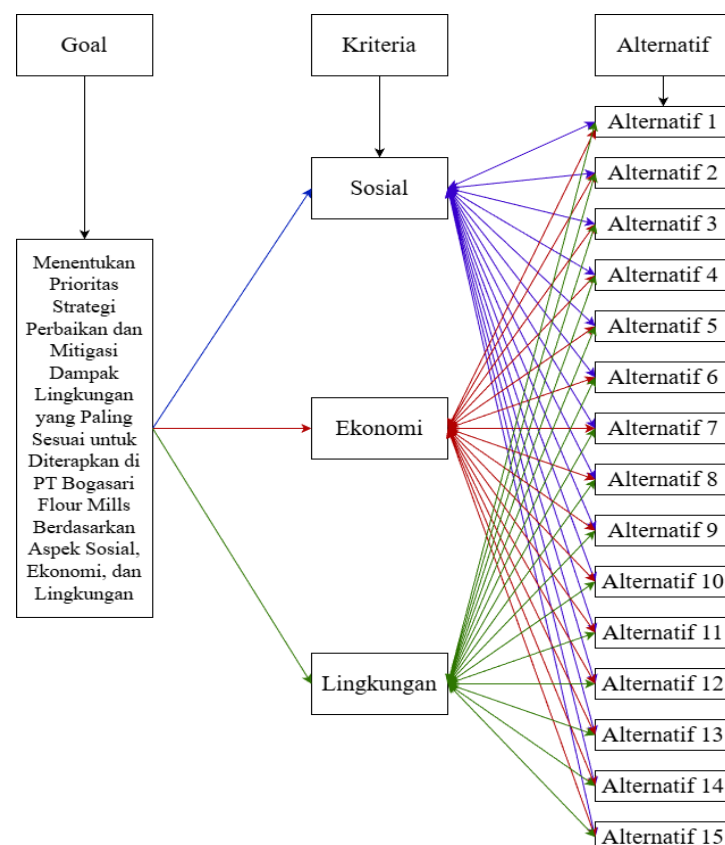
No	Alternatif
1	Mengoptimalkan konsumsi energi listrik pada proses <i>milling</i> untuk menurunkan dampak <i>Technical Energy Performance</i> (emisi) serta menekan biaya operasional.
2	Menerapkan <i>preventive maintenance</i> mesin produksi secara terjadwal untuk mengurangi <i>downtime</i> , meningkatkan keselamatan kerja, dan memperpanjang umur mesin.
3	Menyesuaikan kapasitas dan waktu operasi mesin <i>packing</i> agar lebih efisien dan mengurangi pemborosan energi serta produk cacat.
4	Melakukan standarisasi prosedur operasi <i>packing</i> guna menekan cacat kemasan, meningkatkan kualitas produk, dan mengurangi limbah.
5	Menggunakan material kemasan yang lebih ramah <i>Technical Energy Performance</i> tanpa menurunkan mutu dan keamanan produk.
6	Mengatur jadwal produksi dan <i>packing</i> secara seimbang untuk mengurangi beban kerja berlebih pada operator dan meningkatkan produktivitas.

Tabel 3. (Lanjutan)

No	Alternatif
7	Meningkatkan pengawasan kualitas bahan baku gandum untuk menekan kehilangan material dan meningkatkan efisiensi proses produksi.
8	Mengoptimalkan sistem distribusi dengan perencanaan rute pengiriman yang lebih efisien untuk menurunkan konsumsi bahan bakar dan emisi transportasi.
9	Menyesuaikan kapasitas muatan kendaraan distribusi agar lebih optimal sehingga frekuensi pengiriman dapat dikurangi.
10	Melakukan perawatan rutin armada distribusi untuk menjaga efisiensi bahan bakar, mengurangi emisi, dan meningkatkan keselamatan kerja pengemudi.
11	Mengurangi limbah proses produksi melalui peningkatan pemanfaatan kembali (<i>reuse</i>) dan pengelolaan sisa produksi.
12	Meningkatkan pelatihan operator terkait efisiensi energi, keselamatan kerja, dan kesadaran <i>Technical Energy Performance</i> .
13	Mengoptimalkan pengaturan suhu dan kelembaban ruang produksi untuk menjaga kualitas produk sekaligus efisiensi energi.
14	Melakukan <i>monitoring</i> dan evaluasi berkala terhadap konsumsi energi dan emisi berdasarkan hasil <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA).
15	Menerapkan sistem evaluasi kinerja <i>Technical Energy Performance</i> yang terintegrasi sebagai dasar pengambilan keputusan perbaikan berkelanjutan.

Tabel 3 menyajikan daftar alternatif strategi reduksi intensitas karbon yang selanjutnya digunakan sebagai *input* dalam proses pengambilan keputusan menggunakan metode *Analytic Network Process* (ANP). Alternatif-alternatif tersebut dirancang untuk mengatasi permasalahan utama yang teridentifikasi pada tahapan proses produksi, khususnya proses *milling*, serta untuk meningkatkan efisiensi energi dan kinerja *Technical Energy Performance* secara keseluruhan.

Analisis prioritas strategi reduksi intensitas karbon dilakukan menggunakan metode *Analytic Network Process* (ANP) dengan mempertimbangkan keterkaitan antar kriteria *Technical Energy Performance*, *Cost Impact*, dan *Operational Feasibility*. Model ANP disusun dalam bentuk jaringan yang menggambarkan hubungan antar elemen keputusan, mulai dari tujuan, kriteria, hingga alternatif strategi reduksi intensitas karbon.

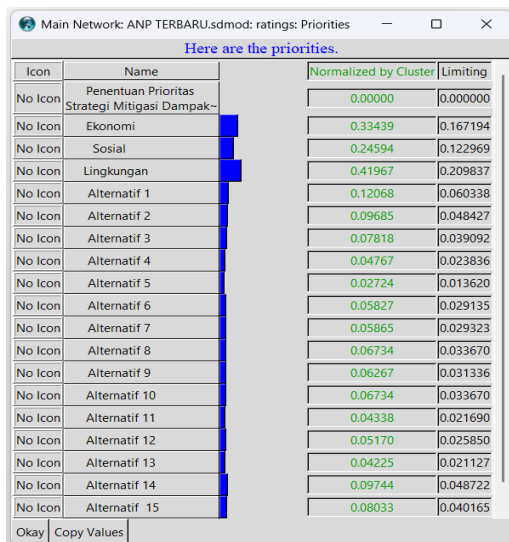


Gambar 7. Model Jaringan *Analytic Network Process* (ANP)

Berdasarkan Gambar 7, model *Analytic Network Process* (ANP) menunjukkan hubungan keterkaitan antara *goal*, kriteria, dan alternatif strategi dalam bentuk jaringan yang saling memengaruhi. Tujuan penelitian adalah menentukan prioritas strategi perbaikan dan mitigasi dampak *Technical Energy Performance* yang paling sesuai untuk diterapkan di PT XYZ. Penilaian dilakukan berdasarkan tiga kriteria utama, yaitu *Operational Feasibility*, *Cost Impact*, dan *Technical Energy Performance*.

Hubungan antar kriteria dalam model ini tidak bersifat independen, melainkan saling memengaruhi secara timbal balik. *Technical Energy Performance* berpengaruh terhadap *Cost Impact* karena peningkatan efisiensi energi dan penurunan rugi-rugi sistem tenaga akan secara langsung menurunkan konsumsi listrik serta biaya operasional. Sebaliknya, *Cost Impact* memengaruhi *Operational Feasibility* karena keterbatasan investasi atau biaya implementasi dapat membatasi penerapan teknologi efisiensi seperti *variable speed drive* atau sistem koreksi faktor daya. Selain itu, *Operational Feasibility* juga berpengaruh terhadap *Technical Energy Performance*, karena kesiapan operasional, kompetensi operator, serta sistem pemeliharaan menentukan keberhasilan implementasi strategi optimasi energi.

Dengan demikian, struktur jaringan ANP dalam penelitian ini merepresentasikan kondisi nyata sistem tenaga industri yang kompleks, di mana setiap keputusan teknis memiliki implikasi ekonomi dan operasional secara simultan. Interdependensi ini menjadi dasar pemilihan ANP dibandingkan metode hierarkis seperti AHP, yang mengasumsikan independensi antar kriteria.



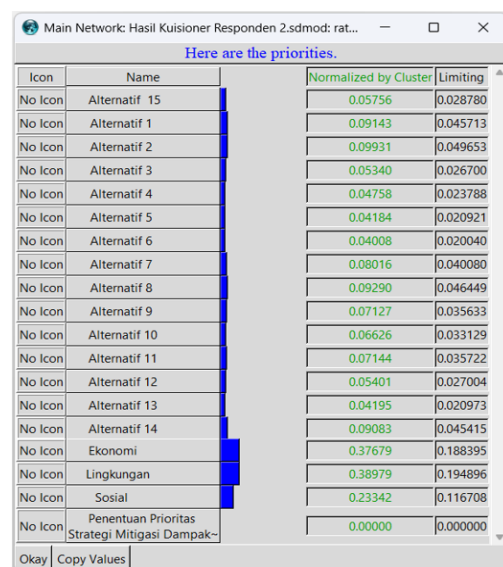
Icon	Name	Normalized by Cluster	Limiting
No Icon	Penentuan Prioritas Strategi Mitigasi Dampak~	0.00000	0.000000
No Icon	Ekonomi	0.33439	0.167194
No Icon	Sosial	0.24594	0.122969
No Icon	Lingkungan	0.41967	0.209837
No Icon	Alternatif 1	0.12068	0.060338
No Icon	Alternatif 2	0.09685	0.048427
No Icon	Alternatif 3	0.07818	0.039092
No Icon	Alternatif 4	0.04767	0.023836
No Icon	Alternatif 5	0.02724	0.013620
No Icon	Alternatif 6	0.05827	0.029135
No Icon	Alternatif 7	0.05865	0.029323
No Icon	Alternatif 8	0.06734	0.033670
No Icon	Alternatif 9	0.06267	0.031336
No Icon	Alternatif 10	0.06734	0.033670
No Icon	Alternatif 11	0.04338	0.021690
No Icon	Alternatif 12	0.05170	0.025850
No Icon	Alternatif 13	0.04225	0.021127
No Icon	Alternatif 14	0.09744	0.048722
No Icon	Alternatif 15	0.08033	0.040165

Gambar 8. Hasil Penilaian Kuesioner Responden 1 Menggunakan Super Decisions

Berdasarkan Gambar 8, hasil perhitungan ANP menunjukkan bahwa dari sisi kriteria, aspek *Technical Energy Performance* memiliki bobot tertinggi dengan nilai 0,41967, diikuti oleh *Cost Impact* sebesar 0,33439 dan *Operational Feasibility* sebesar 0,24594. Hal ini

menegaskan bahwa dalam penentuan strategi perbaikan dan mitigasi dampak *Technical Energy Performance* di PT XYZ, aspek *Technical Energy Performance* menjadi pertimbangan utama dibandingkan aspek *Cost Impact* dan *Operational Feasibility*.

Pada tingkat alternatif, prioritas tertinggi diperoleh oleh Alternatif 1 dengan nilai 0,12068, diikuti oleh Alternatif 14 (0,09744) dan Alternatif 2 (0,09685). Sementara itu, alternatif dengan prioritas terendah adalah Alternatif 5 dengan nilai 0,02724. Hasil perangkingan ini menunjukkan bahwa alternatif dengan nilai bobot lebih besar memiliki tingkat prioritas implementasi yang lebih tinggi, sehingga dapat dijadikan dasar dalam penentuan strategi optimasi konsumsi energi dan peningkatan performa sistem tenaga yang paling efektif dan relevan untuk diterapkan.



Icon	Name	Normalized by Cluster	Limiting
No Icon	Alternatif 15	0.05756	0.028780
No Icon	Alternatif 1	0.09143	0.045713
No Icon	Alternatif 2	0.09931	0.049653
No Icon	Alternatif 3	0.05340	0.026700
No Icon	Alternatif 4	0.04758	0.023788
No Icon	Alternatif 5	0.04184	0.020921
No Icon	Alternatif 6	0.04008	0.020040
No Icon	Alternatif 7	0.08016	0.040080
No Icon	Alternatif 8	0.09290	0.046449
No Icon	Alternatif 9	0.07127	0.035633
No Icon	Alternatif 10	0.06626	0.033129
No Icon	Alternatif 11	0.07144	0.035722
No Icon	Alternatif 12	0.05401	0.027004
No Icon	Alternatif 13	0.04195	0.020973
No Icon	Alternatif 14	0.09083	0.045415
No Icon	Ekonomi	0.37679	0.188395
No Icon	Lingkungan	0.38979	0.194896
No Icon	Sosial	0.23342	0.116708
No Icon	Penentuan Prioritas Strategi Mitigasi Dampak~	0.00000	0.000000

Gambar 9. Hasil Penilaian Kuesioner Responden 2 Menggunakan Super Decisions

Berdasarkan Gambar 9, hasil penilaian Responden 2 menunjukkan bahwa pada tingkat kriteria, aspek *Technical Energy Performance* memiliki bobot tertinggi sebesar 0,38979, diikuti oleh *Cost Impact* sebesar 0,37679 dan *Operational Feasibility* sebesar 0,23342. Hasil ini mengindikasikan bahwa menurut Responden 2, aspek *Technical Energy Performance* tetap menjadi pertimbangan utama dalam penentuan strategi optimasi konsumsi energi dan peningkatan performa sistem tenaga, meskipun aspek *Cost Impact* juga memiliki pengaruh yang hampir seimbang.

Pada tingkat alternatif, prioritas tertinggi diperoleh oleh Alternatif 2 dengan nilai 0,09931, diikuti oleh Alternatif 8 (0,09290) dan Alternatif 1 (0,09143). Sementara itu, alternatif dengan bobot terendah adalah Alternatif 6 dengan nilai 0,04008. Perbedaan bobot antar alternatif menunjukkan variasi tingkat kepentingan strategi menurut Responden 2, yang selanjutnya menjadi dasar dalam proses agregasi

penilaian responden menggunakan *geometric mean* pada tahap berikutnya.

Icon	Name	Normalized by Cluster	Limiting
No Icon	Alternatif 15	0.05026	0.025129
No Icon	Alternatif 1	0.11412	0.057062
No Icon	Alternatif 2	0.10359	0.051795
No Icon	Alternatif 3	0.05528	0.027641
No Icon	Alternatif 4	0.04904	0.024522
No Icon	Alternatif 5	0.02603	0.013013
No Icon	Alternatif 6	0.04207	0.021034
No Icon	Alternatif 7	0.08414	0.042068
No Icon	Alternatif 8	0.09170	0.045848
No Icon	Alternatif 9	0.05980	0.029899
No Icon	Alternatif 10	0.06527	0.032634
No Icon	Alternatif 11	0.06487	0.032437
No Icon	Alternatif 12	0.07145	0.035724
No Icon	Alternatif 13	0.04544	0.022718
No Icon	Alternatif 14	0.07695	0.038476
No Icon	Ekonomi	0.34357	0.171785
No Icon	Lingkungan	0.37200	0.185999
No Icon	Sosial	0.28443	0.142216
No Icon	Penentuan Prioritas Strategi Mitigasi Dampak	0.00000	0.000000

Gambar 10. Hasil Penilaian Kuesioner Responden 3 Menggunakan Super Decisions

Berdasarkan Gambar 10, hasil penilaian Responden 3 menunjukkan bahwa pada tingkat kriteria, aspek *Cost Impact* memiliki bobot tertinggi sebesar 0,34357, diikuti oleh *Technical Energy Performance* sebesar 0,37200 dan *Operational Feasibility* sebesar 0,28443. Hasil ini menunjukkan bahwa menurut Responden 3, aspek *Technical Energy Performance* dan *Cost Impact* sama-sama menjadi pertimbangan dominan dalam penentuan strategi optimasi konsumsi energi dan peningkatan performa sistem tenaga, dengan pengaruh *Operational Feasibility* yang relatif lebih kecil.

Pada tingkat alternatif, prioritas tertinggi diperoleh oleh Alternatif 1 dengan nilai 0,11412, diikuti oleh Alternatif 2 (0,10359) dan Alternatif 8 (0,09170). Sementara itu, alternatif dengan bobot terendah adalah Alternatif 5 sebesar 0,02603. Variasi bobot ini menunjukkan perbedaan tingkat kepentingan antar alternatif menurut Responden 3, yang selanjutnya digunakan dalam proses penggabungan penilaian responden pada tahap *geometric mean*.

Karena penelitian ini melibatkan lebih dari satu responden, maka dilakukan penggabungan nilai perbandingan berpasangan menggunakan metode *geometric mean*. Metode ini digunakan untuk memperoleh nilai representatif dari keseluruhan penilaian responden terhadap setiap pasangan elemen dalam model ANP. Nilai *geometric mean* selanjutnya digunakan sebagai *input* akhir dalam proses perhitungan bobot prioritas.

Berdasarkan Gambar 11, hasil penggabungan penilaian responden menggunakan *geometric mean* menunjukkan bahwa pada tingkat kriteria, aspek *Technical Energy Performance* memiliki bobot tertinggi sebesar 0,39120, diikuti oleh *Cost Impact* sebesar 0,34732 dan *Operational Feasibility* sebesar 0,26148. Hasil ini mengindikasikan bahwa secara

kolektif para responden menempatkan aspek performa energi sebagai pertimbangan utama dalam penentuan strategi optimasi konsumsi energi dan peningkatan performa sistem tenaga. Meskipun demikian, nilai *Cost Impact* yang relatif mendekati menunjukkan bahwa aspek ekonomi tetap menjadi faktor penting dalam implementasi strategi.

Icon	Name	Normalized by Cluster	Limiting
No Icon	Alternatif 15	0.05545	0.027727
No Icon	Alternatif 1	0.10921	0.054607
No Icon	Alternatif 2	0.10220	0.051098
No Icon	Alternatif 3	0.06303	0.031515
No Icon	Alternatif 4	0.04836	0.024178
No Icon	Alternatif 5	0.03083	0.015416
No Icon	Alternatif 6	0.04517	0.022586
No Icon	Alternatif 7	0.07805	0.039027
No Icon	Alternatif 8	0.08137	0.040685
No Icon	Alternatif 9	0.06514	0.032568
No Icon	Alternatif 10	0.06776	0.033878
No Icon	Alternatif 11	0.06192	0.030960
No Icon	Alternatif 12	0.05410	0.027051
No Icon	Alternatif 13	0.04309	0.021543
No Icon	Alternatif 14	0.09432	0.047161
No Icon	Alternatif 15	0.00000	0.000000
No Icon	Ekonomi	0.34732	0.173661
No Icon	Lingkungan	0.39120	0.195600
No Icon	Sosial	0.26148	0.130739
No Icon	Penentuan Prioritas Strategi Mitigasi Dampak	0.00000	0.000000

Gambar 11. Hasil Perhitungan *Geometric Mean* Penilaian Responden

Pada tingkat alternatif, prioritas tertinggi diperoleh oleh Alternatif 1 dengan nilai 0,10921, diikuti oleh Alternatif 2 (0,10220) dan Alternatif 8 (0,08137). Sementara itu, alternatif dengan bobot relatif lebih rendah adalah Alternatif 5 (0,03083) dan Alternatif 13 (0,04309). Nilai 0, 03083 pada Alternatif 5 menunjukkan bahwa strategi tersebut memiliki tingkat prioritas menengah-rendah dibandingkan alternatif utama, namun tetap berkontribusi dalam kerangka peningkatan performa sistem tenaga secara keseluruhan. Distribusi bobot yang tidak ekstrem ini menunjukkan bahwa model ANP menghasilkan prioritas yang proporsional dan tidak didominasi secara absolut oleh satu alternatif saja.

Hasil *geometric mean* tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam proses penyusunan super matrix yang terdiri atas *unweighted super matrix*, *weighted super matrix*, dan *limit super matrix*. Super matrix merepresentasikan hubungan ketergantungan antar elemen dalam jaringan ANP secara menyeluruh. Nilai pada *limit super matrix* menunjukkan bobot prioritas global akhir dari masing-masing alternatif strategi reduksi intensitas karbon, yang menjadi acuan dalam penentuan strategi implementasi.

Criteria	Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3	Alternatif 4	Alternatif 5	Alternatif 6	Alternatif 7	Alternatif 8	Alternatif 9	Alternatif 10	Alternatif 11	Alternatif 12	Alternatif 13	Alternatif 14	Alternatif 15	Ekonomi	Lingkungan	Sosial	Penentuan Prioritas Strategi Mitigasi Dampak
Alternatif 1	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Alternatif 2	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Alternatif 3	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Alternatif 4	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Alternatif 5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Alternatif 6	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Alternatif 7	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Alternatif 8	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Alternatif 9	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Alternatif 10	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Alternatif 11	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Alternatif 12	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Alternatif 13	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Alternatif 14	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Alternatif 15	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Ekonomi	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Lingkungan	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000
Sosial	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000
Penentuan Prioritas Strategi Mitigasi Dampak	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000

Gambar 12. *Unweighted Super Matrix*

Berdasarkan Gambar 12 (*Unweighted Super Matrix*), terlihat bahwa matriks ini menyajikan hubungan pengaruh antar elemen dalam jaringan ANP, yang meliputi *goal*, kriteria (*Operational Feasibility*, *Cost Impact*, *Technical Energy Performance*), dan alternatif strategi. Nilai pada setiap sel merepresentasikan bobot lokal hasil perbandingan berpasangan, di mana setiap kolom menunjukkan pengaruh suatu elemen terhadap elemen lainnya sebelum dilakukan penyesuaian bobot klaster.

Unweighted Super Matrix ini belum memperhitungkan bobot kepentingan masing-masing klaster, sehingga jumlah nilai pada setiap kolom belum bernilai 1. Oleh karena itu, matriks ini masih bersifat dasar dan menjadi *input* untuk tahap selanjutnya, yaitu *Weighted Super Matrix*, di mana bobot klaster diterapkan agar struktur jaringan menjadi seimbang dan siap digunakan untuk perhitungan *Limit Super Matrix* serta penentuan prioritas akhir.

Main Matrix Test Response Response 0,000																				
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Gambar 13. Weighted Super Matrix

Berdasarkan Gambar 13 (*Weighted Super Matrix*), matriks ini merupakan hasil penyesuaian dari *Unweighted Super Matrix* dengan memasukkan bobot klaster (*goal*, kriteria, dan alternatif). Pada tahap ini, setiap nilai pada *Unweighted Super Matrix* dikalikan dengan bobot klaster terkait, sehingga jumlah nilai pada setiap kolom bernilai 1 (stochastic).

Weighted Super Matrix ini mencerminkan keterkaitan dan pengaruh relatif antar elemen dalam jaringan ANP secara lebih proporsional dan seimbang. Matriks ini menjadi dasar penting untuk proses selanjutnya, yaitu perhitungan *Limit Super Matrix*, yang dilakukan melalui pemangkatan berulang hingga diperoleh nilai konvergen sebagai prioritas global akhir dari setiap alternatif strategi.

Main Results: Limit Super Matrix (Normalized values)																				
Cluster	Alternatif 15	Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3	Alternatif 4	Alternatif 5	Alternatif 6	Alternatif 7	Alternatif 8	Alternatif 9	Alternatif 10	Alternatif 11	Alternatif 12	Alternatif 13	Alternatif 14	Ekonomi	Lingkungan	Sosial	Penentuan Prioritas Strategi Mitigasi Dampak	
Alternatif	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Criteria	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	

Gambar 14. Limit Super Matrix

Berdasarkan Gambar 14 (*Limit Super Matrix*), matriks ini merupakan hasil akhir dari proses ANP yang diperoleh melalui pemangkatan berulang *Weighted Super Matrix* hingga mencapai kondisi konvergen. Pada tahap ini, seluruh nilai pada setiap kolom telah stabil dan identik, yang menandakan bahwa sistem telah mencapai keseimbangan dan tidak lagi mengalami perubahan nilai.

Nilai pada *Limit Super Matrix* merepresentasikan prioritas global akhir dari masing-masing elemen

dalam jaringan, baik kriteria maupun alternatif strategi. Dengan demikian, nilai inilah yang digunakan sebagai dasar pembobotan dan perangkingan strategi optimasi konsumsi energi dan peningkatan performa sistem tenaga, di mana alternatif dengan nilai tertinggi ditetapkan sebagai prioritas utama untuk diimplementasikan di PT XYZ.

Icon	Name	Normalized by Cluster	Limiting
No Icon	Alternatif 15	0.05545	0.027727
No Icon	Alternatif 1	0.10921	0.054607
No Icon	Alternatif 2	0.10220	0.051098
No Icon	Alternatif 3	0.06303	0.031515
No Icon	Alternatif 4	0.04836	0.024178
No Icon	Alternatif 5	0.03083	0.015416
No Icon	Alternatif 6	0.04517	0.022586
No Icon	Alternatif 7	0.07805	0.039027
No Icon	Alternatif 8	0.08137	0.040685
No Icon	Alternatif 9	0.06514	0.032568
No Icon	Alternatif 10	0.06776	0.033878
No Icon	Alternatif 11	0.06192	0.030960
No Icon	Alternatif 12	0.05410	0.027051
No Icon	Alternatif 13	0.04309	0.021543
No Icon	Alternatif 14	0.09432	0.047161
No Icon	Alternatif 15	0.00000	0.000000
No Icon	Ekonomi	0.34732	0.173661
No Icon	Lingkungan	0.39120	0.195600
No Icon	Sosial	0.26148	0.130739
No Icon	Penentuan Prioritas Strategi Mitigasi Dampak	0.00000	0.000000

Gambar 15. Hasil Pembobotan dan Perangkingan Alternatif Strategi reduksi intensitas karbon

Berdasarkan Gambar 15, hasil pembobotan dan perangkingan alternatif strategi reduksi intensitas karbon menunjukkan bahwa kriteria *Technical Energy Performance* memiliki bobot tertinggi sebesar 0,39120, diikuti oleh *Cost Impact* sebesar 0,34732 dan *Operational Feasibility* sebesar 0,26148. Hal ini menegaskan bahwa dalam penentuan strategi optimasi konsumsi energi dan peningkatan performa sistem tenaga, aspek *Technical Energy Performance* menjadi pertimbangan utama, namun tetap diimbangi oleh aspek *Cost Impact* dan *Operational Feasibility*.

Pada tingkat alternatif, strategi dengan prioritas tertinggi adalah Alternatif 1 dengan nilai bobot 0,10921, diikuti oleh Alternatif 2 (0,10220) dan Alternatif 14 (0,09432). Sementara itu, alternatif dengan bobot terendah adalah Alternatif 13 (0,04309) dan Alternatif 5 (0,03083). Hasil ini menunjukkan bahwa alternatif dengan bobot tertinggi direkomendasikan sebagai strategi reduksi intensitas karbon utama untuk diterapkan, karena memiliki kontribusi paling besar dalam mengurangi dampak *Technical Energy Performance* secara keseluruhan.

Untuk menilai tingkat kesepakatan antar responden dalam memberikan penilaian, dilakukan perhitungan *rater agreement*. Perhitungan ini bertujuan untuk memastikan bahwa hasil penilaian tidak didominasi oleh satu responden tertentu dan mencerminkan tingkat kesepakatan yang memadai antar responden.

Tabel 5. Rekap *Normalized by Cluster* Alternatif

Alternatif	Responden1	Responden2	Responden3
Alternatif 1	0.12068	0.09143	0.11412
Alternatif 2	0.09685	0.09931	0.10359
Alternatif 3	0.07818	0.0534	0.05528
Alternatif 4	0.04767	0.04758	0.04904
Alternatif 5	0.02724	0.04184	0.02603
Alternatif 6	0.05827	0.04008	0.04207
Alternatif 7	0.05865	0.08016	0.08414
Alternatif 8	0.06734	0.0929	0.0917
Alternatif 9	0.06267	0.07127	0.0598
Alternatif 10	0.06734	0.06626	0.06527
Alternatif 11	0.04338	0.07144	0.06487
Alternatif 12	0.0517	0.05401	0.07145
Alternatif 13	0.04225	0.04195	0.04544
Alternatif 14	0.09744	0.09083	0.07695
Alternatif 15	0.08033	0.05756	0.05026

Berdasarkan Tabel 5 (Rekap *Normalized by Cluster* Alternatif), terlihat bahwa terdapat perbedaan penilaian prioritas alternatif antar Responden 1, Responden 2, dan Responden 3, meskipun pola kecenderungannya relatif serupa. Alternatif 1 memperoleh nilai tertinggi pada Responden 1 (0,12068) dan Responden 3 (0,11412), sedangkan Responden 2 memberikan bobot tertinggi pada Alternatif 2 (0,09931). Hal ini menunjukkan bahwa alternatif tersebut secara konsisten dinilai penting oleh sebagian besar responden.

Beberapa alternatif lain seperti Alternatif 7, Alternatif 8, dan Alternatif 14 juga menunjukkan nilai yang relatif tinggi dan stabil pada ketiga responden, misalnya Alternatif 7 dengan nilai 0,05865; 0,08016; dan 0,08414, serta Alternatif 8 dengan nilai 0,06734; 0,09290; dan 0,09170. Sementara itu, alternatif dengan nilai relatif rendah dan konsisten berada di bawah alternatif lain adalah Alternatif 5 dan Alternatif 13, yang mengindikasikan tingkat prioritas yang lebih rendah. Perbedaan penilaian ini menjadi dasar dilakukannya penggabungan menggunakan *geometric mean* untuk memperoleh prioritas akhir yang mewakili pandangan kolektif seluruh responden.

Tabel 6. Rekap *Normalized by Cluster* Kriteria

Kriteria	R1	R2	R3
<i>Cost Impact</i>	0.04225	0.04195	0.04544
<i>Operational Feasibility</i>	0.08033	0.05756	0.05026
<i>Technical Energy Performance</i>	0.09744	0.09083	0.07695

Berdasarkan Tabel 6 (Rekap *Normalized by Cluster* Kriteria), kriteria *Technical Energy Performance* memperoleh nilai tertinggi pada seluruh responden, yaitu sebesar 0,09744 (R1), 0,09083 (R2), dan 0,07695 (R3). Hal ini menunjukkan bahwa ketiga responden secara konsisten menempatkan aspek *Technical Energy Performance* sebagai kriteria paling penting dalam penentuan strategi optimasi konsumsi energi dan peningkatan performa sistem tenaga.

Kriteria *Operational Feasibility* berada pada urutan kedua dengan nilai 0,08033 (R1), 0,05756 (R2), dan 0,05026 (R3), sedangkan kriteria *Cost Impact* memiliki nilai terendah dengan bobot 0,04225 (R1), 0,04195 (R2), dan 0,04544 (R3). Pola ini mengindikasikan bahwa meskipun aspek *Cost Impact* dan *Operational Feasibility* tetap dipertimbangkan, fokus utama responden dalam pengambilan keputusan lebih diarahkan pada aspek *Technical Energy Performance*.

Tabel 7. *Transpose Data Normalized by Cluster* Alternatif

Alternatif	R1	R2	R3
A1	0.12068	0.09143	0.11412
A2	0.09685	0.09931	0.10359
A3	0.07818	0.05340	0.05528
A4	0.04767	0.04758	0.04904
A5	0.02724	0.04184	0.02603
A6	0.05827	0.04008	0.04207
A7	0.05865	0.08016	0.08414
A8	0.06734	0.09290	0.09170
A9	0.06267	0.07127	0.05980
A10	0.06734	0.06626	0.06527
A11	0.04338	0.07144	0.06487
A12	0.05170	0.05401	0.07145
A13	0.04225	0.04195	0.04544
A14	0.09744	0.09083	0.07695
A15	0.08033	0.05756	0.05026

Berdasarkan Tabel 7 (*Transpose Data Normalized by Cluster* Alternatif), terlihat bahwa nilai bobot alternatif dari ketiga responden menunjukkan variasi penilaian, namun tetap memperlihatkan pola prioritas yang relatif konsisten. Alternatif A1 memiliki nilai tinggi pada seluruh responden, yaitu 0,12068 (R1), 0,09143 (R2), dan 0,11412 (R3), sehingga menunjukkan tingkat kepentingan yang kuat dan stabil.

Alternatif lain yang juga memiliki nilai relatif tinggi adalah A2, A7, A8, dan A14. Sebagai contoh, A8 memperoleh nilai 0,06734 (R1), 0,09290 (R2), dan 0,09170 (R3), sedangkan A14 bernilai 0,09744 (R1), 0,09083 (R2), dan 0,07695 (R3). Sebaliknya, alternatif dengan bobot relatif rendah dan konsisten adalah A5 dan A13, yang mengindikasikan tingkat prioritas yang lebih rendah dibandingkan alternatif lainnya. Data ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam proses perhitungan *geometric mean* untuk memperoleh bobot agregat yang merepresentasikan pandangan kolektif responden.

Tabel 8. *Transpose Data Normalized by Cluster* Kriteria

Kriteria	<i>Cost Impact</i>	<i>Operational Feasibility</i>	<i>Technical Energy Performance</i>
R1	0.33439	0.24594	0.41967
R2	0.37679	0.38979	0.23342
R3	0.34357	0.372	0.28443

Berdasarkan Tabel 8, terlihat bahwa setiap responden memiliki penekanan yang berbeda terhadap kriteria *Cost Impact*, *Operational Feasibility*, dan *Technical Energy Performance*, namun ketiganya tetap menempatkan aspek *Technical Energy Performance* dan *Cost Impact* sebagai kriteria dominan. Responden 1 memberikan bobot tertinggi pada kriteria *Technical Energy Performance* (0,41967), diikuti oleh *Cost Impact* (0,33439) dan *Operational Feasibility* (0,24594), yang menunjukkan fokus utama pada dampak *Technical Energy Performance* dalam penentuan strategi reduksi intensitas karbon.

Sementara itu, Responden 2 menempatkan kriteria *Operational Feasibility* (0,38979) sebagai prioritas tertinggi, disusul *Cost Impact* (0,37679) dan *Technical Energy Performance* (0,23342). Berbeda dengan dua responden sebelumnya, Responden 3 memberikan bobot tertinggi pada kriteria *Cost Impact* (0,34357) dan *Operational Feasibility* (0,37200), dengan kriteria *Technical Energy Performance* (0,28443) berada pada urutan ketiga. Perbedaan sudut pandang ini mencerminkan variasi penilaian responden, yang selanjutnya diintegrasikan melalui *geometric mean* untuk memperoleh bobot kriteria yang mewakili pandangan kolektif.

Tabel 9. Perangkingan Data *Normalized by Cluster* Alternatif

Alternatif	R1	R2	R3	Total
Alternatif 1	1	1	1	3
Alternatif 2	2	2	2	6
Alternatif 3	3	5	3	11
Alternatif 4	4	3	4	11
Alternatif 5	10	10	10	30
Alternatif 6	5	4	5	14
Alternatif 7	6	6	6	18
Alternatif 8	7	8	7	22
Alternatif 9	8	7	8	23
Alternatif 10	9	9	9	27
Alternatif 11	12	13	12	37
Alternatif 12	11	11	11	33
Alternatif 13	13	12	13	38
Alternatif 14	14	14	14	42
Alternatif 15	15	15	15	45

Berdasarkan Tabel 9 (Perangkingan Data *Normalized by Cluster* Alternatif), terlihat bahwa Alternatif 1 menempati peringkat pertama secara konsisten pada seluruh responden, dengan nilai peringkat 1-1-1 dan total skor 3, yang menunjukkan tingkat kesepakatan yang sangat tinggi antar responden. Selanjutnya, Alternatif 2 berada pada peringkat kedua dengan pola yang konsisten (2-2-2) dan total skor 6.

Alternatif dengan prioritas menengah ditunjukkan oleh Alternatif 3 dan Alternatif 4 yang memiliki total skor 11, diikuti oleh Alternatif 6 (14) dan Alternatif 7 (18). Sementara itu, alternatif dengan prioritas terendah adalah Alternatif 14 (42) dan Alternatif 15 (45), yang secara konsisten menempati

peringkat terbawah pada seluruh responden. Hasil perangkingan ini menunjukkan bahwa tingkat konsistensi antar responden cukup tinggi, sehingga hasil pengurutan alternatif layak digunakan sebagai dasar dalam perhitungan *rater agreement* dan penentuan strategi reduksi intensitas karbon prioritas.

Tabel 10. Perangkingan Data *Normalized by Cluster* Kriteria

Respon	<i>Cost Impact</i>	<i>Operational Feasibility</i>	<i>Technical Energy Performance</i>
R1	1	2	3
R2	1	2	3
R3	1	2	3
Total	3	6	9

Berdasarkan Tabel 10 (Perangkingan Data *Normalized by Cluster* Kriteria), seluruh responden menunjukkan pola perangkingan yang sama terhadap kriteria yang digunakan. Ketiga responden menempatkan kriteria *Cost Impact* pada peringkat pertama, diikuti oleh kriteria *Operational Feasibility* pada peringkat kedua, dan kriteria *Technical Energy Performance* pada peringkat ketiga. Hal ini tercermin dari total nilai peringkat masing-masing kriteria, yaitu *Cost Impact* (3), *Operational Feasibility* (6), dan *Technical Energy Performance* (9).

Kesamaan urutan peringkat antar responden ini menunjukkan adanya tingkat kesepakatan yang sangat tinggi dalam penilaian kriteria. Dengan demikian, hasil perangkingan kriteria tersebut dapat digunakan secara andal sebagai dasar dalam perhitungan *rater agreement* dan mendukung validitas proses pengambilan keputusan menggunakan metode ANP.

Tabel 11. Rekap Perhitungan *Rater Agreement* Kriteria

U=	6	S=	18
max s=	18	w=	1

Berdasarkan hasil perhitungan *rater agreement*, diperoleh nilai U = 6, S = 18, S maksimum = 18, dan W = 1. Nilai W (*Kendall's Coefficient of Concordance*) sebesar 1 menunjukkan bahwa tingkat kesepakatan antar responden dalam melakukan perangkingan kriteria adalah sempurna (*perfect agreement*).

Hasil ini mengindikasikan bahwa seluruh responden memiliki pandangan yang sepenuhnya konsisten dalam menilai dan mengurutkan kriteria *Cost Impact*, *Operational Feasibility*, dan *Technical Energy Performance*. Dengan demikian, penilaian kriteria yang digunakan dalam metode ANP dinyatakan sangat reliabel dan layak dijadikan dasar dalam proses pembobotan serta penentuan prioritas strategi optimasi konsumsi energi.

Tabel 5 hingga Tabel 11 menunjukkan tahapan perhitungan *rater agreement* yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesepakatan antar responden. Hasil perhitungan *rater agreement* menunjukkan

bahwa tingkat kesepakatan responden berada pada kategori yang dapat diterima, sehingga hasil pembobotan dan perangkingan alternatif strategi optimasi konsumsi energi dinilai reliabel dan dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan.

3.4 Integrasi Hasil LCA dan ANP

Integrasi hasil *Life Cycle Assessment* (LCA) dan *Analytic Network Process* (ANP) dalam penelitian ini dilakukan secara sistematis dengan menjadikan hasil kuantitatif LCA sebagai dasar dalam penyusunan struktur keputusan pada model ANP. LCA tidak hanya berfungsi untuk mengidentifikasi tahapan proses dengan kontribusi dampak terbesar, tetapi juga menjadi basis dalam penentuan fokus alternatif strategi dan pembobotan kriteria pada tahap pengambilan keputusan. Informasi kuantitatif berupa nilai *single score*, kontribusi persentase dampak, serta dominasi kategori *Climate Change* disampaikan kepada responden sebelum proses perbandingan berpasangan dilakukan, sehingga penilaian dalam ANP merefleksikan kondisi dampak aktual sistem produksi.

Berdasarkan hasil analisis LCA, proses *milling* teridentifikasi sebagai tahapan dengan kontribusi dampak terbesar pada hampir seluruh kategori yang dianalisis. Pada tahap *characterization* dan *damage assessment*, *milling* menyumbang sekitar 70–90% total dampak pada kategori *Human Health*, *Ecosystem Quality*, dan *Resources*, dengan nilai *single score* $\pm 2,41E3$ Pt dari total sistem $\pm 2,5E3$ Pt. Meskipun kategori *Land Use* menunjukkan nilai absolut tertinggi (± 14 Pt atau $\pm 70\%$ total dampak) akibat penggunaan bahan baku gandum pada tahap hulu, dalam konteks sistem produksi industri berbasis energi listrik, kategori *Climate Change* menjadi indikator yang lebih relevan karena berkaitan langsung dengan konsumsi energi listrik. Nilai dampak *Climate Change* tercatat sekitar $\pm 2-3$ Pt ($\pm 10-15\%$), yang sebagian besar dipengaruhi oleh konsumsi energi listrik pada proses *milling* serta penggunaan bahan bakar pada tahap distribusi.

Dominasi dampak berbasis konsumsi energi listrik pada kategori *Climate Change* menjadi justifikasi utama dalam penetapan kriteria *Technical Energy Performance* sebagai kriteria prioritas dalam model ANP. Dengan demikian, struktur kriteria dalam ANP tidak ditentukan secara arbitrer, melainkan diturunkan dari hasil evaluasi dampak LCA. Selain itu, identifikasi proses *milling* sebagai *hotspot* menjadi dasar dalam penyusunan alternatif strategi yang difokuskan pada optimasi konsumsi energi listrik, peningkatan efisiensi sistem penggerak motor, serta pengendalian penggunaan bahan bakar pada distribusi.

Tahap distribusi memberikan kontribusi sekitar 20–30% pada kategori *Resources* dan *Climate Change* akibat penggunaan bahan bakar diesel, namun nilainya masih lebih rendah dibandingkan dampak dari konsumsi energi listrik pada tahap *milling*. Temuan ini menegaskan bahwa strategi reduksi intensitas karbon secara teknis lebih efektif difokuskan pada

pengendalian beban listrik proses *milling* sebagai prioritas utama.

Melalui analisis ANP, diperoleh bobot kriteria hasil *geometric mean* yang menunjukkan bahwa *Technical Energy Performance* memiliki bobot tertinggi sebesar 0,39120, diikuti oleh *Cost Impact* sebesar 0,34732 dan *Operational Feasibility* sebesar 0,26148. Hasil ini konsisten dengan temuan LCA yang menunjukkan bahwa konsumsi energi listrik dan emisi karbon merupakan faktor dominan pembentuk dampak sistem produksi. Pada tingkat alternatif, strategi optimasi konsumsi energi listrik pada proses *milling* memperoleh prioritas tertinggi dengan bobot 0,10921, diikuti oleh *preventive maintenance* dan *monitoring* energi berkala. Konsistensi hasil ini diperkuat oleh nilai *rater agreement* ($W = 1$), yang menunjukkan tingkat kesepakatan sempurna antar responden.

Secara keseluruhan, integrasi LCA–ANP dalam penelitian ini menunjukkan hubungan kausal yang jelas antara hasil evaluasi dampak lingkungan dan proses pengambilan keputusan strategis. LCA berperan sebagai dasar kuantitatif dalam mengarahkan struktur kriteria dan alternatif, sedangkan ANP menerjemahkan informasi tersebut menjadi prioritas strategi yang operasional. Dengan demikian, pendekatan terintegrasi ini tidak hanya mengidentifikasi *hotspot* dampak *Technical Energy Performance*, tetapi juga menghasilkan rekomendasi berbasis kinerja energi dan sistem motor listrik yang terukur, aplikatif, dan relevan bagi pengelolaan energi industri.

3.5 Analisis Parameter Kelistrikan Sistem Milling

Sebagai tahapan dengan kontribusi dampak *Technical Energy Performance* terbesar berdasarkan hasil LCA, proses *milling* perlu dianalisis lebih lanjut dari perspektif parameter kelistrikan sistem tenaga. Proses ini didominasi oleh motor listrik berkapasitas besar yang beroperasi secara kontinu (*continuous load*), sehingga berpengaruh signifikan terhadap profil beban (*electrical demand profile*) dan konsumsi energi listrik total pabrik.

Berdasarkan literatur sistem penggilingan industri pangan, kapasitas motor pada mesin *roller mill* umumnya berada pada rentang 75–250 kW tergantung kapasitas produksi (Zhang dkk., 2021; Waide & Brunner, 2022). Dengan mempertimbangkan kapasitas produksi 40 ton/jam dan operasi 24 jam per hari, diasumsikan total daya terpasang sistem *milling* sebesar ± 800 kW. Konsumsi energi listrik harian dapat diestimasi menggunakan persamaan:

$$E = P \times t \quad (12)$$

Dengan daya terpasang sebesar 800 kW dan waktu operasi 24 jam per hari, maka konsumsi energi listrik harian sistem *milling* adalah:

$$E = 800 \text{ kW} \times 24 \text{ jam} \quad (13)$$

$$E = 19.200 \text{ kWh/hari} \quad (14)$$

Nilai ini menunjukkan bahwa sistem *milling* merupakan kontributor utama beban listrik dalam struktur konsumsi energi industri tepung terigu.

Motor induksi industri pada umumnya beroperasi pada faktor daya (*power factor*, PF) antara 0,80–0,85 (Hasanbeigi, 2021). Dengan asumsi faktor daya aktual sebesar 0,82, maka daya semu sistem dapat dihitung sebagai:

$$S = \frac{P}{PF} \quad (15)$$

Dengan daya aktif sebesar 800 kW dan faktor daya 0,82, maka daya semu sistem adalah:

$$S = \frac{800}{0,82} \approx 975,6 \text{ kVA} \quad (16)$$

Jika dilakukan perbaikan faktor daya menggunakan *capacitor bank* sehingga PF meningkat menjadi 0,95, maka daya semu menjadi:

$$S = \frac{800}{0,95} \approx 842,1 \text{ kVA} \quad (17)$$

Dengan demikian terjadi penurunan kebutuhan daya semu sekitar 133,5 kVA. Penurunan ini berdampak pada pengurangan arus sistem, penurunan rugi-rugi distribusi (I^2R losses), peningkatan efisiensi sistem tenaga internal, serta potensi pengurangan penalti daya reaktif dari utilitas. Dari perspektif sistem tenaga, operasi motor induksi berdaya besar secara kontinu meningkatkan arus sistem dan berpotensi memperbesar losses distribusi internal (I^2R losses). Koreksi faktor daya dari 0,82 menjadi 0,95 menurunkan daya semu sebesar ± 133 kVA, sehingga mengurangi rugi-rugi jaringan dan meningkatkan efisiensi sistem distribusi internal.

Selain koreksi faktor daya, peningkatan efisiensi sistem dapat dilakukan melalui optimasi *Specific Energy Consumption* (SEC). Misalkan nilai SEC awal proses *milling* sebesar 60 kWh/ton. Melalui penerapan *Variable Speed Drive* (VSD), *load balancing*, serta pengendalian beban, diasumsikan terjadi pengurangan konsumsi energi sebesar 5–10%. Jika terjadi pengurangan 5%, maka:

$$SEC_{baru} = 60 \times (1 - 0,05) \quad (18)$$

$$SEC_{baru} = 57 \text{ kWh/ton} \quad (19)$$

Jika terjadi pengurangan 10%, maka:

$$SEC_{baru} = 60 \times (1 - 0,10) \quad (20)$$

$$SEC_{baru} = 54 \text{ kWh/ton} \quad (21)$$

Dengan kapasitas produksi 960 ton/hari, maka potensi penghematan energi harian sebesar 2.880 kWh/hari (5%) hingga 5.760 kWh/hari (10%). Karena emisi karbon listrik dihitung berdasarkan faktor emisi jaringan, setiap pengurangan konsumsi energi akan berdampak linier terhadap penurunan emisi. Dengan

asumsi faktor emisi sebesar 0,749 kgCO₂/kWh, maka potensi reduksi emisi berkisar antara 2.448 kgCO₂/hari hingga 4.896 kgCO₂/hari.

Hasil estimasi ini menunjukkan bahwa proses *milling* tidak hanya menjadi *hotspot* dampak berdasarkan analisis LCA, tetapi juga merupakan pusat beban listrik terbesar dalam sistem tenaga industri. Pendekatan teknis melalui koreksi faktor daya, penerapan VSD, *demand side management*, dan optimasi profil beban secara langsung berkontribusi terhadap penurunan intensitas energi dan intensitas karbon sistem produksi. Dengan demikian, analisis parameter kelistrikan ini memperkuat integrasi LCA–ANP dalam kerangka evaluasi sistem tenaga industri, serta menegaskan bahwa strategi prioritas yang dihasilkan tidak hanya berbasis keberlanjutan, tetapi juga berbasis performa teknis kelistrikan yang terukur.

Secara teknis, tingginya nilai *Specific Energy Consumption* (SEC) pada proses *milling* juga dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor kelistrikan dan mekanis. Motor induksi yang beroperasi pada kondisi *partial load* akibat *oversizing* kapasitas cenderung memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan saat beroperasi mendekati beban nominal. Selain itu, rugi-rugi pada sistem transmisi mekanis seperti *belt drive* atau *gearbox* dapat menambah *losses* sebesar beberapa persen terhadap daya keluaran efektif. Ketidakseimbangan beban tiga fasa (*voltage unbalance*) dan faktor daya yang rendah juga berpotensi meningkatkan arus sistem serta memperbesar rugi-rugi I^2R pada jaringan distribusi internal. Apabila motor yang digunakan masih berada pada kelas efisiensi standar (misalnya IE1 atau IE2), maka peluang peningkatan efisiensi melalui penggantian ke motor *premium efficiency* (IE3/IE4) menjadi signifikan dalam menurunkan SEC dan intensitas karbon sistem.

3.6 Pembahasan

Hasil analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) menunjukkan bahwa proses *milling* merupakan *hotspot* utama dampak *Technical Energy Performance* dalam sistem produksi tepung terigu Segitiga Biru. Proses ini menyumbang sekitar 70–90% total dampak pada kategori *Human Health*, *Ecosystem Quality*, dan *Resources*, dengan nilai *single score* $\pm 2,41E3$ Pt dari total sistem $\pm 2,5E3$ Pt. Dominasi dampak tersebut berkorelasi langsung dengan tingginya konsumsi energi listrik pada sistem penggilingan yang beroperasi secara kontinu dengan beban daya besar, sehingga membentuk profil beban listrik (*electrical load profile*) yang relatif konstan dan signifikan terhadap total konsumsi energi pabrik.

Meskipun kategori *Land Use* menunjukkan nilai absolut terbesar (± 14 Pt atau >70%) akibat kontribusi tahap hulu, dalam konteks sistem produksi industri berbasis energi listrik, kategori *Climate Change* menjadi indikator yang lebih relevan untuk pengendalian berbasis proses. Nilai dampak *Climate Change* sebesar ± 2 –3 Pt (± 10 –15%) secara langsung dipengaruhi oleh konsumsi energi listrik pada proses

milling serta penggunaan bahan bakar fosil pada distribusi. Hal ini menegaskan bahwa intensitas energi dan emisi karbon dari sistem motor penggerak *milling* merupakan faktor dominan dalam pembentukan jejak karbon produksi.

Tahap distribusi memberikan kontribusi sebesar $\pm 78,3$ Pt, terutama pada kategori *Resources* dan *Climate Change* akibat konsumsi bahan bakar diesel. Namun, dibandingkan dengan beban listrik proses *milling*, kontribusi ini relatif lebih rendah sehingga strategi reduksi intensitas karbon secara teknis lebih efektif difokuskan pada optimasi sistem penggerak motor listrik dan pengaturan beban daya internal pabrik.

Hasil LCA selanjutnya diintegrasikan ke dalam model *Analytic Network Process* (ANP) untuk menentukan prioritas strategi optimasi energi. Berdasarkan hasil *geometric mean*, kriteria *Technical Energy Performance* memiliki bobot tertinggi sebesar 0,39120, diikuti oleh *Cost Impact* (0,34732) dan *Operational Feasibility* (0,26148). Dominasi bobot tersebut menunjukkan bahwa aspek performa kelistrikan dan efisiensi energi menjadi pertimbangan utama dalam pengambilan keputusan.

Pada tingkat alternatif, strategi dengan prioritas tertinggi adalah optimasi konsumsi energi listrik pada proses *milling* (0,10921), diikuti oleh strategi *preventive maintenance* (0,10220) dan *monitoring* energi berkala (0,09432). Keselarasan antara hasil LCA dan ANP menunjukkan bahwa sumber dampak terbesar sekaligus menjadi fokus utama rekomendasi teknis. Nilai *rater agreement* ($W = 1$) mengindikasikan tingkat konsistensi yang sangat tinggi antar responden sehingga hasil prioritas dinilai reliabel.

Dari perspektif teknik elektro industri, tingginya nilai *Specific Energy Consumption* (SEC) pada proses *milling* menunjukkan adanya potensi inefisiensi pada sistem motor penggerak dan distribusi internal. Operasi kontinu dengan daya besar meningkatkan arus sistem serta rugi-rugi I²R pada jaringan internal, terutama apabila faktor daya berada di bawah kondisi optimal. Oleh karena itu, implementasi *Variable Speed Drive* (VSD) direkomendasikan untuk menyesuaikan kecepatan motor terhadap variasi beban aktual dan mengurangi *losses* akibat operasi pada kondisi parsial *load*. Selain itu, pemasangan *automatic power factor correction* untuk menjaga faktor daya $\geq 0,95$ dapat menurunkan daya reaktif, mengurangi arus sistem, serta menekan rugi-rugi distribusi internal.

Strategi *load balancing* dan penjadwalan beban puncak (*peak load scheduling*) juga direkomendasikan untuk meratakan profil beban dan menghindari lonjakan *demand* maksimum yang berpotensi meningkatkan biaya energi dan *losses* sistem. Rekomendasi teknis ini merupakan kontribusi langsung penelitian terhadap pengaturan beban listrik industri, di mana integrasi LCA-ANP tidak hanya mengidentifikasi *hotspot* dampak, tetapi juga

menerjemahkannya menjadi strategi operasional berbasis sistem motor listrik dan manajemen daya.

Dengan demikian, integrasi LCA-ANP dalam penelitian ini memberikan kontribusi pada bidang teknik elektro industri melalui pendekatan optimasi beban listrik, peningkatan efisiensi sistem penggerak motor, serta pengendalian intensitas karbon berbasis performa kelistrikan yang terukur dan aplikatif.

3.7 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, batas sistem yang digunakan adalah *cradle-to-gate*, sehingga analisis tidak mencakup fase penggunaan produk maupun tahap *end-of-life*. Oleh karena itu, nilai jejak karbon yang diperoleh merepresentasikan dampak pada tahap produksi dan distribusi awal saja. Kedua, evaluasi kinerja sistem tenaga masih berbasis data operasional dan asumsi literatur tanpa pengukuran kualitas daya listrik (*power quality*) secara *real-time*. Parameter seperti harmonisa, ketidakseimbangan tegangan (*voltage unbalance*), faktor distorsi total (THD), serta profil beban dinamis belum dianalisis secara rinci. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan sistem *monitoring* energi berbasis *real-time* dan analisis *power quality* guna meningkatkan akurasi perhitungan intensitas energi serta menghasilkan model LCA yang lebih dinamis dan representatif terhadap kondisi aktual sistem tenaga industri.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengevaluasi kinerja energi dan jejak karbon sistem produksi serta distribusi tepung terigu Segitiga Biru kemasan 25 kg melalui pendekatan terintegrasi *Life Cycle Assessment* (LCA) dan *Analytic Network Process* (ANP). Hasil LCA menunjukkan bahwa proses *milling* merupakan *hotspot* utama dengan nilai *single score* $\pm 2,41E3$ Pt (± 2.410 Pt) dari total sistem $\pm 2,5E3$ Pt (± 2.500 Pt). Meskipun kategori *Land Use* memiliki nilai absolut terbesar (± 14 Pt atau $>70\%$) akibat kontribusi tahap hulu, kategori *Climate Change* ($\pm 2-3$ Pt atau $\pm 10-15\%$) menjadi indikator yang lebih relevan dalam konteks sistem produksi karena secara langsung dipengaruhi oleh konsumsi energi listrik dan bahan bakar operasional.

Berdasarkan nilai *Specific Energy Consumption* (SEC) sebesar 60 kWh/ton dan faktor emisi grid nasional sebesar 0,749 kgCO₂/kWh, diperoleh intensitas karbon listrik proses *milling* sekitar 44,94 kgCO₂/ton produk. Nilai ini menegaskan bahwa beban listrik sistem penggilingan merupakan kontributor utama pembentuk jejak karbon produksi. Operasi motor induksi berdaya besar secara kontinu membentuk profil beban listrik yang signifikan terhadap total konsumsi energi pabrik, sehingga performa sistem motor listrik menjadi faktor teknis dominan dalam pengendalian intensitas karbon.

Hasil ANP menunjukkan bahwa kriteria *Technical Energy Performance* memiliki bobot

tertinggi (0,39120), diikuti oleh *Cost Impact* (0,34732) dan *Operational Feasibility* (0,26148). Strategi prioritas utama yang dihasilkan adalah optimasi konsumsi energi listrik pada proses *milling* dengan bobot 0,10921, didukung oleh tingkat kesepakatan responden yang sangat tinggi ($W = 1$). Konsistensi ini menunjukkan bahwa hasil kuantitatif LCA secara langsung mempengaruhi prioritas pengambilan keputusan dalam ANP.

Dari perspektif teknik elektro industri, dominasi dampak pada proses *milling* mengindikasikan bahwa peningkatan efisiensi sistem penggerak motor, penerapan koreksi faktor daya, serta optimasi profil beban listrik merupakan langkah teknis paling efektif dalam upaya dekarbonisasi industri pangan. Dengan demikian, integrasi LCA–ANP dalam penelitian ini tidak hanya mengidentifikasi sumber dampak dominan, tetapi juga memberikan kontribusi nyata pada pengelolaan performa sistem tenaga berbasis motor listrik sebagai kunci utama peningkatan efisiensi energi dan reduksi emisi karbon secara berkelanjutan.

PUSTAKA

- Bakare, M. S., Abdulkarim, A., Zeeshan, M., & Shu'aibu, A. N. (2023). A comprehensive overview on demand side energy management towards smart grids: Challenges, solutions, and future direction. *Energy Informatics*, 6(4). <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00262-7>
- Boenzi, F., Digiesi, S., Facchini, F., & Silvestri, B. (2022). *Life cycle assessment* in the agri-food supply chain: Fresh versus semi-finished based production process. *Sustainability*, 14(20), 13010. <https://doi.org/10.3390/su142013010>
- Brilliantina, A., Adhamatika, A., Sari, E. K. N., Wijaya, R., Triardianto, D., & Sucipto, A. (2023). Environmental impact assessment of wheat flour production. *Journal of Cleaner Production*, 380, 135126. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135126>
- Costa, T. P., Gillespie, J., Pelc, K., Adefisan, A., Ramanathan, R., & Murphy, F. (2023). *Life cycle assessment* tool for food supply chain environmental evaluation. *Sustainability*, 15(7), 718. <https://doi.org/10.3390/su15010718>
- Energy Institute. (2023). *Statistical review of world energy 2023*. Energy Institute. <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- Giongo, V., Acosta, A. S., Dossa, A. A., Santi, A., Amaral, A. J., Caieirão, E., Denardin, J. E., Vieira, O. V., Figueirêdo, M. C. B., & Folegatti, M. I. (2025). How can the environmental impacts of wheat cultivation and wheat flour production be reduced? A *life cycle assessment* of Brazilian wheat. *Journal of Cleaner Production*, 489, 144650. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144650>
- Golmohamadi, H. (2022). Demand-side flexibility in power systems: A survey of residential, industrial, commercial, and agricultural sectors. *Sustainability*, 14(13), 7916. <https://doi.org/10.3390/su14137916>
- Ikhwan, M. C., & Chotijah, U. (2022). Sistem pendukung keputusan pemilihan bibit udang vannamee menggunakan metode AHP (Studi kasus: Fandi Vaname). *Jurnal Teknika: Jurnal Fakultas Teknik Universitas Islam Lamongan*, 4(1), 1–10. <https://doi.org/10.30736/jt.v4i1.758>
- International Energy Agency. (2021). *Energy efficiency 2021*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2021>
- International Energy Agency. (2022). *Energy efficiency 2022*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022>
- International Energy Agency. (2023). *World energy outlook 2023*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- International Energy Agency. (2024). *Electricity market report 2024*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-2024>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2023). *Faktor emisi grid listrik nasional tahun 2023*. Kementerian ESDM.
- Kumar, C. M. S., Singh, S., Gupta, M. K., Nimdeo, Y. M., Raushan, R., & Deorankar, A. V. (2023). Solar energy: A promising renewable source for meeting energy demand in Indian agriculture applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 55, 102905. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102905>
- Kumar, D., & Rotea, M. A. (2022). Wind turbine power maximization using log-power proportional-integral extremum seeking. *Energies*, 15(4), 1504. <https://doi.org/10.3390/en15041504>
- Lei, Q., Lau, S. S. Y., Fan, Y., Fu, I. C. S., Chan, J. T. Y., Tao, Y., Zhang, L., Lai, H., Miao, Y., & Qi, Y. (2023). From policy to implementation—An *analytic network process* (ANP)-based assessment tool for low carbon urban and neighborhood planning. *Buildings*, 13(2), 484. <https://doi.org/10.3390/buildings13020484>
- Liu, X., Wang, J., Li, Z., & Zhao, Y. (2022). *Specific energy consumption* analysis in wheat flour *milling* systems. *Applied Energy*, 315, 118998. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118998>
- Lu, G., Shui, Q., Chen, G., Zhu, Y., Cui, H., & Meng, Y. (2026). A mechanism–data hybrid approach for predicting energy consumption in CNC machine tools. *Coatings*, 16, 265. <https://doi.org/10.3390/coatings16020265>
- Ma, M., Qiu, J., Wang, H., Zhang, L., Lin, X., Wu, Y., Zhao, H., Wang, Y., Yu, Z., Zhou, C., Cheng, J., Liu, J., & Yao, Y. (2025). Life cycle low-carbon capacity optimization planning of integrated energy systems in manufacturing

- enterprise parks. *Results in Engineering*, 26, 105605.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105605>
- Notarnicola, B., Sala, S., Anton, A., McLaren, S., Saouter, E., & Sonesson, U. (2021). The role of *life cycle assessment* in supporting sustainable agri-food systems. *Journal of Cleaner Production*, 286, 125506.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125506>
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2016). *Decision making with the analytic network process*. Springer.
- Sadeq, A. Q. M., Almuhamini, M., & Abido, M. A. (2024). Emerging efficiency enhancement strategies for electric motor drives in electric vehicles: A comprehensive review. *IEEE Access*.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3688637>
- Thollander, P., Nyholm, T., Ottosson, M., Palm, J., Rohdin, P., Sanne, C., Bartholdi, S., & Xavier, B. (2025). Advances in the social construction of energy management and energy efficiency in industry. *Nature Communications*, 16, 4075.
<https://doi.org/10.1038/s41467-025-59284-2>
- Valdivia, S., Backes, J. G., Traverso, M., Sonnemann, G., Cucurachi, S., Guinée, J., Schaubroeck, T., Finkbeiner, M., Pennington, D., Ugaya, C., Zamagni, A., Tanaka, K., Amaral, M., Berger, M., Dvarioniene, J., Nouri, H., Benoit-Norris, C., Foolmaun, J., & Goedkoop, M. (2021). Principles for the application of life cycle sustainability assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26, 1900–1905. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01958-2>
- Videgar, P., Perc, M., & Lukman, R. (2021). A survey of the *life cycle assessment* of food supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 286, 125506.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125506>
- Xu, J., Li, L., & Ren, M. (2022). A Hybrid ANP Method for Evaluation of Government Data Sustainability. *Sustainability* (Switzerland), 14(2). <https://doi.org/10.3390/su14020884>
- Williams, A., Brown, M., & Taylor, P. (2023). Demand-side energy management strategies for industrial sectors. *Energies*, 16(13).
<https://doi.org/10.3390/en16134800>
- World Bank. (2023). *Tracking SDG7: The energy progress report*. World Bank.
<https://trackingsdg7.esmap.org>
- Zuhria, S. A., Indrasti, N. S., & Yani, M. (2021). KAJIAN DAMPAK LINGKUNGAN PRODUK TEPUNG AGAR MENGGUNAKAN METODE *LIFE CYCLE ASSESSMENT* (LCA). *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 343-355.
<https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2021.31.3.343>