

Penilaian Sustainable Supply Chain Management Dengan Metode Life Cycle Assessment (Studi Kasus: Produk Tepung Bumbu, PT XYZ)

Moch. Annas Hidayatulloh⁽¹⁾, Dira Ernawati⁽²⁾, Sinta Dewi⁽³⁾

Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur
Jl. Rungkut Madya, Kec. Gunung Anyar, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia

Email: ¹21032010111@student.upnjatim.ac.id, ²dira.ti@upnjatim.ac.id,
³sinta.dewi.ti@upnjatim.ac.id

Tersedia Online di

<http://www.jurnal.unublitar.ac.id/index.php/briliant>

Sejarah Artikel

Diterima 26 Desember 2024
Direvisi 2 Januari 2025
Disetujui 17 Januari 2025
Dipublikasikan 26 Mei 2025

Keywords:

Emissions, Gate to Gate, Life Cycle Assessment, Supply Chain

Abstract: Industrialization in Indonesia contributes significantly to increased emissions. PT XYZ as a seasoning producer faces challenges in managing the environmental impact of its supply chain activities, especially in seasoning flour products which have the highest productivity reaching 25,793 tons in 2023. This study aims to measure the level of emissions generated during the supply chain process of seasoning flour products using the Life Cycle Assessment (LCA) method with a gate to gate approach. Data collection was carried out through interviews and secondary data collection from company documents related to process procedures, energy consumption, raw material usage, and supply chain operational data. Data was processed using SimaPro 9.0 software with the ReCiPe 2016 Midpoint method. The results showed a high level of emissions. The terrestrial acidification category reached 4.97 kg.SO₂, far above the standard limit of 600 mg.SO₂ per year. Normalization results identified the production stage as the largest contributor with three categories of marine ecotoxicity (27.3), freshwater ecotoxicity (17.5), and human carcinogenic toxicity (13.5). The high emissions are caused by significant electricity consumption for operational systems and production machinery, as well as transportation use. Recommendations for improvement include optimizing production energy, managing machine operating time, utilizing solar panels, and others.

Kata Kunci:

Emisi, Gate to Gate, Life Cycle Assessment, Rantai Pasok

Corresponding Author:

Name:
Moch. Annas Hidayatulloh
Email:
annasmuhmmad17@gmail.com

Abstrak: Industrialisasi di Indonesia berkontribusi signifikan terhadap peningkatan emisi. PT XYZ sebagai produsen bumbu masakan menghadapi tantangan dalam pengelolaan dampak lingkungan dari kegiatan rantai pasoknya, khususnya pada produk Tepung Bumbu yang memiliki produktivitas tertinggi mencapai 25.793 ton pada tahun 2023. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur tingkat emisi yang dihasilkan selama proses rantai pasok produk Tepung Bumbu menggunakan metode Life Cycle Assessment (LCA) dengan pendekatan gate to gate. Pengumpulan data dilakukan melalui wawancara dan pengumpulan data sekunder dari dokumen perusahaan

terkait prosedur proses, konsumsi energi, pemakaian raw material, dan data operasional rantai pasok. Data diolah menggunakan software SimaPro 9.0 dengan metode ReCiPe 2016 Midpoint. Hasil penelitian menunjukkan tingkat emisi yang cukup tinggi. Kategori terrestrial acidification mencapai 4,97 kg.SO₂, jauh diatas batas standar 600 mg.SO₂ per tahun. Hasil normalization mengidentifikasi tahap produksi sebagai kontributor terbesar dengan tiga kategori marine ecotoxicity (27,3), freshwater ecotoxicity (17,5), dan human carcinogenic toxicity (13,5). Tingginya emisi disebabkan oleh konsumsi listrik yang signifikan untuk sistem operasional dan mesin produksi, serta penggunaan transportasi. Rekomendasi perbaikan

meliputi *optimalisasi* energi produksi, pengelolaan waktu operasional mesin, pemanfaatan solar panel, dan lain-lain.

PENDAHULUAN

Industri makanan dan minuman di Indonesia mengalami peningkatan nilai produksi yang signifikan, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan limbah dan emisi. Menurut Pratama (2022), industrialisasi memiliki hubungan positif dengan emisi melalui kontribusi nya terhadap pertumbuhan PDB. Adapun emisi karbon tertinggi yang dihasilkan oleh sektor energi berasal dari sektor industri pada tahun 2012 yaitu sebesar 152 juta ton CO₂. Hal ini menunjukkan tingginya emisi yang dihasilkan oleh sektor industri melalui konsumsi energi sektor tersebut. PT XYZ, sebagai salah satu produsen bumbu masakan dengan pabrik di Mojokerto dan Karawang, menghadapi tantangan serupa dalam pengelolaan dampak lingkungan dari kegiatan rantai pasoknya. Perusahaan ini memproduksi beberapa produk unggulan, dengan Tepung Bumbu sebagai produk dengan tingkat produktivitas tertinggi, mencapai 25.793 ton pada tahun 2023 dengan konsumsi listrik 1.144.000 kWh per tahun.

Meskipun memiliki produktivitas tinggi, proses rantai pasok Tepung Bumbu belum sepenuhnya ramah lingkungan, dan perusahaan belum memiliki pemahaman komprehensif mengenai tingkat emisi yang dihasilkan selama proses rantai pasok internalnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur tingkat emisi yang dihasilkan selama proses rantai pasok produk. Dari permasalahan tersebut maka metode yang diusulkan untuk digunakan adalah metode *Life Cycle Assessment* (LCA) guna melaksanakan analisis efek lingkungan selama siklus hidup produk, bahan, proses, atau aktivitas terukur lainnya (Deborah & Sugihartanto, 2023). Metode ini dipilih karena kemampuannya dalam menganalisis efek lingkungan selama siklus hidup produk, mulai dari perolehan bahan baku hingga pengelolaan limbah.

Penelitian ini berfokus pada rantai pasok internal dengan pendekatan *gate to gate*, mencakup distribusi material ke produksi, proses produksi, hingga pengiriman ke *East Distribution Center*. Analisis dilakukan dengan mengukur dua aspek utama: konsumsi energi dan jejak karbon, menggunakan *software* SimaPro 9.0 untuk pengolahan data. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mendalam tentang area-area dalam rantai pasok yang berkontribusi signifikan terhadap dampak lingkungan, sehingga memungkinkan perusahaan mengambil langkah-langkah efektif dalam mengurangi emisi dan meningkatkan efisiensi proses produksi.

Rantai pasok (*supply chain*) merupakan suatu sistem yang mengintegrasikan seluruh proses bisnis pada suatu produk mulai dari hulu hingga ke hilir. Dalam rantai pasok (*supply chain*) sendiri terdapat transportasi yang sangat berperan penting dalam sistem logistik. Dalam konteks rantai pasok (*supply chain*), transportasi berperan penting karena sangatlah jarang suatu produk diproduksi dan dikonsumsi dalam satu lokasi yang sama (Goni dkk., 2022). Menurut Robertson (2021) menekankan bahwa persyaratan *supply chain* dapat bervariasi tergantung pada karakteristik spesifiknya, seperti jenis produk, lokasi geografis, jenis pasar, kebutuhan pelanggan, dan sifat permintaan. Menurut Dumitrascu dkk. (2020), dalam suatu jaringan *supply chain* terdapat tiga macam aliran yang harus dikelola, yaitu aliran barang yang mengalir dari hulu (*upstream*) ke hilir (*downstream*), aliran uang dan sejenisnya yang mengalir dari hilir ke hulu, serta aliran informasi yang dapat terjadi dari hulu ke hilir ataupun sebaliknya.

Menurut Abdirad & Krishnan (2021), dalam kegiatan pemenuhan tuntutan pasar saat ini, perusahaan hendaknya menerapkan konsep *Supply Chain Management*. *Supply Chain Management* adalah suatu kesatuan proses dan aktivitas produksi mulai bahan baku diperoleh dari *supplier*, proses penambahan nilai yang mengubah bahan baku menjadi barang jadi, proses penyimpanan persediaan barang sampai proses pengiriman barang jadi tersebut ke retail dan konsumen. Yusuf & Soediantono (2022) mengatakan Manajemen Rantai Pasokan (*Supply Chain Management*) merupakan suatu proses yang dimulai dari pengembangan produk, pengadaan, perencanaan atau pengendalian, operasi, dan distribusi dimana semua cakupan yang ada saling berhubungan satu dengan yang lainnya sehingga menghasilkan suatu produk yang berkualitas dan memudahkan produk tersebut sampai pada pengguna akhir (konsumen) secara efektif dan efisien.

Menurut Faturahman (2021) SCM merupakan sekumpulan aktivitas dan keputusan yang saling terkait untuk mengintegrasikan pemasok, manufaktur, gudang, jasa transportasi, pengecer dan konsumen secara efisien. *Supply Chain Management* (SCM) memiliki prinsip yaitu kolaborasi dan transparansi informasi, baik di internal perusahaan atau dengan pihak di luar perusahaan (Kurnia dkk., 2024). Penerapan *Supply Chain Management* (SCM) yang mengikuti konsep SCM yang benar dapat memberikan dampak peningkatan keunggulan kompetitif terhadap produk maupun pada sistem rantai pasokan yang dibangun perusahaan tersebut (Alam & Sutardjo, 2022).

Seiring berjalannya waktu teori *Supply Chain Management* (SCM) perlu dikaitkan dengan teori keberlanjutan sehingga memunculkan teori *Sustainable Supply Chain Management* (SSCM). *Sustainable Supply Chain Management* (SSCM) merupakan penggabungan dari *Supply Chain Management* dengan konsep keberlanjutan yang merupakan tuntutan dari seluruh pemangku kepentingan yang dalam konseptual dan operasionalnya terdapat *interrelasi* aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan (Hartanto, 2023). Manajemen rantai pasokan berkelanjutan memberikan dampak yang besar pada strategi *total quality management* yang dilakukan perusahaan, dan akan berimbas pada kinerja bisnis perusahaan (Maisaroh, 2021). Manajemen Rantai Pasokan Berkelanjutan atau *Sustainable Supply Chain Management* (SSCM) telah mendapatkan banyak minat untuk dikelola rantai pasokan sambil mengintegrasikan tujuan yang berkaitan dengan tiga komponen: ekonomi, lingkungan dan sosial (Concetta dkk., 2023). Pentingnya pembangunan berkelanjutan terletak pada perannya yang penting dalam kesejahteraan ekonomi, lingkungan, dan sosial. Organisasi dihadapkan pada tekanan untuk menerapkan praktik berkelanjutan guna meningkatkan efisiensi rantai pasokan dan tetap bersaing di pasar global yang semakin kompetitif (Sánchez-Flores dkk., 2020).

Pencemaran udara di Indonesia merupakan masalah yang kompleks dan terus berkembang, dengan berbagai sumber yang berkontribusi terhadap peningkatan polusi. Menurut Maula (2024) Pencemaran udara merupakan masalah yang tidak pernah ada habisnya, khususnya di Indonesia. Polusi terus menjadi masalah bagi masyarakat Indonesia dan tingkat polusi semakin meningkat setiap tahunnya. Metode *Life Cycle Assessment* dapat digunakan sebagai dokumen penilaian untuk mengeksplorasi upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi dampak lingkungan sehingga proses produksi dapat lebih ramah lingkungan (Achmad & Rosariawati, 2021). Standar ISO mengharuskan tujuan LCA didefinisikan dengan jelas dan disesuaikan dengan tujuan penggunaan. Unit fungsional juga penting karena mewakili layanan yang disediakan oleh sistem produksi dan menunjukkan *input* dan *output* mana yang saling terkait. Ini berfungsi sebagai dasar untuk membandingkan dan menganalisis produk alternatif dan layanan (Kazemi dkk., 2023). Proses *Life Cycle Assessment* (LCA) dilakukan dengan prosedur objektif dalam mengevaluasi dampak lingkungan, dampak sosial, dan dampak ekonomi dengan melakukan determinasi kuantitatif dari semua aliran masuk ataupun keluar dari sistem terhadap lingkungan dalam tiap tahap sistem (Futari, 2023). *Life Cycle Assessment* merupakan teknik menilai aspek lingkungan dan dampak potensial suatu produk dengan cara menginventarisasi *input* dan *output* nya, mengevaluasi dampak lingkungannya, dan menginterpretasi hasil dari fase analisis *inventory* dan penilaian dampak. Beberapa kelebihan yang dimiliki LCA di antaranya LCA menilai sistem dan memberikan hasil analisis yang luas dan lebih komprehensif, LCA menawarkan hasil analisis siklus hidup yang selanjutnya dapat digunakan untuk perbaikan sistem, hasil analisis yang dihasilkan dapat berupa dampak lingkungan maupun dominansi substansi kontributor yang menyebabkan dampak lingkungan itu menjadi tinggi (Ula dkk., 2021). LCA merupakan metode yang banyak digunakan untuk mengevaluasi kinerja lingkungan dari suatu produk atau layanan. Sebuah analisis LCA dapat memiliki tujuan yang berbeda, hal ini bergantung pada batas sistem yang dipilih untuk penilaian. Tujuan umum dari LCA adalah untuk membandingkan dampak lingkungan yang dihasilkan dari suatu produk agar dapat dipilih produk yang paling memberikan dampak lingkungan negatif terkecil (Dian, 2023). Hasil evaluasi dampak lingkungan menggunakan pendekatan LCA dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan oleh pemangku kepentingan terkait dalam memilih produk dan juga proses produksi yang ramah lingkungan (Muhammad & Syahrullah, 2022). Kajian LCA dapat digunakan untuk mengidentifikasi proses tertentu yang dapat ditingkatkan untuk meminimalkan dampak dan mengoptimalkan produksi. Hasil kajian LCA dapat menghasilkan produk yang berwawasan lingkungan, yang tidak hanya menguntungkan bagi industri tetapi juga melestarikan lingkungan.

Menurut SNI ISO 14040:2016 penerapan LCA terdiri atas empat tahapan yaitu penentuan tujuan dan ruang lingkup, analisis inventori, analisis dampak dan interpretasi (Yani, 2021).

Metode *ReCiPe* memiliki tujuan utama yaitu menyediakan metode yang menggabungkan *Eco-Indicator* 99 dan CML, dalam versi yang diperbarui. *Recipe* membedakan dua tingkatan indikator: Indikator *midpoint*, dan indikator *endpoint* dengan pada kategori kerusakan kesehatan manusia, ekosistem dan ketersediaan sumber daya alam. Indikator fokus terdiri dari 18 dampak fokus yang lebih fokus pada isu lingkungan individu, seperti perubahan iklim atau penipisan ozon (Devi, 2023). *SimaPro* adalah sebuah *software* yang dapat digunakan untuk melakukan penilaian dampak lingkungan dengan pendekatan LCA. Keunggulan utama *SimaPro* adalah dapat menerapkan berbagai aplikasi LCA, seperti pelaporan keberlanjutan, analisis jejak karbon dan air, proses desain produk, pembuatan produk ramah lingkungan, dan penentu indikator kinerja utama (Kelvin, 2021). Kelemahan penggunaan *software* *SimaPro* salah satunya *database* tidak tersedia semua, maka harus dibantu dengan metode literatur dan melengkapi data secara individu (Yekti, 2023).

Dengan demikian, PT XYZ sebagai produsen bumbu masakan menghadapi tantangan pengelolaan dampak lingkungan dari rantai pasoknya, khususnya untuk produk Tepung Bumbu yang memiliki produktivitas tertinggi yang mencapai 25.793 ton pada tahun 2023 dengan konsumsi listrik 1.144.000 kWh/tahun, namun proses rantai pasoknya belum sepenuhnya ramah lingkungan dan perusahaan belum mengetahui tingkat emisi dari rantai pasok internalnya. Berbeda dari penelitian sebelumnya yang umumnya berfokus pada dampak lingkungan secara umum, penelitian ini memberikan kontribusi dengan mengintegrasikan metode *Life Cycle Assessment* dan *software* *SimaPro* 9.0 untuk menganalisis emisi karbon secara spesifik pada rantai pasok internal industri bumbu masakan, yang mencakup distribusi material, proses produksi, hingga pengiriman ke *distribution center (gate to gate)*. Pendekatan terintegrasi ini belum pernah diterapkan dalam konteks industri bumbu masakan di Indonesia. Penelitian ini bertujuan mengukur tingkat emisi selama proses rantai pasok internal (*gate to gate*) produk Tepung Bumbu menggunakan metode *Life Cycle Assessment (LCA)*, mencakup distribusi material ke produksi, proses produksi, hingga pengiriman ke *East Distribution Center* dengan menggunakan *software* *SimaPro* 9.0.

METODE

Penelitian ini dilaksanakan di PT XYZ – Mojokerto *Factory* pada September 2024. Penelitian menggunakan dua variabel utama yaitu variabel bebas dan variabel terikat. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah konsumsi energi dalam proses rantai pasok yang meliputi distribusi material ke produksi, proses produksi, dan pengiriman ke *distribution center*. Sedangkan variabel terikat adalah tingkat *sustainability product* yang diukur berdasarkan tingkat emisi yang dihasilkan, mencakup emisi gas rumah kaca, emisi dari proses produksi, dan emisi dari transportasi.

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan, dimulai dengan survei lapangan untuk mengidentifikasi masalah perusahaan, dilanjutkan dengan studi literatur untuk memperkuat pemahaman *teoritis*. Setelah merumuskan masalah dan menetapkan tujuan penelitian, dilakukan identifikasi variabel dan pengumpulan data yang mencakup proses *supply chain*, prosedur, konsumsi energi, dan penggunaan raw material. Analisis utama menggunakan metode *Life Cycle Assessment (LCA)* yang terdiri dari empat tahap: pendefinisian *goal and scope* dengan pendekatan *gate to gate*, *inventory analysis* menggunakan *software* *SimaPro* 9.0, *impact assessment* untuk mengevaluasi dampak lingkungan, dan interpretasi hasil. Penelitian diakhiri dengan tahap verifikasi untuk memastikan akurasi data, dilanjutkan dengan pembahasan hasil dan rekomendasi perbaikan, serta penarikan kesimpulan dan saran.

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan melalui tiga tahap utama: pengumpulan, pengolahan, dan analisis. Pengumpulan data melibatkan data primer yang diperoleh melalui wawancara dan *brainstorming* dengan *stakeholder* perusahaan, serta data sekunder berupa dokumen perusahaan terkait prosedur proses, konsumsi energi, dan penggunaan raw material.

Data kemudian diolah menggunakan *software* SimaPro 9.0, dimulai dengan *input database* dan proses pembuatan pada tahap *inventory*, dilanjutkan dengan memasukkan data *input/output* dari setiap unit proses dan membuat *product stages*, hingga perhitungan *impact assessment*. Tahap analisis dilakukan dengan menginterpretasi hasil *impact assessment* untuk mengidentifikasi kategori dampak lingkungan dan proses yang berkontribusi signifikan, yang kemudian menjadi dasar untuk mengusulkan strategi perbaikan yang layak secara teknis dan ekonomis dalam mengurangi dampak lingkungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambaran Proses *Supply Chain* Tepung Bumbu

PT XYZ menerapkan sistem rantai pasok yang komprehensif dalam produksi Tepung Bumbu untuk mengelola proses produksi dan distribusi secara efektif. Proses dimulai dari peramalan penjualan yang dilakukan oleh tim *marketing* di kantor pusat Jakarta dengan menganalisis data historis penjualan dan tren pasar. Selanjutnya, tim logistik Jakarta bersama *Production Planning Control* (PPC) Mojokerto melakukan peramalan produksi untuk mengatur stok produk nasional termasuk penentuan berbagai level persediaan. Peramalan kebutuhan material dilakukan oleh PPC Mojokerto dengan mengatur *inventory material* dan menghitung *Bill of Material* (BOM). Pengadaan material menjadi tanggung jawab *Strategic Sourcing & Procurement* di Jakarta yang mempertimbangkan aspek harga, ketersediaan, pengiriman, dan kualitas. PPC Mojokerto kemudian membuat surat pesanan material dan mengatur jadwal pengirimannya. Pada tahap kedatangan material, tiga divisi di pabrik Mojokerto berperan penting: PPC mengontrol kesesuaian jumlah material, *Quality Assurance* (QA) menguji kualitas, dan *Inventory Control* (IC) mengelola penyimpanan serta distribusi ke produksi. Proses produksi dilaksanakan dengan mengolah bahan baku menjadi Tepung Bumbu, dilanjutkan dengan analisis produksi oleh QA untuk memastikan kesesuaian dengan standar kualitas. Produk yang telah memenuhi standar akan disimpan oleh IC di penyimpanan sementara sebelum didistribusikan ke *East Distribution Center* (EDC). Tahap akhir adalah pengiriman produk, di mana tim logistik Mojokerto bertanggung jawab mengelola *distribution center* dengan memastikan kapasitas penyimpanan optimal dan menerapkan sistem *First in First Out* (FIFO) untuk pengiriman ke konsumen.

Prosedur Masing-Masing Proses

PT XYZ Pabrik Mojokerto memiliki proses *supply Chain* yang terstruktur untuk produksi Tepung Bumbu. Proses ini dimulai dari tahap kedatangan material yang menerapkan sistem terintegrasi antara SAP untuk *monitoring* stok dan WMS untuk manajemen gudang. Pengelolaan material menggunakan kombinasi sistem FEFO (*First Expired First Out*) dan FIFO (*First in First Out*) untuk memastikan kualitas bahan baku tetap terjaga. Setelah material tersedia, proses berlanjut ke tahap produksi yang dilakukan secara semi-otomatis melalui sepuluh tahapan utama. Dimulai dari *feeding material* menggunakan Stock Hopper, dilanjutkan dengan serangkaian proses pengolahan seperti pengayakan, pendeteksian logam, pelembutan tepung, penimbangan bahan pendukung, penghancuran bahan non-tepung, dan pencampuran menggunakan Pow Ribbon Mixer. Setelah bahan tercampur, produk melalui proses pengayakan ulang dan deteksi logam kedua sebelum masuk ke tahap pengemasan. Proses pengemasan dilakukan secara otomatis, diikuti dengan penimbangan dan penyimpanan menggunakan sistem *palletizing* di gudang barang jadi. Produk yang telah dikemas kemudian memasuki tahap analisa produk, di mana *Quality Assurance* (QA) melakukan pemeriksaan kualitas secara menyeluruh. Produk yang tidak memenuhi standar akan langsung *direject* dan didaur ulang menjadi produk samping, sementara produk yang memenuhi standar akan dilanjutkan ke tahap penyimpanan. Tahap terakhir adalah simpan produk, di mana departemen PPC membuat *Delivery Order* untuk pengiriman produk dari gudang barang jadi ke *East Distribution Center* (EDC). Proses pengiriman melibatkan penggunaan *forklift* untuk *loading* dan *unloading* produk ke dalam truk. Setelah produk tiba di EDC, tanggung jawab pengelolaan produk beralih ke departemen EDC untuk proses distribusi selanjutnya.

Konsumsi Energi

Dalam proses rantai pasok internal PT XYZ, energi memainkan peran vital sebagai komponen utama yang tidak hanya mendukung operasional tetapi juga mempengaruhi keberlanjutan sistem secara keseluruhan. Ada dua jenis energi utama yang digunakan dalam operasional perusahaan: bahan bakar solar untuk aktivitas transportasi dan distribusi, serta energi listrik untuk operasional *warehouse* dan produksi. Dalam operasional *warehouse* bahan baku, energi listrik menjadi kebutuhan kritis yang harus tersedia secara kontinu untuk mendukung berbagai sistem seperti penerangan, keamanan, fasilitas karyawan, dan sistem pendukung *warehouse* lainnya. Kontinuitas pasokan listrik ini sangat penting untuk memastikan visibilitas yang optimal dan kelancaran proses penyimpanan serta pengambilan bahan baku di *warehouse* 9 dan 15. Penggunaan energi yang tidak efisien dalam proses ini dapat menimbulkan dua dampak negatif utama: pemborosan sumber daya dan peningkatan emisi gas rumah kaca yang berdampak pada lingkungan.

Tabel 1. Data Penggunaan Listrik *Warehouse* 9 dan 15

<i>Warehouse</i>	Kebutuhan Listrik (kWh)
9 (Non-Tepung)	270 x 30% (Tepung Bumbu) = 90
15 (Tepung)	125
Total	215

Dalam proses produksi Tepung Bumbu menggunakan dua tenaga yaitu manusia dan mesin. Mesin-mesin yang digunakan tentunya memerlukan sumber energi listrik selama operasional. Mesin-mesin tersebut beroperasi secara kontinu tanpa berhenti selama produksi berlangsung guna memastikan kelancaran proses dan menjaga efisiensi waktu. Selain mesin, terdapat sistem pendukung operasional (sistem penerangan, sistem keamanan, fasilitas karyawan, dan sistem pendukung produksi lainnya) yang menggunakan energi listrik.

Tabel 2. Data Penggunaan Listrik *Warehouse* 9 dan 15

Nama Mesin	Jumlah Mesin	Watt (w)	Waktu Beroperasi (t)	Hasil (w x t)
Mesin Stock Hopper	1	3 kW	0,033 jam	0,1 kWh
Mesin Vibro Shifter 1	8	2,2 kW	0,1 jam	1,8 kWh
Mesin Metal Catcher 1	4	1,5 kW	0,067 jam	0,4 kWh
Mesin Hammer Mill 1	2	75 kW	0,333 jam	50 kWh
Mesin Hammer Mill 2	2	75 kW	0,417 jam	63 kWh
Mesin Pow Ribbon Mixer	2	22 kW	0,5 jam	22 kWh
Mesin Vibro Shifter 2	8	2,2 kW	0,133 jam	2,4 kWh
Mesin Metal Catcher 2	4	1,5 kW	0,067 jam	0,4 kWh
Mesin Packaging Cing Fong	18	7 kW	0,183 jam	23,1 kWh
Mesin Metal Detector	4	1 kW	0,083 jam	0,3 kWh
Mesin Auto Weighing Pack	8	5 kW	0,083 jam	3,3 kWh
Sistem Pendukung Operasional (sistem penerangan, sistem keamanan, dan sistem pendukung produksi lainnya termasuk listrik <i>start up</i> mesin)				322 kWh
Total Kebutuhan Listrik				488,8 kWh

Dalam kegiatan operasional *East Distribution Center* (EDC), kebutuhan energi listrik sangat penting, terutama sistem pendukung operasional (sistem penerangan, sistem keamanan, fasilitas karyawan, dan sistem pendukung EDC lainnya). Sistem pendukung operasional di EDC dirancang untuk tetap berjalan secara kontinu. Hal ini bertujuan untuk memastikan visibilitas yang optimal, mendukung kelancaran proses penyimpanan dan pengambilan produk *finish goods*.

Tabel 3. Data Penggunaan Listrik EDC	
Kebutuhan Listrik (kWh)	
EDC	250 x 30% (Tepung Bumbu) = 75

Dalam pengiriman *raw material* dari Warehouse 9 dan 15 ke area produksi, serta pengiriman produk *finish goods* ke EDC, terdapat beberapa tahapan penting yang meliputi proses pemindahan barang dari asal hingga ke lokasi tujuan. Berikut merupakan data pemindahan *raw material* menggunakan moda transportasi beserta jarak tempuh.

Tabel 4. Jarak Tempuh Transportasi			
Asal	Tujuan	Jarak Tempuh	Moda Transportasi
Warehouse 9	Truk	0,12	Forklift
Truk	Area Produksi	2	Truk
Truk	Warehouse Sementara (Produksi)	0,05	Forklift
Warehouse 15	Warehouse Sementara (Produksi)	0,015	Forklift
Warehouse Finish goods (Produksi)	Truk	0,05	Forklift
Truk	Area EDC	1	Truk
Truk	EDC	0,1	Forklift

Dari jarak tempuh tersebut, perusahaan menggunakan beberapa jenis transportasi sesuai muatan yang dikirimkan.

Tabel 5. Jenis Transportasi dan Daya Angkut	
Jenis Transportasi	Daya Angkut
Forklift	1 ton
Truk	5 ton

Pemakaian *Raw material*

Sumber bahan baku mampu mempengaruhi penentuan mutu akhir dari suatu produk yang dihasilkan. Bahan baku yang digunakan dalam proses produksi Tepung Bumbu dibagi menjadi dua, di antaranya yaitu bahan baku utama dan bahan baku pendukung. Bahan baku utama yang digunakan PT XYZ dalam pembuatan Tepung Bumbu terdiri atas tepung terigu dan tepung tapioka. Adapun bahan baku pendukung meliputi garam, bawang merah, bawang putih, lada, dan bumbu lainnya. Berdasarkan komposisi bahan baku, PT XYZ memproduksi 300 kg Tepung Bumbu dalam 1 *batch* produksi.

Tabel 6. Komposisi Bahan Baku	
Bahan Baku	Kuantitas (Kg)
Terigu	195
Tapioka	75
Garam	18
Bawang Merah	0,12
Bawang Putih	4,2
Lada	4,2

Goal and Scope

Tahap ini merupakan tahap penentuan tujuan dan batasan penelitian. Tujuan penelitiannya adalah untuk mengetahui tingkat emisi yang dihasilkan selama proses rantai pasok

internal produk Tepung Bumbu, guna mengukur tingkat keberlanjutan (*sustainability*) dari produk tersebut. Adapun batasan penelitian yaitu menilai dampak yang diukur dari dua aspek yaitu *energy consumption* dengan mengukur jumlah energi yang dikonsumsi, serta *carbon footprint* dengan menghitung total emisi gas rumah kaca yang dihasilkan selama proses rantai pasok tersebut. Ruang lingkup penelitian yang digunakan untuk menilai dampak lingkungan pada siklus hidup produk Tepung Bumbu yaitu *gate to gate* karena penelitian hanya difokuskan untuk siklus terpendek yaitu mulai pendistribusian material dari gudang penyimpanan ke produksi hingga pengiriman produk *finish goods* ke *distribution center*.

Life Cycle Inventory

Pada tahap ini terdapat perhitungan mengenai *input* dan *output* dari setiap proses. Dalam melakukan penilaian tingkat emisi yang dihasilkan selama proses rantai pasok produk Tepung Bumbu, maka dibutuhkan data *input* dan *output* yang meliputi material maupun energi yang digunakan. Data material maupun energi yang digunakan merupakan data untuk menghasilkan Tepung Bumbu dalam 1 *batch* produksi yang setara dengan 300 kg. Dari *input* dan *output* tersebut kemudian diolah menggunakan *software* Simapro.

Pada tahap kedatangan material di PT XYZ, proses pengangkutan bahan baku memerlukan penggunaan energi dalam bentuk bahan bakar untuk mengoperasikan truk dan *forklift*. Proses pengangkutan ini dibagi menjadi dua kategori berdasarkan jenis bahan dan jarak *warehouse* ke lokasi produksi. Untuk bahan non-tepung (garam, bawang merah, bawang putih, dan lada) dengan total berat 26,52 kg, pengangkutan dilakukan dari *warehouse* 9 yang berjarak 2 kilometer menggunakan kombinasi 1 truk dan 2 *forklift*. Sedangkan untuk bahan tepung (terigu dan tapioka) dengan total berat 270 kg, pengangkutan dilakukan dari *warehouse* 15 yang hanya berjarak 15 meter dari lokasi produksi, cukup menggunakan 2 *forklift* tanpa memerlukan truk.

Tabel 7. *Input dan Output Tahap Kedatangan Material*

<i>Input</i>			<i>Output</i>		
Material	Kuantitas	Satuan	Material	Kuantitas	Satuan
Kapasitas angkut non-tepung (<i>Forklift</i> dari <i>Warehouse</i> 9 ke Truk)	0,013	tkm	Kapasitas angkut non-tepung (<i>Forklift</i> dari <i>Warehouse</i> 9 ke Truk)	0,013	tkm
Kapasitas angkut non-tepung (Truk dari Area <i>Warehouse</i> 9 ke Area Produksi)	0,106	tkm	Kapasitas angkut non-tepung (Truk dari Area <i>Warehouse</i> 9 ke Area Produksi)	0,106	tkm
Kapasitas angkut non-tepung (<i>Forklift</i> dari Truk ke <i>Warehouse</i> Sementara (Produksi))	0,005	tkm	Kapasitas angkut non-tepung (<i>Forklift</i> dari Truk ke <i>Warehouse</i> Sementara (Produksi))	0,005	tkm
Kapasitas angkut tepung (<i>Forklift</i> dari <i>Warehouse</i> 15 ke <i>Warehouse</i> Sementara (Produksi))	0,016	tkm	Kapasitas angkut tepung (<i>Forklift</i> dari <i>Warehouse</i> 15 ke <i>Warehouse</i> Sementara (Produksi))	0,016	tkm
Total Solar Tahap Kedatangan Material	3,23	liter	<i>Nitrogen Oksida</i> (NO _x)	0,112749	kg
			<i>Metana</i> (CH ₄)	0,000063	kg
			<i>Karbon Monoksida</i> (CO)	0,053508	kg
			<i>Karbon Dioksida</i> (CO ₂)	20,20564	kg
			<i>Sulfur Dioksida</i> (SO ₂)	0,005223	kg
			<i>Hidrokarbon</i> (HC)	0,011466	kg
			TSP	0,008918	kg
Listrik	215	kWh	<i>Karbon Dioksida</i>	187,05	kg

Pada proses produksi dilakukan pencampuran (*mixing*) semua bahan yang terdiri atas tepung dan non-tepung. Dalam proses *mixing* ini tidak ada penggunaan air sehingga semua material yang masuk akan menjadi produk. Dalam tahap produksi semua aktivitas menggunakan mesin yang memerlukan energi listrik. Sehingga perlu dilakukan perhitungan emisi yang dikeluarkan akibat penggunaan listrik.

Tabel 8. *Input dan Output Tahap Produksi*

<i>Input</i>			<i>Output</i>		
Material	Kuantitas	Satuan	Material	Kuantitas	Satuan
Listrik Mesin Stock Hopper	0,1	kWh	<i>Karbon Dioksida</i>	0,087	kg
Listrik Mesin Vibro Shifter 1	1,8	kWh	<i>Karbon Dioksida</i>	1,566	kg
Listrik Mesin Metal Catcher 1	0,4	kWh	<i>Karbon Dioksida</i>	0,348	kg
Listrik Mesin Hammer Mill 1	50	kWh	<i>Karbon Dioksida</i>	43,5	kg
Listrik Mesin Hammer Mill 2	63	kWh	<i>Karbon Dioksida</i>	54,81	kg
Listrik Mesin Pow Ribbon Mixer	22	kWh	<i>Karbon Dioksida</i>	19,14	kg
Listrik Mesin Vibro Shifter 2	2,4	kWh	<i>Karbon Dioksida</i>	2,088	kg
Listrik Mesin Metal Catcher 2	0,4	kWh	<i>Karbon Dioksida</i>	0,348	kg
Listrik Mesin Packaging Cing Fong	23,1	kWh	<i>Karbon Dioksida</i>	20,097	kg
Listrik Mesin Metal Detector	0,3	kWh	<i>Karbon Dioksida</i>	0,261	kg
Listrik Mesin Auto Weighing Pack	3,3	kWh	<i>Karbon Dioksida</i>	2,871	kg
Listrik Sistem Pendukung Operasional	332	kWh	<i>Karbon Dioksida</i>	288,84	kg
Listrik (total)	488,88	kWh	<i>Karbon Dioksida (total)</i>	425,3256	kg

Pada tahap simpan produk terdapat beberapa aktivitas pengangkutan yang membutuhkan energi berupa bahan bakar, seperti pengoperasian truk dan *forklift*. Produk *finish goods* dengan total berat 324 kg diangkut menggunakan 1 truk dan 2 *forklift* dari *warehouse finish goods* yang berjarak 1 km menuju EDC.

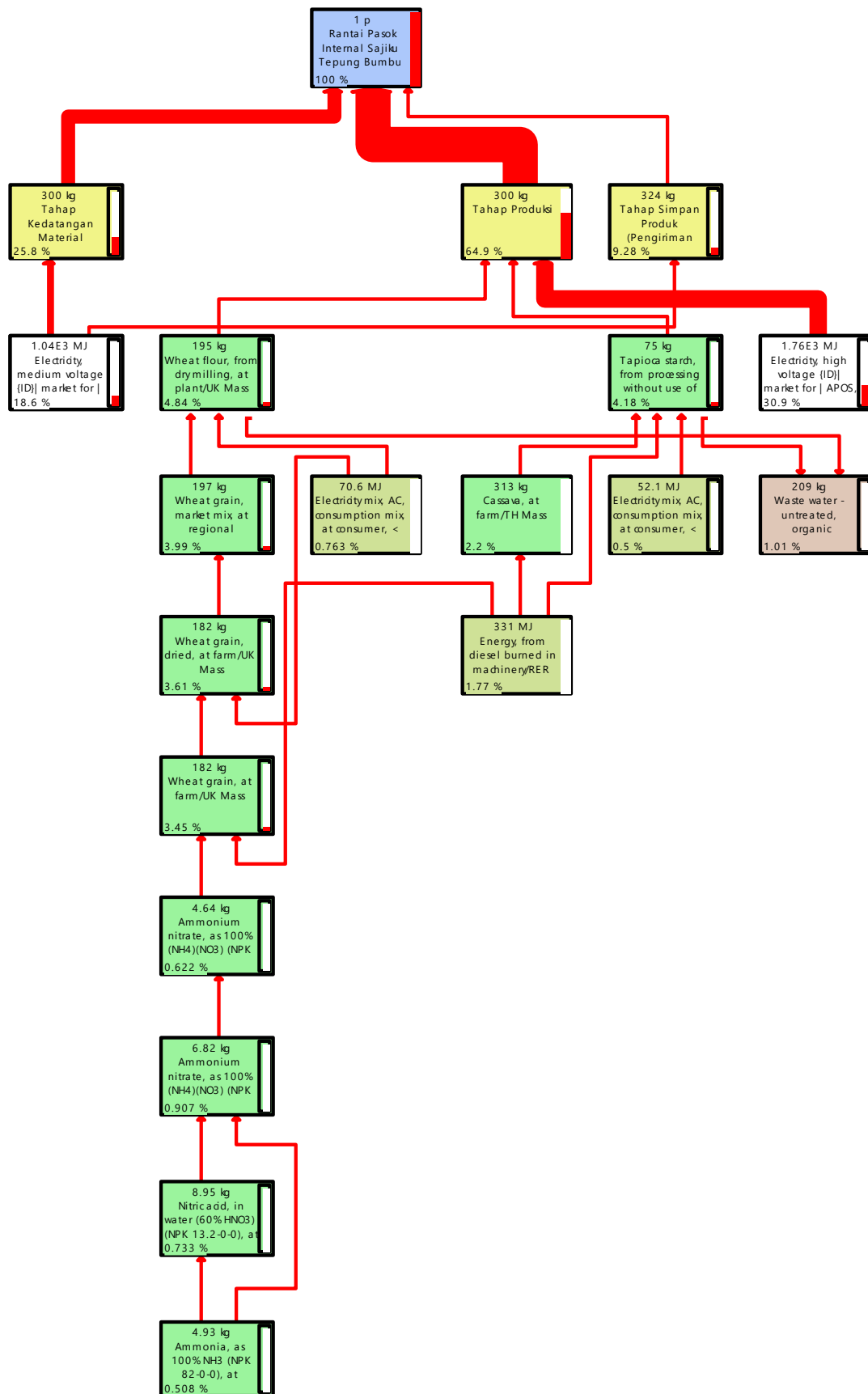
Tabel 9. *Input dan Output Tahap Simpan Produk*

<i>Input</i>			<i>Output</i>		
Material	Kuantitas	Satuan	Material	Kuantitas	Satuan
Kapasitas angkut produk <i>Finish goods</i> (<i>Forklift</i> dari <i>Warehouse Finish goods</i> ke Truk)	0,065	tkm	Kapasitas angkut produk <i>Finish goods</i> (<i>Forklift</i> dari <i>Warehouse Finish goods</i> ke Truk)	0,065	tkm
Kapasitas angkut produk <i>Finish goods</i> (Truk dari Area Produksi ke Area EDC)	0,648	tkm	Kapasitas angkut produk <i>Finish goods</i> (Truk dari Area Produksi ke Area EDC)	0,648	tkm

Kapasitas angkut produk <i>Finish goods</i> (Forklift dari Truk ke EDC)	0,13	tkm	Kapasitas angkut produk <i>Finish goods</i> (Forklift dari Truk ke EDC)	0,13	tkm
			<i>Nitrogen Oksida</i> (NO _x)	0,057171	kg
			<i>Metana</i> (CH ₄)	0,000032	kg
				3	
Total Solar Tahap Simpan Produk	3,23	liter	<i>Karbon Monoksida</i> (CO)	0,027132	kg
			<i>Karbon Dioksida</i> (CO ₂)	10,24556	kg
				0,002648	kg
			<i>Sulfur Dioksida</i> (SO ₂)	6	
			<i>Hidrokarbon</i> (HC)	0,005814	kg
			TSP	0,004522	kg
Listrik	75	kWh	<i>Karbon Dioksida</i>	65,25	kg

Life Cycle Impact Assessment

Pada tahap ini dilakukan penentuan dampak terhadap lingkungan yang telah diperoleh dari tahapan LCI (*Life Cycle Inventory*) dengan menggunakan metode *ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.03 / World* (2010) H. Metode ini memiliki indikator fokus terdiri dari 18 dampak fokus yang lebih fokus pada isu lingkungan individu, seperti perubahan iklim atau penipisan ozon. Pada penilaian dampak lingkungan dapat dilihat dari *Sankey Diagram* yang menggambarkan hubungan setiap proses yang dapat mengakibatkan dampak lingkungan.



Gambar 1. Sankey Diagram Rantai Pasok Internal Tepung Bumbu

Sankey Diagram ini memberikan informasi hubungan dari setiap proses yang memiliki pengaruh dalam menghasilkan dampak lingkungan selama rantai pasok internal produk Tepung Bumbu. Pada Sankey Diagram garis merah menunjukan proses yang berpengaruh terhadap

dampak lingkungan. Garis merah tebal menunjukkan proses yang memiliki pengaruh besar terhadap dampak lingkungan.

Characterization merupakan tahapan untuk membandingkan secara langsung hasil LCI dalam tiap kategori. Metode yang digunakan dalam melakukan penilaian dampak lingkungan adalah *ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.03 / World (2010) H*. Dengan metode ini maka akan dihasilkan 18 kategori yang meliputi *global warming, stratospheric ozone, ionizing radiation, ozone formation (human health), fine particulate matter formation, ozone formation (terrestrial ecos), terrestrial acidification, freshwater eutrophication, marine eutrophication, terrestrial ecotoxicity, marine ecotoxicity, human carcinogenic, human non-carcinogenic, land use, mineral resource scarcity, fossil resource scarcity, dan water consumption*. Pada penilai diagram dan tabel terlihat bahwa terdapat beberapa dampak yang dihasilkan melebihi standar emisi yang berlaku di Indonesia. Misalnya, pada *terrestrial acidification* pada tahap kedatangan material yaitu 0,965, tahap produksi yaitu 3,64, dan pada tahap simpan produk yaitu 0,358 dengan total 4,97 kg.SO₂ per *batch* telah melebihi batas yang sudah ditetapkan oleh PermenLH No.7 tahun 2007 yaitu 600 mg/NM³ atau 525,6 kg.SO₂ per tahun (1,463 kg.SO₂ per hari). Sehingga kategori tersebut bisa dikatakan sangat mencemari.

Se	Impact category /	Unit	Total	Tahap Kedatangan	Tahap Produksi	Tahap Simpan Produk
✓	Global warming	kg CO2 eq	1.74E3	449	1.13E3	161
✓	Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	0.00228	7.91E-5	0.00218	2.77E-5
✓	Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	6.72	0.82	5.61	0.286
✓	Ozone formation, Human health	kg NOx eq	2.74	0.755	1.7	0.292
✓	Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	16.4	4.49	10.3	1.57
✓	Ozone formation, Terrestrial ecos	kg NOx eq	2.76	0.76	1.71	0.294
✓	Terrestrial acidification	kg SO2 eq	4.97	0.965	3.64	0.358
✓	Freshwater eutrophication	kg P eq	1.28	0.346	0.811	0.121
✓	Marine eutrophication	kg N eq	0.708	0.0212	0.679	0.00743
✓	Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1.06E3	227	749	79.3
✓	Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	34.2	9.39	21.5	3.31
✓	Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	45.6	12.9	28.1	4.56
✓	Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	60	16.8	37.4	5.85
✓	Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	1.04E3	252	701	89.9
✓	Land use	m2a crop eq	356	0.373	356	0.13
✓	Mineral resource scarcity	kg Cu eq	0.306	0.0563	0.23	0.0196
✓	Fossil resource scarcity	kg oil eq	258	66.1	167	25.3
✓	Water consumption	m3	6.04	0.913	4.81	0.319

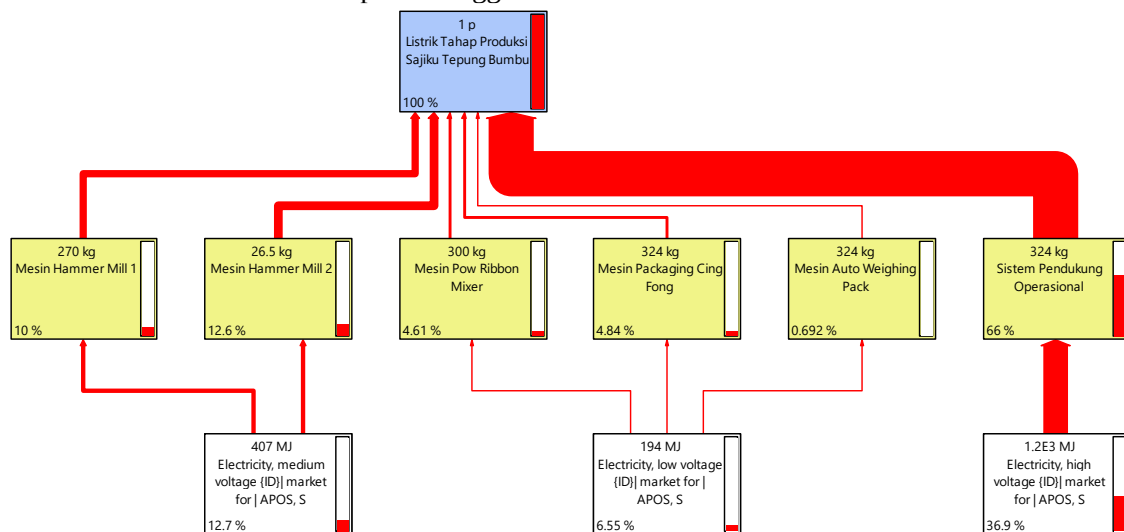
Gambar 2. Tabel *Characterization Rantai Pasok Internal*

Tahapan normalisasi merupakan tahapan dimana hasil karakterisasi dibagi dengan nilai normalisasi. Tahapan normalisasi ini dilakukan untuk memudahkan perbandingan antar *impact category*. Nilai *impact category* dari *characterization* dibagi dengan nilai *reference* sehingga semua *impact category* menggunakan unit atau satuan sama. Berdasarkan tabel *normalization* ketiga tahap kedatangan produk, produksi, dan simpan produk menghasilkan emisi. Akan tetapi tahap produksi menunjukkan yang paling signifikan dalam menghasilkan emisi tertinggi. Pada tahap produksi terdapat 3 kategori yang tertinggi dalam menghasilkan emisi yaitu *marine ecotoxicity* dengan nilai dampak 27,3, *freshwater ecotoxicity* dengan nilai dampak 17,5, dan *human carcinogenic toxicity* dengan nilai dampak 13,5. Ketiga kategori tersebut memiliki kontribusi terbesar dalam nilai dampak *normalization*.

Se	Impact category /	Unit	Total	Tahap Keadatangan	Tahap Produksi	Tahap Simpan Produk
✓	Global warming		0.217	0.0562	0.141	0.0202
✓	Stratospheric ozone depletion		0.0381	0.00132	0.0363	0.000462
✓	Ionizing radiation		0.014	0.00171	0.0117	0.000595
✓	Ozone formation, Human health		0.133	0.0367	0.0824	0.0142
✓	Fine particulate matter formation		0.64	0.175	0.403	0.0615
✓	Ozone formation, Terrestrial ecosy		0.155	0.0428	0.0961	0.0166
✓	Terrestrial acidification		0.121	0.0235	0.0889	0.00874
✓	Freshwater eutrophication		1.97	0.533	1.25	0.186
✓	Marine eutrophication		0.154	0.0046	0.147	0.00161
✓	Terrestrial ecotoxicity		1.02	0.219	0.723	0.0765
✓	Freshwater ecotoxicity		27.9	7.66	17.5	2.7
✓	Marine ecotoxicity		44.2	12.5	27.3	4.42
✓	Human carcinogenic toxicity		21.7	6.05	13.5	2.11
✓	Human non-carcinogenic toxicity		7	1.69	4.71	0.603
✓	Land use		0.0577	6.04E-5	0.0576	2.11E-5
✓	Mineral resource scarcity		2.55E-6	4.69E-7	1.92E-6	1.64E-7
✓	Fossil resource scarcity		0.263	0.0675	0.17	0.0258
✓	Water consumption		0.0226	0.00343	0.018	0.00119

Gambar 3. Tabel Normalization Rantai Pasok Internal

Berdasarkan grafik, tahap produksi terbukti menjadi penyumbang emisi tertinggi dalam rantai pasok. Penyebab utamanya adalah konsumsi listrik yang sangat besar. Oleh karena itu, diperlukan analisis lebih lanjut untuk menghitung dan mengidentifikasi faktor-faktor penyebab tingginya emisi tersebut secara rinci. Pada *Sankey Diagram* garis merah menunjukkan proses yang berpengaruh pada tahap produksi. Terlihat sistem pendukung operasional serta mesin Hammer Mill 1 dan 2 memberikan dampak tertinggi.



Gambar 4. Sankey Diagram Tahap Produksi

Interpretasi

Pada tahap ini merupakan fase LCA dimana menginterpretasikan hasil *output* dari *Life Cycle Impact Assessment*. Berdasarkan hasil analisis *Life Cycle Impact Assessment* yang telah dilakukan pada rantai pasok internal produk Tepung Bumbu, dapat diketahui beberapa dampak utama terhadap lingkungan. Dari hasil *characterization*, diketahui beberapa kategori melebihi standar emisi yang berlaku di Indonesia, sedangkan pada hasil *normalization* tahap produksi menunjukkan yang paling signifikan dalam menghasilkan emisi tertinggi. Pada tahap produksi terdapat 3 kategori yang tertinggi dalam menghasilkan emisi yaitu *marine ecotoxicity* dengan nilai dampak 27,3, *freshwater ecotoxicity* dengan nilai dampak 17,5, dan *human carcinogenic toxicity* dengan nilai dampak 13,5. Ketiga kategori tersebut memiliki kontribusi terbesar dalam nilai dampak *normalization*. Kategori tersebut disebabkan oleh tahap produksi yang menghasilkan dampak terbesar dibandingkan tahap lainnya. Selain itu, penggunaan bahan bakar untuk

transportasi berupa *forklift* dan truk dalam proses rantai pasok internal juga berkontribusi menghasilkan berbagai emisi gas seperti NO_x, CH₄, CO, CO₂, SO₂, HC, dan TSP.

Pembahasan

Berdasarkan analisis *Life Cycle Inventory* dan *Life Cycle Impact Assessment* terhadap proses rantai pasok produk Tepung Bumbu, ditemukan beberapa dampak signifikan yang mempengaruhi tingkat *sustainability*. Emisi dihasilkan dari tiga tahapan utama: tahap kedatangan material, tahap produksi, dan tahap penyimpanan produk. Pada tahap kedatangan material dan penyimpanan produk, emisi berasal dari penggunaan *forklift* dan truk serta konsumsi listrik untuk operasional, sementara pada tahap produksi, emisi terutama dihasilkan dari penggunaan listrik untuk mengoperasikan mesin-mesin produksi dan sistem pendukung operasional. Hasil karakterisasi menunjukkan beberapa dampak lingkungan telah melampaui standar emisi Indonesia, seperti *terrestrial acidification* yang mencapai 4,97 kg.SO₂, jauh di atas batas standar nasional sebesar 600 mg.SO₂ atau 525,6 kg.SO₂ per tahun (1,463 kg.SO₂ per hari). Hasil normalisasi mengidentifikasi tahap produksi sebagai kontributor terbesar dengan tiga kategori dampak utama: *marine ecotoxicity* dengan nilai dampak 27,3, *freshwater ecotoxicity* dengan nilai dampak 17,5, dan *human carcinogenic toxicity* dengan nilai dampak 13,5. Analisis lebih mendalam mengungkapkan bahwa sistem pendukung operasional, mesin Hammer Mill 1 dan 2, serta tingginya penggunaan listrik dalam proses produksi menjadi penyebab utama dampak lingkungan. Selain itu, penggunaan transportasi juga berkontribusi terhadap emisi berbagai gas seperti NO_x, CH₄, CO, CO₂, SO₂, HC, dan TSP. Temuan-temuan ini menunjukkan perlunya perhatian khusus terhadap efisiensi penggunaan energi dan *optimalisasi* proses produksi untuk meningkatkan *sustainability*.

Untuk mengatasi dampak lingkungan yang diidentifikasi dalam proses rantai pasok Tepung Bumbu, diusulkan empat rekomendasi perbaikan utama. Pertama, *optimalisasi* energi produksi yang dapat dicapai melalui penggantian mesin dengan teknologi yang lebih efisien, pelaksanaan *maintenance* berkala, pemasangan sistem *monitoring* konsumsi energi *real-time*, dan *optimalisasi* jadwal produksi untuk mengurangi waktu *idle* mesin. Kedua, pengelolaan waktu operasional mesin dengan membuat jadwal penggunaan berdasarkan kebutuhan produksi dan pemasangan sensor otomatis untuk mematikan mesin saat tidak digunakan. Ketiga, pemanfaatan solar panel sebagai sumber energi alternatif untuk mendukung kebutuhan operasional, yang dapat membantu mengurangi konsumsi listrik dan menurunkan emisi karbon. Keempat, penggunaan bahan bakar ramah lingkungan dengan beralih ke biodiesel atau kendaraan dengan teknologi hemat energi dan kendaraan listrik. Implementasi rekomendasi-rekomendasi ini direncanakan untuk dilakukan secara bertahap dengan mempertimbangkan berbagai aspek termasuk teknis, ekonomis, dan dampak lingkungan. Pendekatan bertahap ini bertujuan untuk memastikan efektivitas dan efisiensi dalam upaya mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan selama daur hidup produk.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, proses rantai pasok produk Tepung Bumbu menghasilkan tingkat emisi yang cukup tinggi. Analisis *characterization* menunjukkan beberapa dampak lingkungan telah melampaui standar emisi Indonesia, seperti *terrestrial acidification* yang mencapai 4,97 kg.SO₂, jauh di atas batas standar nasional sebesar 600 mg.SO₂ atau 525,6 kg.SO₂ per tahun. Hasil *normalization* mengidentifikasi bahwa tahap produksi berkontribusi signifikan pada tiga kategori utama: *marine ecotoxicity* dengan nilai dampak 27,3, *freshwater ecotoxicity* dengan nilai dampak 17,5, dan *human carcinogenic toxicity* dengan nilai dampak 13,5. Tingginya emisi pada tahap produksi terutama disebabkan oleh konsumsi listrik yang besar untuk sistem pendukung operasional dan mesin produksi seperti Hammer Mill, serta penggunaan alat transportasi pada tahap kedatangan material dan penyimpanan produk. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, direkomendasikan beberapa solusi perbaikan meliputi *optimalisasi* energi produksi, pengelolaan waktu operasional mesin yang lebih efisien, pemanfaatan solar panel, dan

penerapan bahan bakar ramah lingkungan untuk mengurangi dampak lingkungan secara efektif. Penelitian ini memberikan kontribusi penting bagi pengembangan pengetahuan tentang pengukuran emisi karbon dalam industri bumbu masakan melalui integrasi metode *Life Cycle Assessment* dan *software* SimaPro 9.0. Framework yang dikembangkan dalam penelitian ini tidak hanya menawarkan pendekatan sistematis untuk mengukur dampak lingkungan pada rantai pasok internal, tetapi juga memberikan pemahaman mendalam tentang area-area kritis yang berkontribusi terhadap emisi karbon dalam industri bumbu masakan. Hasil penelitian ini dapat menjadi acuan bagi industri sejenis dalam mengembangkan strategi pengelolaan rantai pasok yang lebih berkelanjutan.

DAFTAR RUJUKAN

- Abdirad, M., & Krishnan, K. (2021). Industry 4.0 in Logistics and Supply Chain Management: A Systematic Literature Review. *Engineering Management Journal*, 33(3), 187–201. <https://doi.org/10.1080/10429247.2020.1783935>
- Achmad, A. S., & Rosariawati, F. (2021). Analisis Dampak Lingkungan pada Proses Produksi Pupuk SP-36 Dengan Metode *Life Cycle Assessment* (LCA). *Jurnal EnviroUS*, 4(1), 109–116. <https://doi.org/10.33005/enviroUS.v4i1.160>
- Alam, N., & Sutardjo, T. (2022). Pengaruh Supply Chain Management Terhadap Keunggulan Kompetitif dan Kinerja Pada Perusahaan Manufaktur. *Journal of Management*, 5(3), 367–382.
- Concetta, M., Creazza, A., & Colicchia, C. (2023). Crossing the chasm: investigating the relationship between sustainability and resilience in supply chain management. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 7, 100098. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2023.100098>
- Deborah, N., & Sugihartanto, M. F. (2023). Penilaian Manajemen Rantai Pasok Sustainable Packaging: Studi Literatur. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 12(2), 2337–3520. <https://doi.org/10.12962/j23373520.v12i2.111600>
- Devi, S. A. (2023). Analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) pada Proses Produksi Pupuk ZA II Menggunakan Metode Recipe 2016. *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, 2(3), 620–632. <https://doi.org/10.55123/insologi.v2i3.2074>
- Dian, R. (2023). Penggunaan Metode *Life Cycle Assessment* (LCA) Sebagai Pendukung Pengambilan Keputusan Dampak Lingkungan Pada Industri Kelapa Sawit. *Jurnal BETAHPA*, 2(2), 7–15.
- Dumitrascu, O., Dumitrascu, M., & Dobrotă, D. (2020). Performance Evaluation for a Sustainable Supply Chain Management System in the Automotive Industry Using Artificial Intelligence. *Journal Processes*, 8(11), 1–20. <https://doi.org/10.3390/pr8111384>
- Faturahman, F. (2021). Analisis Pengukuran Kinerja Supply Chain Management (SCM) Terhadap Kinerja dan Daya Saing Pada CV Polacindo Beka. *Jurnal Bina Bangsa Ekonomika*, 14(2), 427–430.
- Futari, M. Y. R. (2023). Kajian Dampak Proses Pengolahan Minyak Bumi Di PT. X Terhadap Lingkungan Dengan Menggunakan Metode *Life Cycle Assessment* (LCA). *Prosiding ESEC*, 4(1), 41–47.
- Goni, A. G., Palendeng, I. D., & Pondaag, J. J. (2022). Analisis Rantai Pasok (Supply Chain) Minuman Cap Tikus (Studi pada Petani Desa Palamba Kecamatan Langowan Selatan). *Jurnal EMBA: Jurnal Riset Ekonomi, Manajemen, Bisnis dan Akuntansi*, 10(2), 358–367. <https://doi.org/10.35794/emba.v10i2.39813>
- Hartanto, N. K. (2023). Analysis of The Implementation of Sustainable Supply Chain Management Based on Ispo Certification Principles in Palm Oil Companies in Indonesia in 2021. *Journal of Social and Economics Research*, 5(2), 341–361. <https://doi.org/10.54783/jser.v5i2.123>
- Kazemi, N., Gholami, M., Mohammadi, A., & Mohammad, D. Z. (2023). Environmental *Life Cycle Assessment* and energy-economic analysis in different cultivation of microalgae-based optimization method. *Results in Engineering*, 19, 101240. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101240>

- Kelvin. (2021). Analisis Dampak Lingkungan dari Perusahaan Jasa Konstruksi di Surabaya Dengan *Software* SimaPro. *Journal of Information System, Graphics, Hospitality and Technology*, 3(02), 70–74. <https://doi.org/10.37823/insight.v3i02.173>
- Kurnia, M., Arifin, J., & Sari, R. P. (2024). Optimalisasi Biaya Distribusi Dan Alokasi Produk Dengan Menggunakan Metode Transportasi. *JISI: Jurnal Integrasi Sistem Industri*, 11(1), 32–43. <https://doi.org/10.24853/jisi.11.14>
- Maisaroh. (2021). Dampak Penerapan Rantai Pasokan Berkelanjutan Terhadap Keunggulan Kompetitif Pada UMKM Konveksi di Desa Nogotirto. *Jurnal Manajemen dan Teknik Industri-Produksi*, 22(1), 85–94. <https://doi.org/10.30587/matrik.v22i1.2382>
- Maula, G. M. (2024). Efektivitas Implementasi Kebijakan Pengendalian Pencemaran Udara di Indonesia. *Savana: Indonesian Journal of Natural Resources and Environmental Law*, 1(2), 145–159. <https://doi.org/10.25134/savana.v1i2.223>
- Muhammad, K., & Syahrullah, Y. (2022). Penerapan *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk Mengurangi Dampak Lingkungan pada Proses Produksi IKM Knalpot Purbalingga. *SPECTA: Journal of Technology*, 6(1), 1–9. <https://doi.org/10.35718/specta.v6i1.287>
- Pratama, A. (2022). Pengaruh Industrialisasi Terhadap Emisi CO₂ Di Indonesia. *Jurnal Ecodemica Jurnal Ekonomi Manajemen dan Bisnis*, 6(1), 98–110. <https://doi.org/10.31294/eco.v6i1.11726>
- Robertson, P. W. (2021). *Supply Chain Processes Developing Competitive Advantage Through Supply Chain Process Excellence*. Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.4324/9781003084037>
- Sánchez-Flores, R. B., Cruz-Sotelo, S. E., Ojeda-Benitez, S., & Ramírez-Barreto, Ma. E. (2020). Sustainable *Supply Chain* Management—A Literature Review on Emerging Economies. *Sustainability*, 12(17), 6972. <https://doi.org/10.3390/su12176972>
- Ula, R. A., Prasetya, A., & Haryanto, I. (2021). *Life Cycle Assessment* (LCA) Pengelolaan Sampah di TPA Gunung Panggung Kabupaten Tuban, Jawa Timur. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 22(2), 147–161. <https://doi.org/10.29122/jtl.v22i2.4690>
- Yani, M. (2021). Kajian Dampak Lingkungan Produk Tepung Agar Menggunakan Metode *Life Cycle Assessment* (LCA). *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 31(3), 343–355.
- Yekti, H. S. (2023). Analisis Dampak Pencemaran Lingkungan dengan Metode *Life Cycle Assesment* (LCA) pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) PT. Surabaya Industrial Estate Rungkut (SIER) Surabaya. *Envirous*, 1(2), 119–128. <https://doi.org/10.33005/envirous.v1i2.47>
- Yusuf, A. M., & Soediantono, D. (2022). *Supply Chain* Management and Recommendations for Implementation in the Defense Industry: A Literature Review. *International Journal of Social and Management Studies*, 3(3), 63–77.