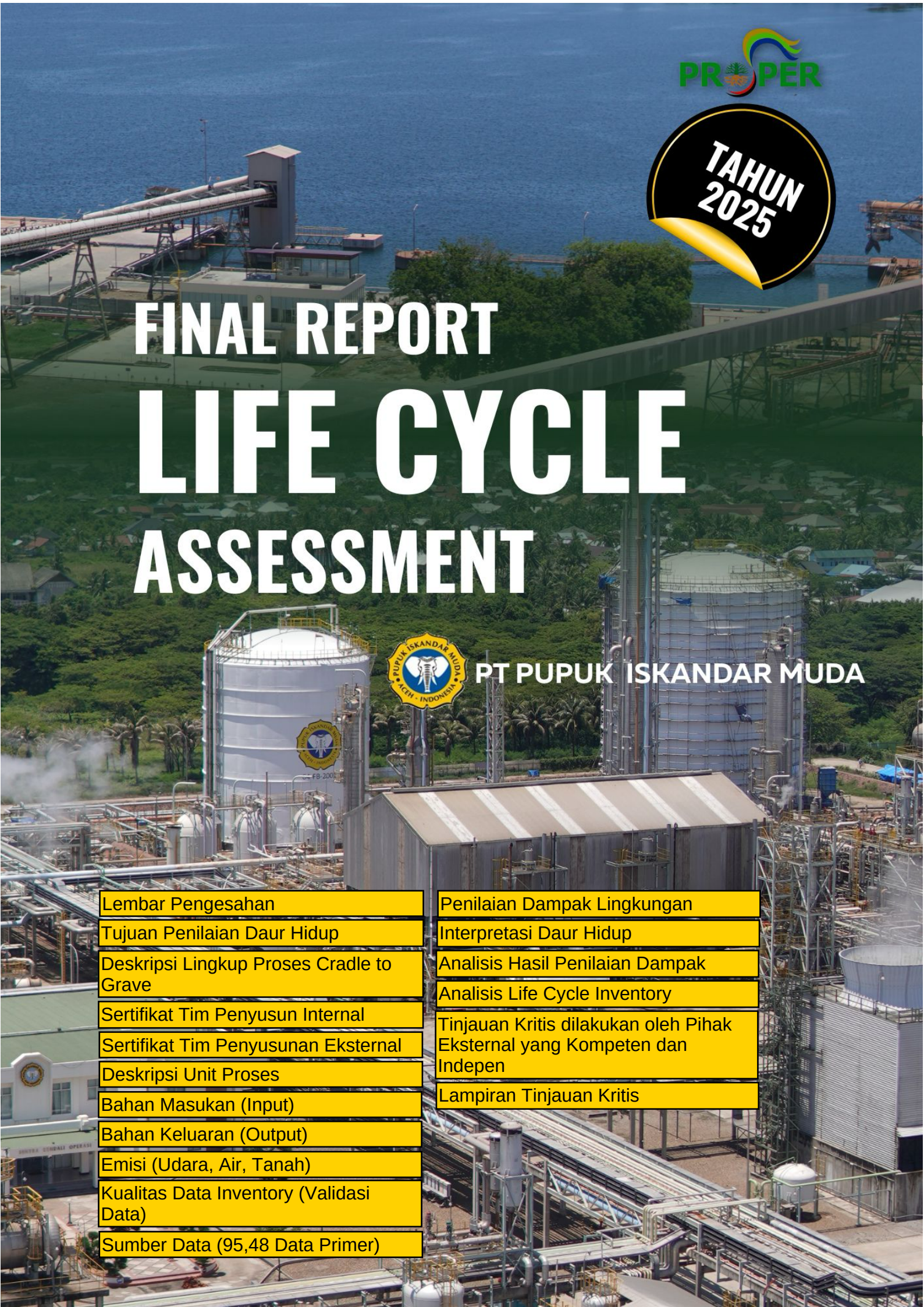


PROPER

TAHUN 2025

FINAL REPORT

LIFE CYCLE ASSESSMENT

PT PUPUK ISKANDAR MUDA

- Lembar Pengesahan
- Tujuan Penilaian Daur Hidup
- Deskripsi Lingkup Proses Cradle to Grave
- Sertifikat Tim Penyusun Internal
- Sertifikat Tim Penyusunan Eksternal
- Deskripsi Unit Proses
- Bahan Masukan (Input)
- Bahan Keluaran (Output)
- Emisi (Udara, Air, Tanah)
- Kualitas Data Inventory (Validasi Data)
- Sumber Data (95,48 Data Primer)
- Penilaian Dampak Lingkungan
- Interpretasi Daur Hidup
- Analisis Hasil Penilaian Dampak
- Analisis Life Cycle Inventory
- Tinjauan Kritis dilakukan oleh Pihak Eksternal yang Kompeten dan Indepen
- Lampiran Tinjauan Kritis

LEMBAR PENGESAHAN

Life Cycle Assessment (LCA) PT Pupuk Iskandar Muda yang disusun oleh Tim LCA PT Pupuk Iskandar Muda bekerja sama dengan pihak ketiga independen tim LKFT UGM untuk melakukan kajian dengan ruang lingkup *Cradle to Grave*, dan laporan kajian tersebut disetujui dan disahkan pada :

Hari/Tanggal : Selasa, 30 September 2025
Pemrakarsa : PT Pupuk Iskandar Muda
Pelaksana Internal : Tim LCA PT Pupuk Iskandar Muda

1. Usman
2. Heri Afriadi Aka
3. Abdullah
4. Budi Khaseru
5. Sujuddin Wahyu
6. Rezky Mastura
7. Sri Wahyuni
8. Muhammad Hijrin
9. Siti Shara
10. Danil Maha Putra

Pelaksana Eksternal : Tim LCA Pusat Kajian LKFT UGM

1. Dr. Ir. Jonas Kristanto, S.T.
2. Ir. Titi Tiara Anasstasia, S.T., M.Sc

Krueng Geukueh, 30 September 2025
Hormat Kami,

PT Pupuk Iskandar Muda	Pusat Kajian LKFT UGM
Penanggung Jawab Pelaksana Internal	Penanggung Jawab Pelaksana Eksternal
Usman	Dr. Jonas Kristanto, S.T.
Manajer Lingkungan	Pelaksana

Mengetahui,

Pembina Tim Pengelola Lingkungan	Kepala Pusat Kajian LKFT UGM
Muhammad Ali	Dr. Ir. Bambang Kun Cahyono, S.T., M.Sc., IPU.

Laporan Akhir Life Cycle Assessment
PT Pupuk Iskandar Muda
Tahun 2025

Pihak PT Pupuk Iskandar Muda

1	Usman	1.....
2	Abdullah	2.....
3	Rezky Mastura	3.....
4	Danil Maha Putra	4.....
5	Heri Afriadi Aka	5.....
6	Budi Khaseru	6.....
7	Sujuddin Wahyu	7.....
8	Sri Wahyuni	8.....
9	Muhammad Hijrin	9.....
10	Siti Shara	10.....

Pihak Konsultan Life Cycle Assessment

1	Dr. Ir. Jonas Kristanto, S.T	1.....
2	Ir. Titi Tiara Anasstasia, S.T., M.Sc	2.....

KATA PENGANTAR

Kajian Life Cycle Assessment (LCA) dilaksanakan oleh PT Pupuk Iskandar Muda (PT PIM) sebagai upaya untuk melakukan evaluasi dampak lingkungan dari produksi pupuk Urea dan Amonia. Selain itu kajian ini juga sangat berguna untuk mengidentifikasi titik-titik perbaikan proses kerja di setiap tahapan proses produksi berdasarkan nilai potensi dampak. Produksi pupuk Urea dan Amonia dalam dikaji dalam lingkup Cradle-to-Grave yang meliputi: proses ekstraksi bahan baku, proses produksi di pabrik hingga distribusi produk pupuk Urea dan Amonia.

Terselesaikannya kajian LCA PT PIM Tahun 2025 ini merupakan wujud nyata kerja sama berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, kami sampaikan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada para pihak yang telah mendukung laporan ini:

1. Manajemen PT PIM yang telah memberikan dukungan dalam melakukan kajian LCA.
2. Departemen Keselamatan, Kesehatan Kerja dan Lingkungan Hidup, Departemen Pengendalian Proses & Energi, Departemen Operasi Pabrik yang telah berkontribusi dalam pelaksanaan LCA mulai dari pengumpulan data hingga penyusunan laporan akhir.
3. Tim LCA Pusat Kajian LKFT, Universitas Gadjah Mada yang telah membantu pelaksanaan seluruh tahapan pembuatan kajian LCA.

Besar harapan laporan hasil kajian LCA ini dapat diterima dan memberikan informasi yang utuh mengenai dampak lingkungan dari produksi pupuk Urea dan Amonia dalam lingkup Cradle-to-Grave, serta menjadi acuan dalam melaksanakan perbaikan di masa yang akan datang guna menurunkan potensi dampak lingkungan selama proses produksi. Tim penyusun menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu kritik dan saran dari semua pihak yang bersifat membangun selalu kami harapkan demi kesempurnaan hasil kajian ini.

Krueng Geukueh, 30 September 2025

Muhammad Ali
Pembina Tim Pengelola Lingkungan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN ..... **II**

LEMBAR PENGESAHAN TIM PENYUSUN ..... **III**

KATA PENGANTAR ..... **IV**

DAFTAR ISI ..... **V**

DAFTAR TABEL ..... **VII**

DAFTAR GAMBAR ..... **IX**

IDENTITAS PEMRAKARSA LCA X

NAMA PRAKTISI LCA X

TANGGAL PUBLIKASI LAPORAN X

PERNYATAAN TELAH DILAKUKAN SESUAI STANDAR YANG DIRUJUK X

PERNYATAAN BAHWA DOKUMEN DAN DATA DI DALAMNYA ADALAH UNTUK PROPER DAN TIDAK BERSIFAT PUBLIK. PENGGUNAAN DATA ADALAH SEIZIN PERUSAHAAN ATAU SEKRETARIAT PROPER X

BAB 1. PENDAHULUAN **11**

1.1. LATAR BELAKANG 11
1.2. PROFIL PERUSAHAAN 12

BAB 2. TUJUAN DAN LINGKUP **15**

2.1. TUJUAN KAJIAN 15
2.1.1. Tujuan penerapan 15
2.1.2. Pihak yang dituju 15
2.1.3. Pernyataan komparatif yang ditujukan untuk disampaikan ke masyarakat 16
2.2. LINGKUP LCA 16
2.2.1. Unit fungsi atau unit deklarasi dan aliran acuan 16
2.2.2. Batasan Sistem Kajian 16

BAB 3. METODE PELAKSANAAN LCA **25**

3.1. STANDAR ATAU REFERENSI YANG DIRUJUK 25
3.2. METODE PERHITUNGAN YANG DIGUNAKAN 25
3.3. PEMILIHAN METODE PENILAIAN DAMPAK 25

BAB 4. INVENTORI DAUR HIDUP **27**

4.1 Deskripsi Kualitatif Unit Proses 27
4.2 PROSEDUR PENGUMPULAN DATA 29
4.3 Sumber Literatur 29
4.4 Prosedur Perhitungan Data 30
4.5 Inventori Data 33
4.6 VALIDASI DATA 37
4.6.1 Penilaian kualitas data 37
4.6.2 Perlakuan atas data yang hilang 46

BAB 5. PENILAIAN DAMPAK DAUR HIDUP **47**

5.1. PROSEDUR PENILAIAN DAMPAK DAUR HIDUP (LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT/LCIA) 47
5.2. KATEGORI DAMPAK, INDIKATOR DAMPAK, DAN HASIL PENILAIAN DAMPAK DAUR HIDUP 47
5.3. KETERBATASAN HASIL LCIA RELATIF TERHADAP TUJUAN DAN LINGKUP LCA....51
5.4. ANALISA KETERKAITAN LCIA DENGAN TUJUAN DAN LINGKUP LCA....52
5.5. ANALISA KETERKAITAN LCIA DENGAN HASIL LCI 52
5.6. PERNYATAAN LCIA SEBAGAI EKSPRESI RELATIF DAN TIDAK MEMPREDIKSI DAMPAK KATEGORI ENDPOINT 54
BAB 6. INTERPRETASI DAUR HIDUP 55
6.1. IDENTIFIKASI ISU PENTING....55
6.2. EVALUASI PEMERIKSAAN KELENGKAPAN, ANALISIS SENSITIVITAS, ANALISIS KETIDAKPASTIAN, DAN KONSISTENSI 66
6.2.1. Pemeriksaan kelengkapan....66
6.2.2. Analisis sensitivitas 68
6.2.3. Analisis ketidakpastian....70
6.2.4. Pemeriksaan konsistensi 71
BAB 7. KESIMPULAN, KETERBATASAN, DAN REKOMENDASI....73
7.1. Kesimpulan 73
7.2. Keterbatasan....74
7.3. Rekomendasi 75
DAFTAR PUSTAKA....77
LAMPIRAN 1. INVENTORY DATA....78
LAMPIRAN 2. HASIL MONTE CARLO 91
LAMPIRAN 3. FAKTOR NORMALISASI....97
LAMPIRAN 4. DAFTAR REFERENSI PERANGKAT LUNAK....98
LAMPIRAN 5. PEDIGREE MATRIX FOR DATA SENSITIVITY....99
LAMPIRAN 6. TINJAUAN KRITIS....100
PROSES REVIEW 100
HASIL EVALUASI UMUM OLEH PANEL PENINJAU....100
LAMPIRAN 7. SWADEKLARASI TINJAUAN KRITIS 1 106
LAMPIRAN 8. SWADEKLARASI TINJAUAN KRITIS 2 107
LAMPIRAN 9. DATA TIM PENYUSUN INTERNAL 108
LAMPIRAN 10. BIODATA PENYUSUN EKSTERNAL 109
INDEKS LAPORAN 110
DAFTAR ISTILAH....112
DAFTAR SINGKATAN....114

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Jenis produk dan standar yang menjadi ruang lingkup dari kajian LCA 16
Tabel 2. Klasifikasi sumber data produksi pupuk Urea dan Amonia di PT PIM 17
Tabel 3. Alokasi produksi pupuk Urea dan Amonia di PT PIM Tahun 2025 19
Tabel 4. Pengumpulan data kajian LCA produksi pupuk Urea dan Amonia PT. PIM Tahun 2025 19
Tabel 5. Persyaratan kualitas data kajian LCA Produksi Pupuk Urea dan Amonia PT Pupuk Iskandar Muda Tahun 2025 21
Tabel 6. Kategori dampak, indikator kategori dan metode kategori dampak yang digunakan dalam kajian 25
Tabel 7. Deskripsi unit proses produksi pupuk Urea dan Amonia di PT PIM 27
Tabel 8. Sumber Literatur 29
Tabel 9. Ringkasan Inventori di Proses Produksi Pupuk Urea dan Amonia Sesuai Dengan Total Dalam Periode Kajian dan Unit Fungsi 33
Tabel 10. Kualitas Data 37
Tabel 11. Rangkuman sumber dataset LCA PIM 2025 43
Tabel 12. Proporsi Kelengkapan Data Kajian LCA 44
Tabel 13. Kategori Dampak Berdasarkan Karakterisasi Tahap Daur Hidup (FU: 1 ton produk Urea dan Amonia) 49
Tabel 14. Kategori Dampak Jejak Air (FU: 1 ton produk Urea dan Amonia) 50
Tabel 15. Keterkaitan LCIA dan LCI: Potensi Hujan Asam, Potensi Eutrofikasi, Toxicity, Global Warming Potential, dan Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil) 52
Tabel 16. Isu penting berdasarkan rasio alokasi produk 56
Tabel 17. Nilai intensitas kategori dampak berdasarkan isu penting setiap subsistem core process di PT PIM Tahun 2025 58
Tabel 18. Program-program upaya penurunan kategori dampak 60
Tabel 19. Integrasi Program B3 pada kategori dampak isu penting 63
Tabel 20. Integrasi program pengelolaan sampah pada kategori dampak isu penting ..64
Tabel 21. Integrasi program efisiensi energi pada kategori dampak isu penting 64
Tabel 22. Integrasi program emisi pada kategori dampak isu penting 65
Tabel 23. Integrasi program efisiensi air dan penurunan beban pencemar air pada kategori dampak isu penting 66
Tabel 24. Pemeriksaan Sensitivitas Sebelum dan Setelah Program 68
Tabel 25. Analisis Sensitivitas Untuk program Pupuk Multinutrisi 69
Tabel 26. Analisis ketidakpastian dengan simulasi Monte-Carlo 70
Tabel 27. Hasil analisis konsistensi 71
Tabel 28. Inventori RWI 78
Tabel 29. Inventori Filter Water System 78
Tabel 30. Polished Water System 79
Tabel 31. Inventori Steam Utility 79
Tabel 32. Inventori Electricity Utility 80
Tabel 33. Inventory QC Urea 81
Tabel 34. Inventori ASP 82
Tabel 35. Water Treatment Plant 82
Tabel 36. Inventori Ammonia Plant 84

Tabel 37. Inventori Urea Plant 87
Tabel 38. Inventori Gudang.....87
Tabel 39. Inventori Transport.....89
Tabel 40. Inventori End of Life 89

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Sistem Produk Kajian LCA PT PIM 2025 18
Gambar 2. Neraca Massa Produksi Pupuk Urea dan Amonia PT PIM Tahun 2025 28
Gambar 3. Rute dan Jarak transportasi produk pupuk Urea dari PT PIM ke konsumen (Medan).....30
Gambar 4. Hasil pembobotan kategori dampak Metode World 2000.....56

Versi Laporan dan Riwayat Dokumen

Tanggal	Versi	Pemangku Kepentingan	Keterangan
20 September 2025	1.1	PT PIM	Versi sebelum tinjauan kritis
30 September 2025	1.5	PT PIM, Peninjau Kritis	Versi setelah tinjauan kritis
	1.7	Sekretariat PROPER	Versi submit

Identitas Pemrakarsa LCA

Laporan LCA ini diprakarsai oleh Muhammad Ali, Pembina Tim Pengelola Lingkungan PT Pupuk Iskandar Muda dengan alamat Jalan Medan Banda Aceh PO. Box 021 Krueng Geukeuh Aceh Utara Indonesia.

Website : https://www.pim.co.id/
Telepon : (62-645) 56095
E-mail : info@pim.co.id

Nama Praktisi LCA

- Ketua: Usman
- Anggota:
  - Usman (Internal PT PIM)
  - Abdullah (Internal PT PIM)
  - Rezky Mastura (Internal PT PIM)
  - Danil Mahaputra (Internal PT PIM)
  - Heri Afriadi Aka (Internal PT PIM)
  - Budi Khaseru (Internal PT PIM)
  - Sujuddin Wahyu (Internal PT PIM)
  - Sri Wahyuni (Internal PT PIM)
  - Muhammad Hijrin (Internal PT PIM)
  - Siti Shara (Internal PT PIM)
  - Dr. Ir. Jonas Kristanto, S.T (Eksternal; UGM)
  - Ir. Titi Tiara Anasstasia, S.T., M.Sc. (Eksternal; UPNVY)

Tanggal Publikasi Laporan

30 September 2025

Pernyataan Telah Dilakukan Sesuai Standar yang Dirujuk

Laporan Analisis Daur Hidup (Life Cycle Assessment) PT PIM telah dilakukan sesuai standar SNI ISO 14040-2016; SNI ISO 14044-2017; dan Permen LH No. 7 Tahun 2025. Penulisan Laporan serta disesuaikan dengan Pedoman Penyusunan Laporan LCA PROPER 2021.

Pernyataan bahwa dokumen dan data di dalamnya adalah untuk PROPER dan tidak bersifat publik. Penggunaan data adalah seizin perusahaan atau Sekretariat PROPER

Laporan Analisis Daur Hidup (Life Cycle Assessment) PT PIM merupakan dokumen yang disusun untuk pemenuhan dokumen hijau PROPER 2025 dan tidak bersifat publik. Dilarang menggunakan data pada laporan ini tanpa izin tertulis dari PT PIM atau Sekretariat PROPER KLH.

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Industri pupuk merupakan salah satu sektor strategis dalam pembangunan nasional Indonesia. Sektor ini memiliki peranan penting tidak hanya sebagai penyedia sarana produksi pertanian, tetapi juga sebagai pilar utama dalam menjaga ketahanan pangan nasional, meningkatkan produktivitas pertanian, dan mendorong pertumbuhan ekonomi di berbagai daerah. Dalam konteks sistem pertanian modern, ketersediaan pupuk menjadi faktor yang sangat menentukan dalam peningkatan hasil panen dan efisiensi lahan pertanian. Pupuk berfungsi menggantikan unsur hara yang hilang dari tanah akibat proses budidaya tanaman yang intensif, sehingga mampu menjaga kesuburan tanah dan memastikan keberlanjutan produksi pertanian. Indonesia sebagai negara agraris dengan jumlah penduduk yang terus meningkat memiliki kebutuhan pupuk yang sangat besar. Peningkatan jumlah penduduk berdampak langsung terhadap peningkatan kebutuhan pangan nasional. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, sektor pertanian dituntut untuk berproduksi secara lebih intensif dan efisien. Salah satu langkah kunci dalam mencapai hal tersebut adalah melalui penggunaan pupuk kimia, terutama pupuk Urea dan Amonia, yang berfungsi menambah unsur nitrogen (N) bagi tanaman. Nitrogen merupakan unsur esensial yang berperan penting dalam pembentukan protein, daun, serta pertumbuhan vegetatif tanaman, sehingga sangat memengaruhi produktivitas hasil panen.

Sejalan dengan meningkatnya kebutuhan pangan, permintaan terhadap pupuk di dalam negeri juga terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Kondisi ini menjadikan industri pupuk domestik berperan ganda: di satu sisi sebagai penyedia input penting bagi sektor pertanian, dan di sisi lain sebagai sektor industri strategis yang memberikan kontribusi signifikan terhadap perekonomian nasional. Menurut data dari Kementerian Perindustrian, industri pupuk termasuk ke dalam kelompok industri prioritas nasional, mengingat perannya yang vital dalam mendukung ketahanan pangan serta kestabilan ekonomi makro. Namun, di tengah perannya yang sangat penting, industri pupuk juga menghadapi tantangan besar dalam aspek lingkungan. Proses produksi pupuk kimia, terutama Urea dan Amonia, memerlukan konsumsi energi yang sangat tinggi dan menghasilkan emisi gas rumah kaca dalam jumlah besar, terutama karbon dioksida (CO_2). Selain itu, penggunaan bahan baku berbasis gas alam dan adanya potensi timbulan limbah cair maupun padat dari kegiatan produksi menimbulkan risiko terhadap kualitas lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Oleh karena itu, keseimbangan antara peningkatan produktivitas dan pengendalian dampak lingkungan menjadi isu penting yang harus diperhatikan oleh industri pupuk modern.

Seiring dengan meningkatnya kesadaran global terhadap isu perubahan iklim dan keberlanjutan, industri pupuk nasional dituntut untuk bertransformasi menuju sistem produksi yang lebih efisien, rendah emisi, dan ramah lingkungan. Pemerintah Indonesia melalui Kementerian Perindustrian dan Kementerian Lingkungan Hidup (KLH) telah mendorong penerapan konsep industri hijau (green industry) sebagai bagian dari strategi pembangunan berkelanjutan. Salah satu pendekatan ilmiah yang diakui secara internasional dalam menilai dan mengendalikan dampak lingkungan dari suatu produk atau proses adalah Life Cycle Assessment (LCA). LCA merupakan metode komprehensif yang digunakan untuk mengevaluasi potensi dampak lingkungan dari suatu produk, proses, atau layanan sepanjang siklus hidupnya — mulai dari tahap pengadaan bahan baku (cradle),

proses produksi (gate), distribusi, penggunaan, hingga penanganan limbah pada akhir siklus hidupnya (grave). Dengan pendekatan ini, perusahaan dapat mengidentifikasi tahapan-tahapan produksi yang memberikan kontribusi terbesar terhadap beban lingkungan (hotspot), sehingga dapat ditentukan strategi mitigasi yang paling efektif.

Penerapan LCA di sektor industri pupuk menjadi sangat penting mengingat kompleksitas proses produksinya yang melibatkan berbagai input energi, bahan baku kimia, serta emisi gas hasil reaksi. Melalui LCA, perusahaan tidak hanya dapat menilai efisiensi proses dari sisi teknis dan ekonomi, tetapi juga memperoleh pemahaman mendalam tentang dampak lingkungannya secara kuantitatif. Dengan demikian, hasil kajian LCA dapat menjadi dasar dalam perumusan kebijakan pengelolaan lingkungan, peningkatan efisiensi energi, serta inovasi teknologi yang berkelanjutan. Dalam konteks nasional, salah satu perusahaan yang telah berkomitmen terhadap penerapan prinsip keberlanjutan lingkungan adalah PT Pupuk Iskandar Muda (PT PIM). Sebagai salah satu produsen utama pupuk Urea dan Amonia di Indonesia yang tidak hanya berperan dalam mendukung ketersediaan pupuk bagi sektor pertanian, tetapi juga menjadi pionir dalam penerapan praktik industri hijau melalui pendekatan ilmiah berbasis LCA. Penerapan metode ini menunjukkan bahwa keberhasilan industri pupuk masa depan tidak hanya diukur dari besarnya kapasitas produksi, tetapi juga dari kemampuannya dalam mengelola dampak lingkungan dan sosial secara bertanggung jawab. Dengan demikian, kajian terhadap penerapan LCA di PT PIM menjadi penting untuk memahami sejauh mana upaya perusahaan dalam menyeimbangkan produktivitas dan keberlanjutan lingkungan. Kajian ini juga menjadi bentuk kontribusi nyata terhadap upaya nasional dalam mewujudkan industri pupuk yang berdaya saing tinggi, efisien dalam penggunaan sumber daya, serta sejalan dengan prinsip pembangunan berkelanjutan.

1.2. Profil Perusahaan

PT Pupuk Iskandar Muda (PT PIM) memiliki peranan yang cukup vital. Perusahaan ini merupakan pabrik pupuk Urea pertama di Indonesia yang dibangun dan dioperasikan oleh tenaga ahli dalam negeri Indonesia di awal kemerdekaan Indonesia, dengan kontraktor utama PT Rekayasa Industri. Peresmian operasi dilakukan pada 24 Februari 1982, menandai tonggak sejarah baru dalam kemandirian industri pupuk nasional. Sebagai bagian dari PT Pupuk Indonesia (Persero), PT PIM kini berperan dalam mendukung sistem distribusi pupuk bersubsidi maupun komersial di berbagai daerah. Perusahaan ini mengoperasikan dua unit pabrik utama, yaitu PIM-1 dan PIM-2, yang masing-masing terdiri atas fasilitas produksi Urea, Amonia, serta unit utilitas penunjang.

Secara geografis, lokasi pabrik PT PIM berada di tepi Sungai Krueng Geukueh, Kecamatan Dewantara, Kabupaten Aceh Utara, Provinsi Aceh. Keberadaan pabrik di kawasan ini memiliki keunggulan strategis karena didukung oleh akses transportasi laut dan darat, sehingga mempermudah distribusi produk ke berbagai wilayah Indonesia, termasuk ke daerah-daerah terpencil di Sumatera maupun wilayah lain melalui jalur pelabuhan. Kompleks industri PT PIM memiliki luas sekitar 324 hektar, dengan pembagian lahan yang terencana: 162 hektar untuk area pabrik utama, 81 hektar untuk pengembangan kawasan industri, dan 81 hektar sisanya untuk sarana penunjang, seperti perkantoran, perumahan karyawan, fasilitas umum, hingga kawasan konservasi tanaman langka dan penangkaran rusa. Pembagian lahan ini menunjukkan adanya integrasi antara kegiatan

industri, kebutuhan sosial, dan program tanggung jawab lingkungan perusahaan.

Produk utama yang dihasilkan PT PIM adalah pupuk Urea dengan kapasitas produksi terpasang sebesar 1.140.000 ton per tahun, serta Amonia dengan kapasitas 782.000 ton per tahun. Proses produksi dilakukan dengan teknologi modern melalui beberapa tahapan. Pertama, gas alam diproses melalui steam reforming untuk menghasilkan hidrogen (H_2) dan karbon dioksida (CO_2). Hidrogen yang diperoleh kemudian direaksikan dengan nitrogen (N_2) dari udara untuk menghasilkan Amonia (NH_3). Selanjutnya, Amonia tersebut diproses lebih lanjut dengan karbon dioksida untuk menghasilkan pupuk Urea sebagai produk akhir. Keseluruhan proses ini didukung oleh unit-unit produksi utama seperti ammonia plant, Urea plant, utility plant, waste water treatment plant (WWTP), serta packaging unit yang memastikan keberlangsungan produksi berjalan efisien dan sesuai standar mutu.

Tuntutan terhadap industri pupuk tidak hanya berfokus pada produktivitas, tetapi juga keberlanjutan lingkungan. PT PIM menyadari pentingnya aspek ini, sehingga sejak 2021 perusahaan mulai menerapkan Life Cycle Assessment (LCA) pada produk yang dihasilkannya. LCA merupakan suatu pendekatan ilmiah untuk mengevaluasi potensi dampak lingkungan dari suatu produk sepanjang siklus hidupnya, mulai dari pengadaan bahan baku, proses produksi, distribusi, penggunaan, hingga pengelolaan limbah pada tahap akhir. Dengan LCA, PT PIM memperoleh gambaran kuantitatif mengenai jejak lingkungan dari aktivitas produksinya, sehingga dapat merumuskan strategi mitigasi dampak secara lebih efektif.

Penerapan LCA di PT PIM tidak dilakukan secara parsial, tetapi menjadi bagian integral dari program peningkatan efisiensi sumber daya perusahaan. Kajian ini mencakup berbagai aspek penting, seperti efisiensi energi, penurunan emisi gas rumah kaca, pengelolaan limbah B3 dan pengelolaan sampah, penghematan penggunaan air, serta penurunan beban pencemar lingkungan. Dengan demikian, LCA berfungsi sebagai instrumen strategis untuk mendukung target keberlanjutan perusahaan sekaligus memenuhi ekspektasi regulasi nasional maupun standar internasional terkait industri hijau (green industry). Pada tahun 2025, PT PIM memperkuat komitmen tersebut dengan menyusun laporan LCA berdasarkan standar internasional. Kajian dilaksanakan dengan mengacu pada Product Category Rules (PCR) Mineral or Chemical Fertilizer dari EPD International, serta berpedoman pada standar SNI ISO 14040:2016 tentang prinsip dan kerangka kerja LCA, dan SNI ISO 14044:2016 mengenai persyaratan serta panduan pelaksanaan LCA. Laporan ini disusun secara sistematis, meliputi tahap perumusan tujuan dan lingkup, metodologi, inventori daur hidup, penilaian dampak, interpretasi hasil, hingga penyusunan kesimpulan dan rekomendasi perbaikan.

Sebagai upaya untuk menjamin kredibilitas dan transparansi, laporan LCA PT PIM juga melalui proses tinjauan kritis (critical review) oleh seorang pakar independen di bidang LCA. Hal ini menjadi langkah penting untuk memastikan bahwa metodologi yang digunakan telah sesuai standar, sekaligus memperkuat kepercayaan pemangku kepentingan terhadap komitmen PT PIM dalam menerapkan prinsip keberlanjutan. Sebagai bentuk pengakuan atas upaya nyata tersebut, pada tahun 2024 PT PIM berhasil meraih PROPER Emas, yaitu penghargaan tertinggi dalam Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan (PROPER) yang diselenggarakan oleh Kementerian Lingkungan Hidup (KLH). PROPER Emas hanya diberikan kepada perusahaan yang tidak sekadar patuh pada regulasi

lingkungan, tetapi juga menunjukkan kinerja luar biasa dalam inovasi lingkungan, pemberdayaan masyarakat, serta praktik bisnis berkelanjutan. Capaian ini menegaskan bahwa PT PIM tidak hanya berorientasi pada keuntungan ekonomi, melainkan juga mampu menyeimbangkan aspek sosial dan lingkungan secara konsisten. Dengan demikian, keberhasilan PT PIM dalam menerapkan LCA, efisiensi sumber daya, serta raihan PROPER Emas 2024 merupakan bukti komitmen perusahaan untuk menjadi pionir industri pupuk yang berdaya saing tinggi sekaligus berwawasan lingkungan.

BAB 2. TUJUAN DAN LINGKUP

2.1. Tujuan Kajian

Penyusunan kajian LCA ini bertujuan untuk memberikan informasi nilai beban dan dampak lingkungan dari produksi produk pupuk Urea dan Amonia di PT Pupuk Iskandar Muda (PIM) selama siklus hidupnya. Melalui kajian ini, diharapkan dapat diidentifikasi kontribusi setiap tahapan proses, mulai dari penyediaan bahan baku, proses produksi di pabrik, hingga penggunaan produk ke pengguna akhir, terhadap berbagai kategori dampak lingkungan. Informasi yang dihasilkan tidak hanya berfungsi sebagai bentuk evaluasi kinerja lingkungan perusahaan, tetapi juga sebagai dasar ilmiah dalam merumuskan strategi peningkatan efisiensi, pengurangan emisi, serta pengelolaan sumber daya yang lebih berkelanjutan di masa mendatang melalui program lingkungan perusahaan.

2.1.1. Tujuan penerapan

Secara lebih khusus tujuan penerapan kajian LCA ini adalah:

1. Analisis nilai potensi dampak lingkungan: Mengevaluasi besaran potensi dampak lingkungan dari setiap tahapan siklus hidup Urea dan Amonia PT PIM untuk prioritas pengelolaan yang lebih tepat.
2. Identifikasi hotspot: Menentukan area atau tahapan siklus hidup pupuk Urea dan Amonia PT PIM yang paling berkontribusi terhadap beban lingkungan, sebagai dasar perbaikan kinerja lingkungan.
3. Analisis tahapan siklus hidup: Mengidentifikasi fase daur hidup produksi Urea dan Amonia yang menimbulkan dampak lingkungan paling signifikan, mulai dari bahan baku, produksi, hingga distribusi produk.
4. Analisis isu penting: Mengidentifikasi isu lingkungan yang memiliki signifikansi tinggi bagi perusahaan maupun pemangku kepentingan selama siklus hidup Urea dan Amonia PT PIM.
5. Integrasi program penurunan dampak: Menyusun dan mengintegrasikan langkah-langkah atau program lingkungan di PT PIM untuk menurunkan potensi dampak lingkungan secara sistematis.
6. Strategi lingkungan dan EPD: Menyusun strategi lingkungan di PT PIM untuk mendukung pengembangan dan deklarasi produk ramah lingkungan melalui Environmental Product Declaration (EPD).

2.1.2. Pihak yang dituju

Kajian LCA PT PIM ditujukan kepada beberapa pihak, yaitu:

1. Internal perusahaan PT PIM: Sebagai dasar pengambilan keputusan strategis untuk perbaikan kinerja lingkungan dan efisiensi operasional.
2. Pemangku kepentingan terkait, termasuk PT Pupuk Indonesia (Persero): Untuk menyediakan informasi yang transparan mengenai dampak lingkungan produk dan mendukung perencanaan kebijakan perusahaan induk.
3. Pemerintah Republik Indonesia, khususnya Kementerian Lingkungan Hidup (KLH):Sebagai sumber informasi yang akurat dalam mendukung regulasi, evaluasi kinerja lingkungan, serta program keberlanjutan nasional.

2.1.3. Pernyataan komparatif yang ditujukan untuk disampaikan ke masyarakat

Kajian LCA yang dilakukan PT PIM tahun 2025 tidak ditujukan sebagai dasar komparasi bagi masyarakat umum untuk produk yang sepadan.

2.2. Lingkup LCA

Lingkup kajian LCA ini adalah Cradle to Grave yang meliputi Ekstraksi bahan baku dari alam (Upstream), produksi (Core), serta distribusi dan penggunaan produk (Downstream). Sistem produk yang menjadi fokus kajian meliputi beberapa tahapan, yaitu:

1. **Ekstraksi** bahan baku, energi, dan sumber daya yang diperlukan untuk produksi;
2. **Proses produksi** Amonia dan pupuk di fasilitas PT PIM;
3. **Distribusi produk** melalui transportasi darat dan pengapalan hingga sampai ke konsumen;
4. **Penggunaan produk** pupuk Urea dan Amonia oleh konsumen akhir.

Fungsi utama dari sistem produk ini adalah memproduksi pupuk Urea dan Amonia yang memenuhi standar kualitas Standar Nasional Indonesia (SNI), sehingga dapat memenuhi kebutuhan konsumen secara andal. Dalam kajian ini, fungsi produk dibedakan menjadi dua:

1. Pupuk Urea, yang ditujukan untuk memenuhi kebutuhan konsumen dalam mendukung penyiapan lahan pertanian;
2. Amonia, yang digunakan sebagai bahan baku dalam produksi listrik (Ammonia-Based Electricity).

Produk pupuk Urea dan Amonia yang dihasilkan PT PIM sesuai dengan SNI tercantum dalam **Tabel 1**.

Tabel 1. Jenis produk dan standar yang menjadi ruang lingkup dari kajian LCA

Jenis produk	Standar
Pupuk Urea	SNI 2801:2010
Amonia	SNI 060045:2006

2.2.1. Unit fungsi atau unit deklarasi dan aliran acuan

2.2.1.1. Unit Fungsi atau Unit Deklarasi

Kajian LCA ini menggunakan unit fungsi berupa 1 ton pupuk Urea dan Amonia, di mana reference flow mengacu pada output produksi PT PIM yang dialokasikan untuk memenuhi kebutuhan konsumen selama periode 2024.

2.2.1.2. Aliran acuan

Aliran acuan pada kajian ini ditetapkan sebesar 1 ton produk urea dan Amonia, yang merepresentasikan intensitas produksi tahunan PT PIM pada tahun 2024 dengan total output 464.399,01 ton.

2.2.2. Batasan Sistem Kajian

Batasan sistem dalam kajian LCA ini ditetapkan sebagai Cradle-to-Grave, yang mencakup: (i) tahap ekstraksi bahan baku, energi, dan sumber daya (Cradle); (ii) proses produksi pupuk Urea dan Amonia (Core), yang dijelaskan secara rinci pada **Bab 4**; (iii)

distribusi produk pupuk Urea yang telah dikemas ke distributor utama; serta (iv) tahap penggunaan pupuk Urea dan Amonia oleh konsumen (Grave). Kajian LCA di PT PIM bersifat attributional, dengan pendekatan pengukuran dampak lingkungan melalui pemetaan emisi dan aliran sumber daya sepanjang siklus hidup produk. Adapun background system tidak dimasukkan dalam ruang lingkup analisis dampak lingkungan.

2.2.3. Alasan pemilihan batasan sistem

Penetapan batasan sistem Cradle-to-Grave dalam kajian LCA PT PIM dilakukan untuk memastikan kesesuaian dengan standar internasional, regulasi nasional, serta pengalaman kajian sebelumnya. Pertimbangan teknis yang mendasarinya meliputi:

1. **Product Category Rules (PCR)** Fertilizer 4.0.0 (EPD International, 25 April 2025), yang mengatur kategori produk pupuk Urea dengan kode UN CPC 3461–3465, digunakan sebagai acuan metodologis agar sistem yang dianalisis selaras dengan standar environmental product declaration.
2. **Permen No.7 Tahun 2025 Kementerian Lingkungan Hidup (KLH)**, yang mewajibkan penerapan kajian LCA dengan ruang lingkup Cradle-to-Grave untuk menilai kinerja lingkungan industri pupuk secara komprehensif.
3. **Pengembangan kajian internal PT PIM tahun 2021–2023**, yang menjadi baseline metodologi serta memastikan konsistensi antarperiode kajian LCA di perusahaan.

Dengan dasar teknis tersebut, pendekatan Cradle-to-Grave dipandang paling tepat untuk memetakan aliran material, energi, dan emisi pada seluruh tahapan siklus hidup pupuk Urea dan Amonia yang diproduksi PT PIM.

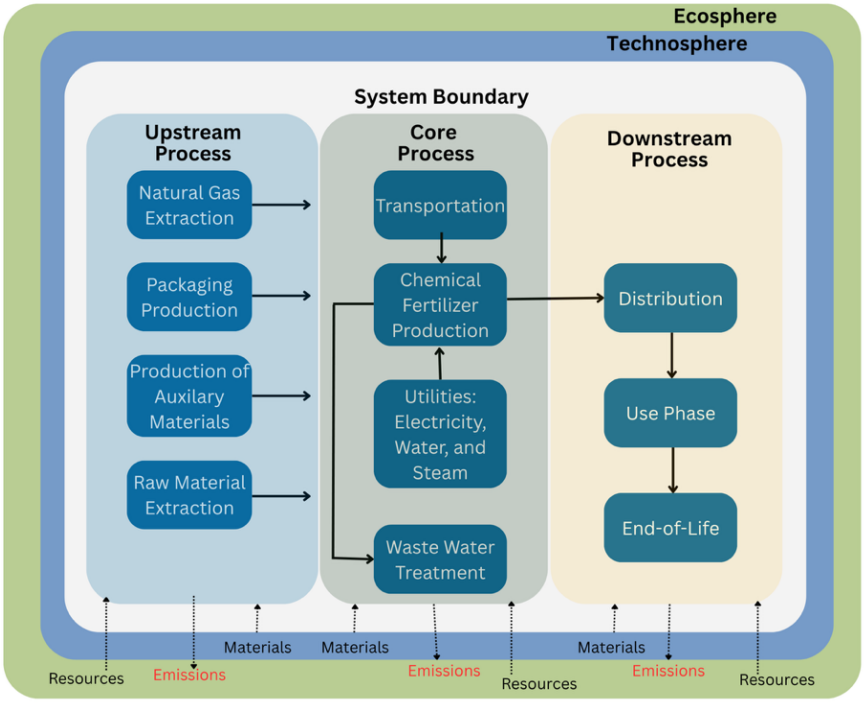
2.2.4. Gambar diagram sistem produk

Sesuai dengan standar ISO 14040/14044, data yang digunakan dalam kajian LCA PT PIM dikategorikan menjadi **primary data** dan **secondary data**. **Primary data** mencakup informasi kuantitatif yang dikumpulkan secara langsung dari aktivitas operasional yang berada di bawah kendali PT PIM, seperti hasil pemantauan emisi udara, debit air limbah, serta parameter kualitas air hasil olahan WWTP. **Secondary data** digunakan untuk melengkapi data yang tidak tersedia secara langsung, dan bersumber dari pihak eksternal atau literatur terkait, misalnya data konsumsi bahan bakar pada proses distribusi produk. Rincian klasifikasi sumber data disajikan pada **Tabel 2**. Cakupan sistem produk pada kajian ini sesuai pada **Gambar 1** mulai Cradle sampai Grave.

Tabel 2. Klasifikasi sumber data produksi pupuk Urea dan Amonia di PT PIM

Sumber Data	Deskripsi	Contoh Parameter
Langsung (Primary Data)	Aktivitas yang dimiliki atau dikendalikan langsung oleh PT PIM	Emisi udara (NOx, SO_2, total partikulat, NH_3); debit air limbah; kualitas air olahan WWTP (BOD, COD, minyak & lemak, pH dan lain-lain)

Tidak Langsung (Secondary Data)	Aktivitas yang dikendalikan pihak eksternal (organisasi lain atau konsumen)	Penggunaan bahan bakar pada proses distribusi produk



Gambar 1. Sistem Produk Kajian LCA PT PIM 2025

2.2.5. Kriteria cut-off

Kajian LCA ini menggunakan kriteria cut-off yang merujuk pada ketentuan dalam PCR tahun 2020. Kriteria tersebut menetapkan bahwa kontribusi setiap unit proses modul maupun inventori sumber daya, energi, emisi, dan aspek lingkungan lainnya yang nilainya kurang dari 1% dapat dikecualikan dari perhitungan. Dengan demikian, hanya aliran dasar yang signifikan, yaitu aliran masuk dan keluar dari sistem produk yang secara kumulatif mencakup sedikitnya 99% dari total dampak lingkungan yang akan dimasukkan dalam analisis.

Penerapan kriteria ini bertujuan untuk memastikan efisiensi dalam pemodelan tanpa mengurangi keakuratan hasil, dengan cara menyaring data yang kontribusinya sangat kecil atau tidak relevan terhadap hasil akhir. Proses atau aktivitas yang secara eksplisit didefinisikan berada di luar batas sistem tidak diperhitungkan, meskipun secara teknis berhubungan dengan siklus hidup produk. Dengan begitu, kriteria cut-off berfungsi sebagai pedoman dalam menentukan relevansi data yang digunakan agar fokus analisis tetap terjaga pada komponen dengan dampak lingkungan paling signifikan.

2.2.6. Prosedur alokasi

PT PIM memproduksi dua jenis produk utama, yaitu pupuk Urea dan Amonia, dalam satu sistem produksi yang terintegrasi. Mengacu pada PCR Fertilizer 4.0.0 tahun 2025 serta dengan mempertimbangkan prosedur alokasi, proses produksi kedua produk tersebut

tidak dapat dipisahkan secara individual. Oleh karena itu, sesuai dengan ketentuan dalam SNI ISO 14044:2016, kajian LCA ini menerapkan pendekatan multi-output process. Alokasi dilakukan menggunakan dasar kuantitas fisik dengan rasio pembagian berdasarkan massa, sebagaimana ditampilkan pada **Tabel 3** berikut.

Tabel 3. Alokasi produksi pupuk Urea dan Amonia di PT PIM Tahun 2025

Produk	Total massa (ton)	Rasio Alokasi (%)
Pupuk Urea	436.560,56	94,00%
Amonia	28.531,59	6,00%
Total	464.399,01	**100%**

2.2.7. Pengumpulan data

a. Sumber data yang digunakan

Secara umum, sumber data yang digunakan dalam kajian LCA PT PIM terbagi menjadi dua kategori, yaitu data spesifik (primer) dan data generik (sekunder). Data spesifik diperoleh langsung dari hasil pengukuran internal maupun perhitungan yang dilakukan di dalam perusahaan. Sementara itu, data generik diperoleh dari basis data (database) serta literatur ilmiah, seperti jurnal terkait. Rincian mengenai sumber data yang digunakan dalam kajian ini dapat dilihat pada **Tabel 4** .

Tabel 4. Pengumpulan data kajian LCA produksi pupuk Urea dan Amonia PT. PIM Tahun 2025

Data Primer	1. Hasil pengukuran langsung yang berkaitan dengan input dan output, meliputi penggunaan bahan baku utama, bahan baku pendukung, timbulan limbah, serta emisi.
	2. Perhitungan emisi yang mengacu pada Petunjuk Teknis Perhitungan dan Pelaporan Emisi CO_2 Industri Pupuk Urea dan Amonia yang diterbitkan IPCC pada tahun 2006 (IPCC, 2006a)
	3. Estimasi pelepasan emisi-emisi dari proses penggunaan Urea pada lahan pertanian yang ditentukan berdasarkan pedoman IPCC Tahun 2006 (IPCC, 2006b).
	4. Analisis sampel untuk uji laboratorium kualitas air limbah dan emisi
	5. Perhitungan jarak distribusi produk pupuk Urea dan Amonia yang dilakukan menggunakan metode digitasi melalui Google Earth.
Data Sekunder	1. Database ECOINVENT 3.8
	2. Data faktor emisi GRK ketenagalistrikan tahun 2019 (ESDM, 2019)
	3. Data inventory dari penggunaan produk Amonia sebagai bahan bakar alternatif (Boero et al., 2021)

b. Agregasi Data

Agregasi data dilakukan untuk menyatukan informasi dari berbagai sumber dan unit proses sehingga menghasilkan inventori yang lebih terstruktur. Proses agregasi meliputi:

1. Pengumpulan data aktivitas dari setiap unit proses produksi yang relevan dengan sistem produk.
2. Penggabungan data emisi hasil pembakaran dari Package Boiler I dan II, Waste Heat Boiler (WHB), serta Gas Turbine Generator (GTG) I dan II sehingga diperoleh total emisi terintegrasi.
3. Penyatuan data emisi dari penggunaan bahan bakar pada kendaraan operasional internal, khususnya Forklift dan Fire Truck, untuk dimasukkan ke dalam inventori sistem.

c. Data yang Tidak Dimasukkan

Terdapat beberapa kategori data yang dikecualikan dari perhitungan inventori karena kontribusinya dianggap tidak signifikan secara kuantitatif (berada di bawah kriteria cut-off), yaitu:

1. Konsumsi oli pelumas (lubricating oil) untuk kegiatan perawatan rutin peralatan, yang volumenya sangat kecil terhadap total aliran material.
2. Kehilangan volume air akibat proses evaporasi pada sistem pendinginan alat, yang secara kontribusi tidak berpengaruh signifikan pada hasil akhir.
3. Pemakaian bahan kimia tambahan dalam jumlah sangat kecil, dengan nilai jauh di bawah batas cut-off yang ditetapkan dalam kajian LCA.

2.2.8. Asumsi

Asumsi utama yang diterapkan dalam pemodelan inventori pada kajian LCA ini adalah sebagai berikut:

1. Kendaraan pengangkut produk pupuk dan Amonia menuju distributor utama diasumsikan berupa general cargo ship dengan kapasitas angkut sebesar 43.000 ton.
2. Kebutuhan energi listrik untuk unit raw water intake dikategorikan sesuai dengan jaringan listrik (grid) Sumatera.
3. Distribusi produk pupuk Urea diasumsikan menuju wilayah Aceh, Sumatera Utara, Sumatera Barat, Riau, dan Kepulauan Riau, sedangkan distribusi Amonia ditujukan ke Medan dan Singapura. Pemilihan titik distribusi ini didasarkan pada volume distribusi produk ke masing-masing wilayah tahun 2024.
4. Pada tahap Grave, pupuk Urea diasumsikan dimanfaatkan konsumen sebagai pupuk untuk lahan dalam satuan Hektare (Ha), sementara Amonia digunakan sebagai bahan baku bagi pembangkitan energi listrik.

2.2.9. Keterbatasan kajian LCA yang dilakukan

Kajian LCA ini memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam interpretasi hasil, yaitu:

1. **Proses pendukung kemasan tidak dianalisis secara rinci.** Penggunaan tinta cetak, bahan perekat, serta proses produksi kantong kemasan pupuk tidak dimasukkan dalam ruang lingkup perhitungan. Hal ini dikarenakan kontribusinya

diperkirakan sangat kecil terhadap total dampak lingkungan sistem produk, sehingga termasuk dalam kategori di bawah nilai cut-off.

2. **Kehilangan air akibat penguapan alami tidak dihitung.** Pada tahap operasional, terdapat potensi kehilangan air melalui proses evaporasi dari sistem pendinginan maupun penyimpanan. Namun, aspek ini tidak diperhitungkan dalam inventori karena keterbatasan data kuantitatif dan dampaknya dianggap tidak signifikan terhadap keseluruhan hasil kajian.

Keterbatasan ini dapat memunculkan potensi underestimasi pada beberapa kategori dampak, khususnya yang berkaitan dengan penggunaan material tambahan (seperti tinta atau perekat) maupun pemakaian sumber daya air. Namun, secara keseluruhan, pengecualian ini tidak memengaruhi keakuratan hasil utama kajian, karena kontribusinya relatif kecil terhadap total siklus hidup produk pupuk Urea dan Amonia di PT PIM.

2.2.10. Persyaratan kualitas data

Persyaratan kualitas data pada kajian LCA ini sesuai pada **Tabel 5** berikut.

Tabel 5. Persyaratan kualitas data kajian LCA Produksi Pupuk Urea dan Amonia PT Pupuk Iskandar Muda Tahun 2025

Indikator (ISO 14040/14044)	Kondisi Kajian LCA PT PIM
Cakupan Waktu (Temporal Coverage)	Periode analisis ditetapkan dari Januari–Desember 2024. Seluruh data primer dan sekunder dikumpulkan untuk periode tersebut sehingga representatif terhadap kondisi aktual pabrik.
Cakupan Geografis(Geographical Coverage)	Lokasi kajian mencakup kawasan PT Pupuk Iskandar Muda di Kelurahan Krueng Geukeuh, Kecamatan Dewantara, Kabupaten Aceh Utara, Provinsi Aceh. Data diperoleh langsung dari unit operasi di lokasi tersebut.
Cakupan Teknologi (Technological Coverage)	Sistem produksi dianalisis berdasarkan teknologi spesifik yang digunakan: 1. **Unit Pabrik Urea Prill (Urea 1)** – Tahun 1982, kapasitas 570.000 ton/tahun, teknologi Mitsui Toatsu – Total Recycle C-Improved (Jepang). 2. **Unit Pabrik Amonia (Amonia 1)** – Tahun 1982, kapasitas 386.000 ton/tahun, teknologi Kellog (Amerika). 3. **Unit Pabrik Urea Granule (Urea 2)** – Tahun 1999, kapasitas 570.000 ton/tahun, teknologi Toyo-Acces (Jepang). 4. **Unit Pabrik Amonia (Amonia 2)** – Tahun 1999, kapasitas 396.000 ton/tahun, teknologi Kellog-Brown Root (Amerika).
Presisi Data (Precision)	Data spesifik bersumber dari pengukuran aktual di pabrik (laporan tahunan 2025) dengan instrumen terkalibrasi (flow meter, kWh meter, laboratorium uji).
Kelengkapan Data (Completeness)	Semua data yang relevan untuk memenuhi cakupan sistem telah dimasukkan, meliputi input energi, bahan baku, emisi

Indikator (ISO 14040/14044)	Kondisi Kajian LCA PT PIM
	udara, limbah cair, dan padat. Data minor dengan kontribusi <1% dieliminasi sesuai kriteria cut-off.
Keterwakilan Data (Representativeness)	Data mewakili periode waktu (2024), lokasi (pabrik PT PIM), dan teknologi (proses aktual) sesuai dengan cakupan studi.
Konsistensi (Consistency)	Metodologi LCA (ISO 14040 & 14044) diterapkan secara konsisten pada semua tahapan: definisi tujuan dan ruang lingkup, analisis inventori, penilaian dampak, dan interpretasi.
Reproducibility (Reproducibility/Transparency)	Data yang disajikan memungkinkan reproduksi model oleh pihak ketiga, dengan dokumentasi sumber data, metode perhitungan, dan asumsi kajian.
Sumber Data (Data Sources)	1. **Primer (spesifik):** o Flow meter: tonase produk Urea & Amonia, konsumsi gas alam, konsumsi air baku. o kWh meter: konsumsi listrik. o Balai Riset dan Standardisasi Industri: pengukuran emisi SO_2, NOx, partikulat. o Spreadsheet harian: pencatatan konsumsi air baku. o Data kebutuhan kantong pupuk berdasarkan tonase produksi (50 kg per kantong). o Laboratorium pusat (mingguan) & shift (8 jam): uji mutu pupuk Urea & kualitas air limbah. 2. **Kalkulasi/estimasi:** o Faktor kandungan karbon (carbon content factor) untuk perhitungan emisi CO_2. o Estimasi emisi-emisi dari penggunaan Urea pada lahan o Estimasi jarak distribusi pupuk Urea & Amonia (digitasi Google Earth). 3. **Sekunder:** o Database Ecoinvent v3.8. o Faktor emisi listrik PLN (2019). o Literatur: penggunaan emoniak sebagai bahan untuk pembangkit listrik (Boero et al., 2021)
Ketidakpastian (Uncertainty)	Ketidakpastian dijelaskan melalui asumsi (misalnya distribusi produk dengan general cargo ship 43.000 ton, titik distribusi utama Sumatera Utara, Sumatera Barat, Kepulauan Riau, hingga Singapura) dan limitasi (misalnya tidak menghitung tinta, perekat, penguapan air). ISO 14044 mendorong dokumentasi transparan agar hasil tetap dapat diinterpretasikan dengan benar.

2.2.11. Perlakuan terhadap data yang hilang

Pada pemodelan inventori LCA ini, terdapat aliran data yang tidak tersedia secara kuantitatif dan kemudian ditetapkan bernilai **0 (nol)** dengan pertimbangan teknis sebagai berikut:

1. **Emisi debu fugitive dari transportasi internal.**
   Emisi partikulat yang timbul dari pergerakan kendaraan operasional di dalam area pabrik (misalnya forklift dan fire truck) tidak tercatat dalam data pengukuran.

Mengingat intensitas lalu lintas internal relatif rendah, kontribusinya diasumsikan tidak signifikan terhadap total emisi, sehingga dimodelkan dengan nilai nol.

2. **Air yang hilang akibat evaporasi selama proses.**
   Kehilangan air karena penguapan alami pada sistem pendinginan maupun operasi produksi tidak tercatat dalam inventori. Dengan keterbatasan data kuantitatif serta dugaan kontribusinya yang sangat kecil terhadap keseimbangan massa air, aliran ini diasumsikan nol dalam perhitungan.

Asumsi ini sesuai dengan pendekatan cut-off criteria dalam ISO 14044, di mana aliran dengan dampak yang sangat kecil atau tidak tersedia datanya dapat dikeluarkan tanpa memengaruhi keandalan hasil kajian secara keseluruhan.

2.2.12. Pernyataan cakupan interpretasi dan format laporan

Cakupan interpretasi dalam kajian LCA ini mencakup empat aspek utama: identifikasi isu penting, penarikan kesimpulan, pengungkapan keterbatasan, dan penyusunan rekomendasi. Identifikasi isu penting dilakukan dengan menilai kontribusi sistem produk terhadap kategori dampak lingkungan. Analisis dibedakan menjadi dua kelompok kategori dampak:

1. **Kategori dampak wajib** (mandatory impact categories), yang terdiri atas:
   - Global Warming Potential (GWP)
   - Potensi penipisan lapisan ozon
   - Potensi hujan asam (Acidification Potential)
   - Potensi eutrofikasi (Eutrophication Potential)
   - Penggunaan energi (Cumulative Energy Demand)
2. **Kategori dampak tambahan** (additional impact categories), yang meliputi:
   - Photochemical oxidant formation
   - Penurunan sumber daya abiotik (fossil)
   - Penurunan sumber daya abiotik (fossil dan non-fossil)
   - Potensi karsinogenik
   - Potensi toksisitas (toxicity)
   - Jejak air (Water Footprint)
   - Penurunan biotik, termasuk Terrestrial Ecotoxicity, Fresh Water Ecotoxicity, dan Marine Ecotoxicity
   - Perubahan penggunaan lahan (Land Use Change)

Evaluasi terhadap semua kategori ini memungkinkan pemahaman menyeluruh tentang dampak lingkungan dari produksi pupuk Urea dan Amonia di PT PIM, sekaligus mendukung pengambilan keputusan berbasis hasil kajian LCA.

2.2.13. Tinjauan Kritis

Pada kajian LCA ini dilakukan tinjauan kritis sesuai dengan pedoman ISO/TS 14071 dan SNI ISO 14044:2016. Tinjauan kritis dilaksanakan melalui mekanisme panel pada tahap akhir kajian untuk memastikan kualitas, konsistensi, dan transparansi hasil. Panel tinjauan kritis terdiri dari pakar yang memiliki kompetensi di bidang LCA, baik dari kalangan praktisi maupun akademisi. Peninjau kritis untuk kajian ini adalah **Dr. rer. nat. Ir. Rio Aryapratama, S.T., M.Eng, M.Sc dan Ir. Muhammad Mufti Azis, S.T., M.Sc., Ph.D.** Keduanya merupakan dosen dan praktisi LCA di Departemen Teknik Kimia, Fakultas

Teknik, Universitas Gadjah Mada dengan profil masing-masing peninjau terlampir pada Link berikut: https://bit.ly/peninjaukritisPIM2025. Panel ini memberikan validasi atas metodologi, asumsi, data, serta interpretasi hasil kajian untuk memastikan kesesuaian dengan standar internasional.

BAB 3. METODE PELAKSANAAN LCA

3.1. Standar atau Referensi yang Dirujuk

Kajian LCA ini merujuk pada beberapa dokumen acuan, yaitu:

1. SNI ISO 14040:2016 mengenai prinsip dan kerangka kerja LCA, serta SNI ISO 14044:2016 yang membahas persyaratan dan panduan pelaksanaan LCA.
2. Product Category Rules (PCR) Fertilisers 4.0.0 Tahun 2025 untuk produk dengan kategori UN CPC 3461, 3462, 3463, 3464, dan 3465, yang diterbitkan oleh EPD International pada25 April 2025 (PCR, 2025).
3. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No 7 Tahun 2025 terkait Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup.
4. Pedoman Penyusunan Laporan Penilaian Daur Hidup (LCA) Tahun 2021 Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK).

3.2. Metode Perhitungan yang Digunakan

Perhitungan Kajian LCA ini menggunakan perangkat lunak atau software OpenLCA 2.5 dan database Ecoinvent v3.8.

3.3. Pemilihan Metode Penilaian Dampak

Kategori dampak, indikator kategori, serta metode yang digunakan dalam kajian LCA ini ditampilkan pada **Tabel 6** Pemilihan metode penilaian dampak dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa aspek utama, antara lain:

1. Penilaian dampak lingkungan dalam kajian ini menggunakan metode Life Cycle Impact Assessment (LCIA) yang berlandaskan pada kerangka teori yang telah tervalidasi, diakui secara internasional, serta memiliki legitimasi akademik yang dapat dipertanggungjawabkan.
2. Metodologi penilaian dampak bersifat open-access dan transparan, sehingga mendukung replikasi, verifikasi, serta penerapan berkelanjutan dalam berbagai konteks penelitian maupun kebijakan.
3. Terdapat koherensi dan konsistensi antara kategori dampak yang disediakan dalam dataset metode dengan kategori dampak yang dipersyaratkan oleh Peraturan Menteri Lingkungan Hidup (Permen LH) Nomor 7 Tahun 2025, sehingga memastikan kesesuaian regulatif serta relevansi analisis.

Tabel 6. Kategori dampak, indikator kategori dan metode kategori dampak yang digunakan dalam kajian

No.	Kategori dampak	Indikator kategori	Metode
1	Global Warming Potential	kg CO_2 eq	CML-IA baseline
2	Potensi Penipisan Ozon	kg CFC-11 eq	CML-IA baseline
3	Potensi Hujan Asam	kg SO_2 eq	CML-IA baseline
4	Potensi Eutrofikasi	kg PO_4- eq	CML-IA baseline
5	Penggunaan Energi (Cumulative Energy Demand)	MJ	Cumulative Energy Demand v1.11
6	Photochemical Oxidant	kg C_2H4 eq	CML-IA baseline
7	Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil dan non fossil)	MJ	CML-IA baseline
8	Karsinogenik	CTUh	ILCD 2011 Midpoint+
9	Toxicity	kg 1,4-DB eq	CML-IA baseline
10	Water Footprint	m^3 water eq.	ILCD 2011 Midpoint+
11	Land Use Change	Kg SOC/produksi	ILCD 2011 Midpoint+
12	Eutrofikasi air tawar	kg P eq	ILCD 2011 Midpoint+
13	Eutrofikasi air laut	kg N eq	ILCD 2011 Midpoint+
14	Asidifikasi air tawar	kg SO_2 eq	CML-IA baseline
15	Ekotoksisitas air tawar	kg 1,4-DB eq	CML-IA baseline
16	Ekotoksisitas air laut	kg 1,4-DB eq	CML-IA baseline
17	Toksisitas (karsinogenik) terhadap manusia karena polusi air	CTUh	ILCD 2011 Midpoint+
18	Toksisitas (non-karsinogenik) terhadap manusia karena polusi air	kg 1,4-DB eq	ILCD 2011 Midpoint+

BAB 4. INVENTORI DAUR HIDUP

4.1 Deskripsi Kualitatif Unit Proses

a. Deskripsi proses yang dicakup dalam kajian

Skema proses produksi pupuk Urea dan Amonia di PT. Pupuk Iskandar Muda terdiri atas 13 subsistem sebagaimana tertera pada **Gambar 2.** Deskripsi dari masing-masing subsistem produksi pupuk Urea dan Amonia di PT PIM sesuai pada **Tabel 7.**

Tabel 7. Deskripsi unit proses produksi pupuk Urea dan Amonia di PT PIM

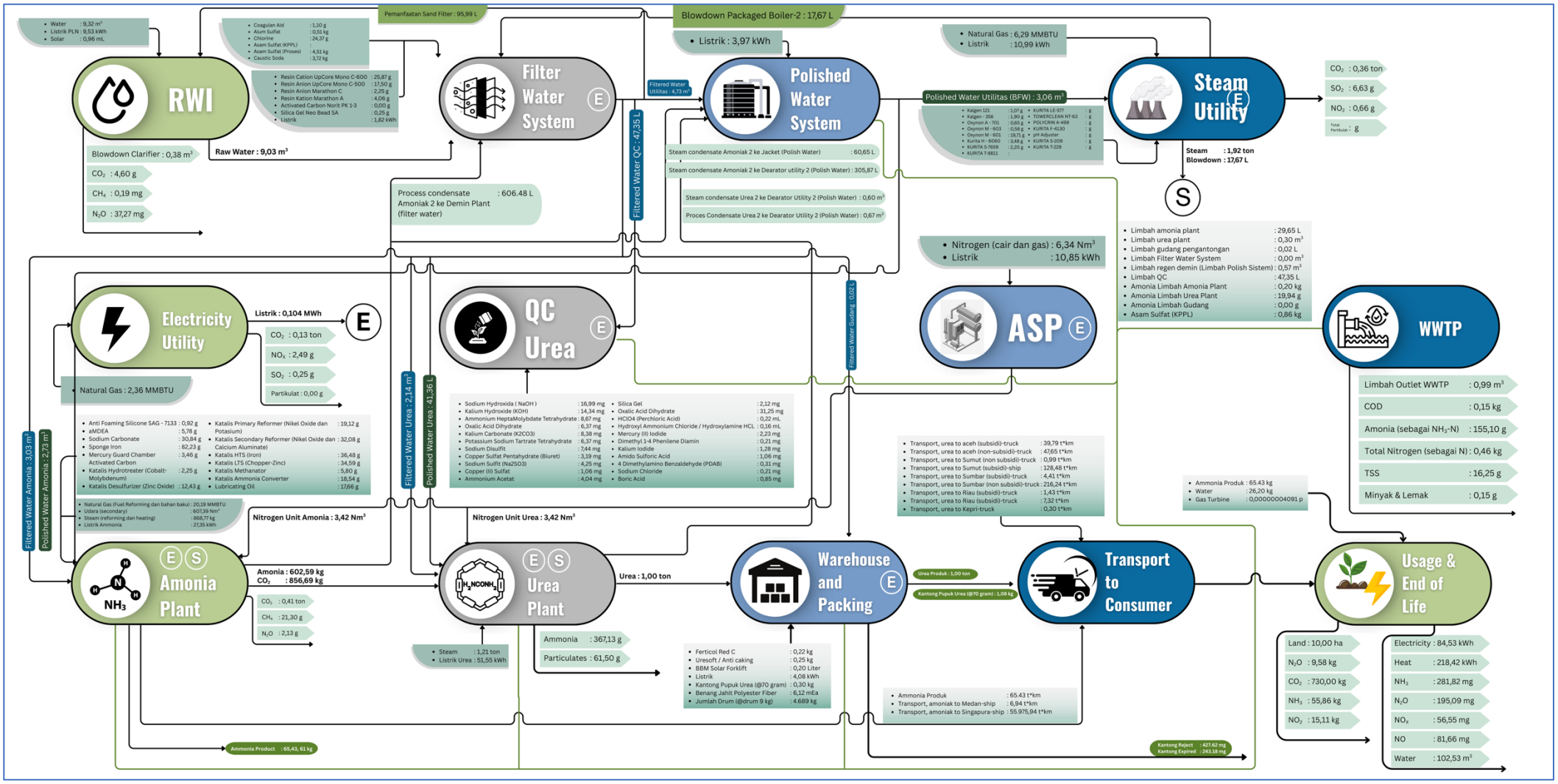
No.	Proses yang ditinjau	Deskripsi
1.	**Raw Water Intake (RWI)**	Unit yang berfungsi untuk mengambil air baku yang bersumber dari sungai Peusangan yang berjarak sekitar 25 km dari lokasi pabrik. Proses pengambilan air baku menggunakan pompa yang digerakkan dengan energi listrik dari PLN.
2	**Electricity Utility**	Unit yang berfungsi untuk memproduksi listrik menggunakan main generator berkapasitas 15 MW yang digerakkan oleh turbin gas
3	**Filtered Water System**	Unit yang berfungsi untuk menjernihkan air baku dari RWI untuk kebutuhan domestik dan proses pabrik. Air hasil penyaringan disimpan dalam filter water tank serta portable water tank yang terlebih dahulu diinjeksi chlorine.
4	**Polished Water System**	Unit yang berfungsi untuk memperbaiki kualitas air, sehingga menjadi sesuai dengan standar
5	**Steam Utility**	Unit yang berfungsi untuk memproduksi uap bertekanan yang kemudian dimanfaatkan proses pemanasan, heat exchanger, penggerak turbin, dan sebagai proses reaksi kimia.
6	**Air Separator Plant (ASP)**	Unit yang berfungsi memproduksi nitrogen dan oksigen untuk kebutuhan produksi pupuk.
7	**Amonia Plant**	Unit yang berfungsi untuk memproduksi Amonia langsung dan menyuplai Urea plant. Gas alam bebas impurities diubah menjadi gas H_2 dan N_2 dan dikonversikan menjadi Amonia setelah beberapa reaksi dan pemurnian. Sedangkan CO_2 sebagai produk samping yang dikirimkan ke Urea Plant.
8	**Urea Plant**	Unit yang berfungsi untuk memproduksi Urea, prosesnya meliputi: reaksi Amonia dengan CO_2, larutan Urea murni dikristalkan secara vakum, kemudian dilelehkan kembali dalam Melter dengan menggunakan Steam sebagai pemanas. Lelehan Urea diteteskan yang kemudian akan memadat setelah didinginkan dengan udara dari atas Prilling Tower.
9	**Waste Water Treatment Plant (WWTP)**	Unit yang berfungsi untuk mengolah air limbah pabrik sehingga aman untuk dibuang ke lingkungan.

No.	Proses yang ditinjau	Deskripsi
10	**Quality Control**	Unit yang berfungsi untuk mengontrol filtered water sebelum digunakan pada unit yang lain.
11	**Bagging Unit**	Unit yang berfungsi untuk mengemas pupuk Urea dengan kantong ukuran 50 kg.
12	**Urea and Ammonia Transport**	Unit yang berfungsi untuk mengirimkan produk pupuk Urea ke beberapa Lokasi baik di dalam maupun luar negeri
13	**Usage and End of Life**	Subsistem penggunaan pupuk Urea untuk lahan dan Amonia untuk bahan bahan pembangkit listrik

b. Satuan yang digunakan dalam kajian

Aliran bahan, bahan baku, energi dan lainnya dinyatakan dalam satuan tertentu:

- Jumlah energi yang digunakan dinyatakan dalam satuan energi (MWh atau kWh).
- Jumlah produk dan bahan baku padat dinyatakan dalam satuan massa (kt, ton, kg, g, ea, dan mg).
- Jumlah produk dan bahan baku cair dinyatakan dalam satuan volume (m^3, liter).
- Jumlah bahan pendukung padat dinyatakan dalam satuan massa (kt, ton, kg, dan gram)
- Proses transportasi dinyatakan dalam satuan massa kali jarak (ton*km)
- Beban emisi gas yang dihasilkan dinyatakan dalam satuan ton atau kg.



Gambar 2. Neraca Massa Produksi Pupuk Urea dan Amonia PT PIM Tahun 2025

4.2 Prosedur Pengumpulan Data

a. Data Primer pada kajian ini mencakup:

- Informasi terkait **input bahan baku** serta **output produk utama dan samping**, yang diperoleh melalui pengukuran langsung maupun tidak langsung (sampel) di PT PIM selama periode **Januari–Desember 2024**.
- Estimasi **jarak tempuh distribusi pupuk Urea dan Amonia** melalui jalur laut, yang dihitung berdasarkan digitasi menggunakan **Google Earth** (lihat Subbab 4.4 Poin A).
- Data **emisi langsung CO_2** dari proses produksi pupuk Urea dan Amonia, diperoleh dari estimasi PT PIM (periode **Januari–Desember 2024**) dengan mengacu pada pedoman **IPCC 2006a** (lihat Subbab 4.4 Poin B).
- Data **emisi langsung CO_2** dari proses produksi tanaman jagung, yang dihitung menggunakan pedoman **IPCC 2006b** (lihat Subbab 4.4 Poin C).
- Data emis NH_3 dan partikulat, yang diperoleh dari hasil pengukuran oleh Balai Riset dan Standarisasi Industri setiap kuartal pada tahun 2024.
- Data terkait input dan output **direct emission pada** scope downstream untuk Urea usage dihitung berdasarkan IPCC 2006.

b. Data Sekunder dalam kajian ini mencakup:

- Informasi mengenai sifat dan karakteristik bahan baku, yang ditelusuri melalui database Ecoinvent v3.8.
- Data terkait indirect emission, yang bersumber dari database Ecoinvent v3.8.
- Data terkait input dan output **direct emission pada** scope downstream untuk Amonia usage dihitung berdasarkan hasil penelitian jurnal ilmiah.
- Data **faktor emisi listrik bawaan (inherent)** yang merujuk pada **faktor emisi Gas Rumah Kaca (GRK)** dalam sistem interkoneksi ketenagalistrikan berdasarkan laporan **Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Tahun 2019**.

4.3 Sumber Literatur

Dataset yang dianalisis menggunakan software OpenLCA versi 2.5 bersumber dari database Ecoinvent v3.8. Dataset tersebut dimanfaatkan untuk mengidentifikasi dan menghitung besaran dampak lingkungan yang bersifat inherent dari produk-produk yang terlibat dalam proses produksi pupuk Urea dan Amonia. Secara ringkas, total jumlah dataset yang digunakan disajikan pada **Tabel 8.**, sementara rincian penggunaan dataset secara lebih mendetail dapat dilihaat pada **Tabel 9 hingga Tabel 21.**

Tabel 8. Sumber Literatur

Sumber Data Sekunder	Jumlah Data
Database Ecoinvent v3.8	77
Database Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral	1
Jurnal dan Report	9

4.4 Prosedur Perhitungan Data

Prosedur perhitungan data pada kajian ini meliputi perhitungan jarak pengiriman produk pupuk dan ammonia, perhitungan emisi dari kegiatan operasional, dan perhitungan emisi penggunaan pupuk Urea.

a. Perhitungan jarak pengiriman pupuk Urea dan Amonia

Perhitungan jarak pengiriman pupuk Urea dari PT PIM ke Paya Pasir Medan dan pengiriman ammonia ke Pelabuhan Gresik ditentukan berdasarkan digitasi rute dari Google Earth sesuai pada Gambar 3. Data jarak untuk setiap jalur distribusi sesuai pada link berikut: https://bit.ly/jarakdistribusiPIM2024.



Gambar 3. Rute dan Jarak transportasi produk pupuk Urea dari PT PIM ke konsumen (Medan)

Contoh perhitungan untuk data inventori Urea, Transported (Tabel 21)
Jumlah pupuk Urea yang dikirim = 436.089,82 ton/tahun
Jarak Pengiriman (PT PIM ke Paya Pasir) = 309,42 km
Urea, transported Paya Pasir (41,52%) = Jumlah pupuk x Jarak kirim
= 56.024,975 t*km

b. Perhitungan estimasi emisi dari kegiatan operasional

Nilai emisi CO_2 yang ditimbulkan dari kegiatan operasional PT PIM terdiri atas emisi langsung dan emisi tidak langsung. Emisi langsung CO_2 diestimasi berdasarkan kaidah yang ditetapkan oleh IPCC tahun 2006 untuk Industri Pupuk Urea dan Amonia (**Persamaan 1**). Emisi CO_2 tidak langsung diestimasi dari penggunaan listrik dan bahan bakar berdasarkan nilai faktor emisinya (**Persamaan 2 dan 3**).

ECO_2 = $\mathrm{AP} \times \mathrm{FR} \times \mathrm{CCF} \times \mathrm{COF} \times \frac{44}{12} - \mathrm{RCO_2}$ **(Persamaan 1)**

ECO_2 = emissions of CO_2, kg
AP = ammonia production, tonnes
FR = fuel requirement per unit of output, GJ/tonne ammonia produced
CCF = Carbon content factor of the fuel, kg C/GJ

COF = Carbon oxidation factor of the fuel, fraction
RCO_2 = CO_2 recovered for downstream use (Urea production), kg

ECO_{2GHG} = Fuel Consumption x Emission Factor (Persamaan 2)
ECO_{2GHG}= Electricity Consumption x Emission Factor (Persamaan 3)

Contoh Perhitungan emisi CO2 produksi Amonia:
AP = 28.531,59 ton
FR = 1282,052 ton
CCF = 14,60 kg C/GJ
COF = 1
RCO_2 = 436.089,82 x 44/60 = 319.799,201 ton
ECO_2 = 28.531,59 x 1.282,052 x14,60 x 44/12 -319.799,201
= 1,96E09 ton

c. Perhitungan emisi akibat penggunaan pupuk

Nilai emisi yang ditimbulkan dari penggunaan pupuk (bagian Grave) diasumsikan untuk pemupukan lahan 1 hektare membutuhkan pupuk 100 kg. Berdasarkan Perhitungan emisi langsung didasarkan pada IPCC tahun 2006 sesuai langkah berikut.

**Asumsi: Penggunaan Urea di indonesia= 100 kg/ha*
%N dalam Urea = 46%

- **Perhitungan direct N_2O-N IPCC Tier-1:**

(1% dari N yang diaplikasikan menjadi N_2O-N).
Faktor emisi = Konversi N_2O-N → N_2O: faktor massa = 44/28 ≈ 1,5714
Total N yang diaplikasikan = 46% x 100 kg = 46 kg
Total direct N_2O= 0,01 x 46 x 44/28= 0,723 kg/100 kg Urea

- **CO_2 hydrolysis (kg/ha) = massa_Urea (kg/ha) × 0,73 (kg CO_2 / kg Urea) (Persamaan 4)**

CO_2 hydrolysis = 100 × 0,73 = 73 kg CO_2 / ha.

**Asusmsi:*

- *Frac_GASF (fraksi N yang menguap/volatil) = 0,10 (10%)*
- *Frac_LEACH (fraksi N yang di-leach atau runoff) = 0,30 (30%)*
- *EF_vol_dep (efisiensi N_2O dari N yang terdeposit) = 0,01 (1%)*
- *EF_leach (efisiensi N_2O dari N yang terleach) = 0,0075 (0.75%)*

- **Perhitungan singkat (untuk contoh $N_{applied}$ = 46 kg N/ha)**
  - N volatilized = 46 × 0.10 = 4,6 kg N/ha
  - N leached = 46 × 0.30 = 13,8 kg N/ha
  - Emisi N_2O-N dari volatilization (melalui deposit): 4.6 × 0.01 = 0.046 kg N_2O-N
    → konversi ke N_2O = 0,046 × 1,5714 = 0,0723 kg N_2O
  - Emisi N_2O-N dari leaching/runoff: 13,8 x 0,01x1,5714x75% = 0,1626 kg N_2O
  - Total indirect N_2O ≈ 0,0723 + 0,1626 = 0,234900 kg N_2O

- N_applied = 46,0 kg N/ha

N_2O = 0,72+0,235 = 0,958 kg N_2O
CO_2 (hidrolisis) = 73 kg CO_2 / ha (faktor 0.73 kg CO_2/kg Urea) = 73 kg
NH_3 volatil = 5,58 kg NH_3 / ha (dengan Frac_GASF = 0.10)
NO_x (perkiraan kasar, jika 10% dari volatilized N) = 1,51 kg NO_2-eq / ha (contoh pembagian 90:10)

4.5 Inventori Data

Tabel 9. Ringkasan Inventori di Proses Produksi Pupuk Urea dan Amonia Sesuai Dengan Total Dalam Periode Kajian dan Unit Fungsi

Input/Output	Total dalam periode	Unit	Jumlah per unit fungsi	Unit	Persentase	Mayoritas Proses yang Menggunakan
Output: Produk Utama						
Produk Pupuk Urea	436.089,82	ton	0,94	ton	93,86%	Urea Usage
Produk Amonia	28.531,59	ton	0,06	ton	6,14%	Ammonia Usage
Input: Bahan Baku gas						
Udara	264.876,84	kNm^3	570,09	Nm^3	98,99%	Ammonia Plant
Nitrogen (cair dan gas)	2.986.327,00	Nm^3	6,43	Nm^3	1,11%	Ammonia Plant
Input: Bahan Baku Cair						
Water	4.386.059,77	m^3	9,44	m^3	100%	RWI
Input: Bahan Bakar						
Natural gas	12.873.857,32	MMBTU	27,71	MMBTU	100%	Ammonia Plant
Input: Bahan Pendukung Padatan						
Coagulan aid	518,00	kg	1,11	g	0,01%	Filter Water System
Alum Sulfat	240.700,00	kg	518,06	g	4,92%	Filter Water System
Chlorine	11.474,00	kg	24,70	g	0,23%	Filter Water System
Asam Sulfat (Proses)	2.123.543,61	kg	4.570,48	g	43,39%	Filter Water System
Caustic Soda	1.752.109,56	kg	3.771,05	g	35,80%	Filter Water System
Resin Cation Dupont HPR 1200	12,18	ton	26,21	g	0,25%	Filter Water System
Resin Anion Dupont HPR 4800	8,24	ton	17,73	g	0,17%	Filter Water System
Resin Anion Lewatit MP 500	1,06	ton	2,28	g	0,02%	Filter Water System
Resin Kation Dowex HPR 1200	1,91	ton	4,11	g	0,04%	Filter Water System
Carbon Molecul Sieve	0,12	ton	0,26	g	0,00%	Filter Water System
Kalgen 121	502,60	kg	1,08	g	0,01%	Steam Utility
Kalgen - 358	895,00	kg	1,93	g	0,02%	Steam Utility
Oxynon A - 701	308,20	kg	0,66	g	0,01%	Steam Utility

Input/Output	Total dalam periode	Unit	Jumlah per unit fungsi	Unit	Persentase	Mayoritas Proses yang Menggunakan
Oxynon M - 603	275,20	kg	0,59	g	0,01%	Steam Utility
Oxynon M - 601	9.280,00	kg	19,97	g	0,19%	Steam Utility
Kurita H - 6060	1.640,00	kg	3,53	g	0,03%	Steam Utility
Kurin Power - 932	1.035,60	kg	2,23	g	0,02%	Steam Utility
Sodium Hydroxida (NaOH)	8.000,00	g	0,02	g	0,00%	QC Urea
Zinc Acetat Dihydrat	6.750,00	g	0,01	g	0,00%	QC Urea
Ferrous Ammonium Sulfat Hexahydrate	4.081,00	g	0,01	g	0,00%	QC Urea
Oxalic Acid Dihydrate	3.000,00	g	0,01	g	0,00%	QC Urea
Ferri Chloride Hexahydrate	3.943,00	g	0,01	g	0,00%	QC Urea
Potassium Sodium Tartrate Tetrahydrate	3.000,00	g	0,01	g	0,00%	QC Urea
Sodium Bisulfit	3.500,00	g	0,01	g	0,00%	QC Urea
Kalium Permanganat	1.500,00	g	3,23E-03	g	0,00%	QC Urea
Sodium Sulfit (Na2SO3)	2.000,00	g	4,30E-03	g	0,00%	QC Urea
Copper (II) Sulfat	500,00	g	1,08E-03	g	0,00%	QC Urea
Ammonium Acetat	1.900,00	g	4,09E-03	g	0,00%	QC Urea
L(+) Ascorbic Acid	1.000,00	g	2,15E-03	g	0,00%	QC Urea
Sodium Sulfat Anhydrate	14.711,00	g	0,03	g	0,00%	QC Urea
Mercury (II) Iodide	1.050,00	g	2,26E-03	g	0,00%	QC Urea
Dimethyl 1-4 Phenilene Diamin	100,00	g	2,15E-04	g	0,00%	QC Urea
Kalium Hydrogen Phatalate	603,00	g	1,30E-03	g	0,00%	QC Urea
Amonium Thicynat	500,00	g	1,08E-03	g	0,00%	QC Urea
4 Dimethylamino Benzaldehyde (PDAB)	146,00	g	3,14E-04	g	0,00%	QC Urea
4 Amino 3 Hydroxy 1 Nephtalien Sulfanic Acid (ANSA)	100,00	g	2,15E-04	g	0,00%	QC Urea
Silver Sulfat	400,00	g	8,61E-04	g	0,00%	QC Urea
Asam Sulfat (KPPL)	374.600,00	kg	806,25	g	7,65%	Waste Water Treatment
Anti Foaming Silicone SAG - 7133	400,00	kg	0,86	g	0,01%	Ammonia Plant

Input/Output	Total dalam periode	Unit	Jumlah per unit fungsi	Unit	Persentase	Mayoritas Proses yang Menggunakan
aMDEA	2.520,00	kg	5,42	g	0,05%	Ammonia Plant
Sodium Carbonate	13.450,00	kg	28,95	g	0,27%	Ammonia Plant
Sponge Iron	35,86	ton	77,18	g	0,73%	Ammonia Plant
Mercury Guard Chamber Activated Carbon	1,51	ton	3,25	g	0,03%	Ammonia Plant
Katalis Hydrotreater (Cobalt-Molybdenum)	0,98	ton	2,11	g	0,02%	Ammonia Plant
Katalis Desulfurizer (Zinc Oxide)	5,42	ton	11,67	g	0,11%	Ammonia Plant
Katalis Primary Reformer (Nikel Oxide dan Potasium)	8,34	ton	17,95	g	0,17%	Ammonia Plant
Katalis Secondary Reformer (Nikel Oxide dan Calcium Aluminate)	13,99	ton	30,11	g	0,29%	Ammonia Plant
Katalis HTS (Iron)	15,91	ton	34,24	g	0,32%	Ammonia Plant
Katalis LTS (Chopper-Zinc)	15,08	ton	32,46	g	0,31%	Ammonia Plant
Katalis Methanator	2,53	ton	5,45	g	0,05%	Ammonia Plant
Katalis Ammonia Converter	8,09	ton	17,40	g	0,17%	Ammonia Plant
Ferticol Red C	104.200,00	kg	224,27	g	2,13%	Gudang
Uresoft / Anti caking	118.200,00	kg	254,40	g	2,41%	Gudang
Lubricating Oil	7,70	ton	16,57	g	0,16%	Ammonia Plant
Input: Bahan Pendukung Cair						
HClO4 (Perchloric Acid)	105,00	l	2,26E-04	l	58%	QC Urea
Hydrochloride Acid 37% (HCL)	77,50	l	1,67E-04	l	42%	QC Urea
Input: Pendukung Energi						
Listrik PLN	4.487,32	MWh	0,01	kWh	100%	RWI
Input: Bahan Bakar Cair						
Solar	94.645,00	L	0,20	L	100%	Gudang
Input: Bahan pendukung lain						
Kantong Pupuk Urea (@70 gram)	471.034,83	kg	1.013,80	g	91,98%	Gudang

Input/Output	Total dalam periode	Unit	Jumlah per unit fungsi	Unit	Persentase	Mayoritas Proses yang Menggunakan
Benang Jahit Polyester Fiber	2.880,00	Ea	16,12	g	4,93%	Gudang
Jumlah Drum (@drum 9 kg)	4.689,00	kg	10,09	g	3,09%	Gudang
Output: Emisi ke Pihak Ketiga						
Limbah Lubricating Oil	7,70	ton	16,57	g	96,34%	Third Party
Kantong Reject	186,48	kg	0,40	g	2,33%	Third Party
Kantong Expired	106,05	kg	0,23	g	1,33%	Third Party
Output: Emission to air						
CO_2	726.072.477,13	kg	1.562,72	kg	85,76%	Urea Usage
CH_4	13.580,09	kg	0,03	kg	0,00%	Ammonia Plant
N_2O	89.261.244,71	kg	192,12	kg	10,55%	End of life
NOx	24.661,03	kg	0,05	kg	0,00%	Urea Usage
NH_3	24.545.137,98	kg	52,83	kg	2,90%	Urea Usage
Partikulat	26.820,00	kg	0,06	kg	0,00%	Urea Plant
NO	35.609,19	kg	0,08	kg	0,00%	Ammonia Usage
NO_2	6.598.301,07	kg	14,20	kg	0,78%	Urea Usage
Output: Emission to Water						
COD	72,73	ton	0,16	kg	19,69%	WWTP
Amonia (sebagai NH3-N)	73,01	ton	0,16	kg	19,77%	WWTP
Total Nitrogen (sbg N)	215,88	ton	0,46	kg	58,45%	WWTP
TSS	7,65	ton	0,02	kg	2,07%	WWTP
Minyak & Lemak	0,07	ton	1,51E-04	kg	0,02%	WWTP
Output: Air limbah ke sungai						
Blowdown Clarifier	645.529,59	m^3	1.480,27	l	100,00%	WWTP

*Detail data inventory setiap unit, sumber data, dan dataset terlampir pada **Lampiran 1**

4.6 Validasi Data

4.6.1 Penilaian kualitas data

Tabel 10. Kualitas Data

No.	Jenis Data	Checklist ketersediaan data			Sumber data				Keterangan
		Ada	Diestimasi	Tidak Dicakup	Primer		Sekunder		
					Jumlah	Referensi	Jumlah	Referensi	
1. Raw Water Intake									
Input									
1	Bahan baku utama	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
2	Bahan baku pendukung	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
3	Energi Listrik	1	0	0	1	Perusahaan	0		Pengukuran
4	Bahan Bakar	1	0	0	1	Perusahaan	0		Pengukuran
Output									
1	Produk Utama	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
2	Produk Samping	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
3	Emisi ke udara	0	3	0	3	Perusahaan	0	-	Perhitungan: Faktor Emisi IPCC 2006 Faktor Emisi Listrik PLN Grid Sumatera (ESDM, 2019)
2. Electricity Utility									
Input									
1	Bahan baku utama	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
Output									
1	Produk utama	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
2	Emisi ke udara	0	3	0	3	Perusahaan	0	-	Faktor Emisi IPCC 2006
3. Filter Water System									

No.	Jenis Data	Checklist ketersediaan data			Sumber data				Keterangan
		Ada	Diestimasi	Tidak Dicakup	Primer		Sekunder		
					Jumlah	Referensi	Jumlah	Referensi	
Input									
1	Bahan baku utama	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
2	Bahan baku pendukung	13	0	0	13	Perusahaan	0	-	Pengukuran
3	Energi Listrik	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
Output									
1	Produk Utama	5	0	0	5	Perusahaan	0	-	Pengukuran
2	Limbah	2	0	0	2	Perusahaan	0	-	Perhitungan
4. Polished Water System									
Input									
1	Bahan baku utama	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Perhitungan
2	Bahan baku pendukung	3	0	0	3	Perusahaan	0	-	Perhitungan
3	Energi Listrik	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
Output									
1	Produk Utama	3	0	0	3	Perusahaan	0	-	Pengukuran
2	Limbah	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Perhitungan
5. Steam Utility									
Input									
1	Bahan baku Utama	2	0	0	2	Perusahaan	0	-	Pengukuran
2	Bahan baku pendukung	8	0	0	8	Perusahaan	0	-	Pengukuran dan Perhitungan
3	Energi Listrik	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
Output									
1	Produk Utama	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran

No.	Jenis Data	Checklist ketersediaan data			Sumber data				Keterangan
		Ada	Diestimasi	Tidak Dicakup	Primer		Sekunder		
					Jumlah	Referensi	Jumlah	Referensi	
2	Produk Samping	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
3	Emisi ke udara	3	0	0	3	Perusahaan	0	-	Perhitungan: Emisi CO_2 dari Tier 1 IPCC, 2006,
6. Air Separator Plant (ASP)									
Input									
1	Bahan baku utama	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
2	Energi Listrik	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Perhitungan
Output									
1	Produk Utama	2	0	0	2	Perusahaan	0	-	Perhitungan
7. Ammonia Plant									
Input									
1	Bahan baku utama	2	0	0	2	Perusahaan	0	-	Pengukuran
2	Bahan baku pendukung	18	0	0	18	Perusahaan	0	-	Pengukuran: Steam, listrik, Filtered water, polished water. Perhitungan: Udara, nitrogen ASP, dan bahan kimia
3	Energi Listrik	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Perhitungan
Output									
1	Produk utama	2	0	0	2	Perusahaan	0	-	Pengukuran
2	Produk samping	7	0	0	7	Perusahaan	0	-	Pengukuran
3	Emisi ke udara	0	3	0	3	Perhitungan	0	-	- Perhitungan: Emisi CO_2 Tier 1 IPCC, 2006 - Pengukuran: Emisi NOx dan SO_2

No.	Jenis Data	Checklist ketersediaan data			Sumber data				Keterangan
		Ada	Diestimasi	Tidak Dicakup	Primer		Sekunder		
					Jumlah	Referensi	Jumlah	Referensi	
8. Urea Plant									
Input									
1	Bahan baku utama	2	0	0	2	Perusahaan	0	-	Pengukuran
2	Bahan baku pendukung	4	0	0	4	Perusahaan	0	-	Pengukuran: Steam, Ammonia, CO_2, Listrik Perhitungan: Nitrogen ASP dan Oli
3	Energi Listrik	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Perhitungan
Output									
1	Produk utama	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
2	Produk Samping	4	0	0	4	Perusahaan	0	-	Pengukuran
3	Emisi ke udara	2	0	0	2	Perusahaan	0	-	Pengukuran
9. Quality Control									
Input									
1	Bahan baku utama	24	0	0	24	Perusahaan	0	-	Pengukuran
Output									
1	Produk	0	1	0	1	Perusahaan	0	-	Perhitungan
10. Waste Water Treatment Plant (WWTP)									
Input									
1	Input total	0	9	0	9	Perusahaan	0	-	Perhitungan
2	Bahan baku pendukung	0	1	0	1	Perusahaan	0	-	Perhitungan
Output									
1	Hasil olahan	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
2	Emisi ke air	5	0	0	5	Perusahaan	0	-	Pengukuran

No.	Jenis Data	Checklist ketersediaan data			Sumber data				Keterangan
		Ada	Diestimasi	Tidak Dicakup	Primer		Sekunder		
					Jumlah	Referensi	Jumlah	Referensi	
11. Bagging Unit/Gudang									
Input									
1	Bahan baku utama	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
2	Bahan baku pendukung	0	6	0	6	Perusahaan	0	-	Perhitungan
3	Energi Listrik	1	0	0	1	Perusahaan	0		Pengukuran
4	Bahan Bakar	1	0	0	1	Perusahaan	0		Pengukuran
Output									
1	Produk utama	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
2	Produk Samping	3	0	0	3	Perusahaan	0	-	Perhitungan
3	Limbah ke pihak ke-3	2	0	0	2	Perusahaan	0	-	Perhitungan
12. Urea Transport									
Input									
1	Input utama	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
2	Input pendukung	0	9	0	9	Perhitungan	0	-	Perhitungan: Digitasi Google Earth
Output									
1	Output total	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
13. Ammonia Transport									
Input									
1	Input Utama	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
2	Input pendukung	0	2	0	2	Perusahaan	0	-	Perhitungan: Digitasi Google Earth
Output									
1	Output total	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran

No.	Jenis Data	Checklist ketersediaan data			Sumber data				Keterangan
		Ada	Diestimasi	Tidak Dicakup	Primer		Sekunder		
					Jumlah	Referensi	Jumlah	Referensi	
14. Urea Usage									
Input									
1	Bahan Baku Utama	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
Output									
1	Produk Utama	0	1	0	1	Perhitungan	0	Perhitungan	Perhitungan: IPCC 2006
2	Emisi dan limbah	0	4	0	4	Perhitungan	0	Perhitungan	Perhitungan: IPCC 2006
15. Ammonia Usage									
Input									
1	Bahan Baku Utama	1	0	0	1	Perusahaan	0	-	Pengukuran
2	Bahan Baku Pendukung	0	2	0	0	-	2	-	Perhitungan: Boero et al., 2021
Output									
1	Produk Utama	0	1	0	0	-	1	Perhitungan	Perhitungan: Boero et al., 2021
2	Emisi dan limbah	0	6	0	0	Perhitungan	6	Perhitungan	Perhitungan: Boero et al., 2021
TOTAL		**148**	**51**		**190**		**9**		

Tabel 11. Rangkuman sumber dataset LCA PIM 2025

Jenis Data	Data Spesifik	Referensi	Data Generik	Referensi
Raw water Intake	8	PT PIM 2024	1	Database Ecoinvent v3.8
Electricity Utility	4	PT PIM 2024	1	Database Ecoinvent v3.8
Ammonia Plant	18	PT PIM 2024	16	Database Ecoinvent v3.8
Filter Water System	10	PT PIM 2024	10	Database Ecoinvent v3.8
QC Urea	5	PT PIM 2024	22	Database Ecoinvent v3.8
Urea Plant	14	PT PIM 2024	0	Database Ecoinvent v3.8
Polished Water System	9	PT PIM 2024	0	Database Ecoinvent v3.8
ASP	3	PT PIM 2024	1	Database Ecoinvent v3.8
Gudang	10	PT PIM 2024	5	Database Ecoinvent v3.8
Steam Utility	8	PT PIM 2024	7	Database Ecoinvent v3.8
Waste Water Treatment Plant	15	PT PIM 2024	1	Database Ecoinvent v3.8
Transport	4	PT PIM 2024	11	Database Ecoinvent v3.8
End of Life	14	Perhitungan	2	Database Ecoinvent v3.8
Jumlah	**122**		**77**	

Penilaian kualitas data dalam kajian LCA ini dilakukan menggunakan metode semi-kuantitatif, dengan mempertimbangkan enam indikator kualitas data, yaitu: cakupan teknologi, cakupan geografis, cakupan waktu, kelengkapan, konsistensi, dan presisi. Setiap indikator dinilai berdasarkan matriks silsilah (pedigree matrix). Nilai numerik dari setiap indikator kemudian dihitung untuk memperoleh Data Quality Rating (DQR). Berdasarkan skor DQR, kualitas data diklasifikasikan menjadi tiga kategori:

- Kualitas Tinggi: DQR ≤ 1,6
- Kualitas Dasar: DQR > 1,6 hingga 3
- Perkiraan Data: DQR > 3 hingga 4

Metode ini mengacu pada pedoman European Commission (2010) untuk menilai keandalan dan presisi data dalam analisis siklus hidup.

a. Pemeriksaan Kelengkapan (C)

Kondisi: terdapat total 199 data yang digunakan, yang terbagi menjadi 190 data LCA berasal dari pengukuran dan perhitungan internal PT PIM, serta 9 data bersumber dari literatur jurnal penelitian. Sumber literatur tersebut menyumbang sekitar 4,52% dari total data. Berdasarkan data tersebut, proporsi kelengkapan data dianalisis untuk memastikan semua komponen penting dalam inventori LCA tercakup, dengan hasil perhitungan proporsi kelengkapan data disajikan pada **Tabel 12.**

Tabel 12. Proporsi Kelengkapan Data Kajian LCA PT PIM Tahun 2025

Jenis Data	Jumlah Data	Proporsi
Primer	190	95,48%
Sekunder	9	4,52%
Total	**199**	**100,00%**

Skor indikator: 1

b. Pemeriksaan Cakupan Waktu (Temporal Representativeness, TiR)

- **Kondisi:** Semua data yang digunakan merupakan hasil pengukuran langsung maupun perhitungan dari proses produksi di PT PIM untuk periode Januari hingga Desember 2024. Hal ini memastikan bahwa data mencerminkan kondisi operasi aktual selama satu tahun penuh, sehingga representatif secara temporal.
- **Skor Indikator:** 1 (menunjukkan cakupan waktu sangat representatif dan sesuai dengan periode analisis LCA).

c. Pemeriksaan Cakupan Geografis (Geographical Representativeness, GR)

- **Kondisi:** Data dikumpulkan dari lokasi pabrik PT PIM untuk unit produksi dan dari lokasi eksternal yang relevan dengan subsystem usage, seperti transportasi dan penggunaan produk oleh konsumen. Pendekatan ini memastikan bahwa data

menggambarkan kondisi geografis nyata dari seluruh aliran input-output dalam sistem produk.

- **Skor Indikator:** 1 (menunjukkan cakupan geografis lengkap dan representatif).

d. Pemeriksaan Cakupan Teknologi (Technological Representativeness, TeR)

- **Kondisi:** Data yang digunakan sepenuhnya mencerminkan teknologi yang dioperasikan di PT PIM, mencakup enam unit produksi:
  1. Pabrik Urea 1 (Prill)
  2. Pabrik Amonia 1
  3. Pabrik Urea 2 (Granule)
  4. Pabrik Amonia 2
  5. Pabrik Utilitas 1
  6. Pabrik Utilitas 2

  Data ini menggambarkan teknologi proses yang aktual, sehingga valid untuk analisis LCA.
- **Skor Indikator:** 1 (menunjukkan cakupan teknologi sangat representatif).

e. Presisi (Precision, P)

- **Kondisi:** Beberapa data diperoleh dari pengukuran langsung, sedangkan sebagian lainnya berasal dari asumsi, estimasi, atau perhitungan berbasis data primer. Hal ini menunjukkan adanya variasi tingkat ketelitian antar data. Presisi dinilai dengan mempertimbangkan ketepatan alat ukur, frekuensi pengambilan data, serta metode estimasi.
- **Skor Indikator:** 1,5 → Xw (menunjukkan presisi tinggi dengan beberapa ketidakpastian minor pada data estimasi).

f. Konsistensi (Consistency, M)

- **Kondisi:** Metodologi LCA diterapkan secara seragam pada seluruh komponen kajian, termasuk tahapan inventori, alokasi multi-output, dan penilaian kategori dampak. Konsistensi ini menjaga keseragaman perhitungan dan meminimalkan bias akibat variasi metode.
- **Skor Indikator:** 1 (menunjukkan penerapan metodologi yang konsisten di seluruh sistem kajian).

Keterangan: Penilaian enam indikator ini selanjutnya digunakan untuk menghitung **Data Quality Rating (DQR)**, yang menentukan klasifikasi kualitas data sebagai tinggi, dasar, atau perkiraan, sesuai pedoman European Commission (2010) dan ISO 14044.

Data Quality Rating (DQR) $= \frac{C+TiR+GR+TeR+P+M+(X_w*4)}{i+4}$

= (1+1+1+1+1+1,5+(1,5*4))/6+4

DQR = 1,35

Hasil penilaian kualitas data menunjukkan **Data Quality Rating (DQR) sebesar 1,35**, yang menandakan bahwa data yang dikumpulkan memiliki **kualitas tinggi**. Dengan nilai ini, data dianggap andal dan representatif, sehingga dapat digunakan secara sah untuk perhitungan dan penentuan nilai kategori dampak dalam kajian LCA PT PIM tahun 2025. Penilaian ini mencerminkan bahwa indikator cakupan waktu, geografis, teknologi, presisi, konsistensi, dan kelengkapan telah terpenuhi secara memadai sesuai standar ISO 14044 dan pedoman European Commission (2010).

4.6.2 Perlakuan atas data yang hilang

Data yang hilang dalam kajian LCA ini dianggap sama dengan 0 (nol) yaitu :

1. Data emisi CO yang tidak diinventarisasi pada SIMPEL 2024 dianggap bernilai nol.
2. Data SO_2 di Steam utility dianggap 0 karena tidak dinventarisasi

BAB 5. PENILAIAN DAMPAK DAUR HIDUP

5.1. Prosedur Penilaian Dampak Daur Hidup (Life Cycle Impact Assessment/LCIA)

Prosedur penilaian dampak siklus hidup (Life Cycle Impact Assessment – LCIA) dalam kajian ini dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Penetapan Kategori Dampak Menentukan kategori dampak lingkungan yang wajib dianalisis sesuai dengan ketentuan **Permen LH No. 7 Tahun 2025**, sehingga mencakup aspek-aspek yang relevan dan diwajibkan oleh regulasi nasional.
2. Klasifikasi Data Inventori
   Melakukan klasifikasi aliran data inventori (Life Cycle Inventory – LCI) dalam software OpenLCA 2.5 menggunakan dataset metode yang telah dipilih. Tahap ini mengelompokkan input dan output berdasarkan kategori dampak yang sesuai.
3. Karakterisasi
   Mengkuantifikasi kontribusi setiap aliran LCI terhadap kategori dampak yang berbeda dengan menggunakan metode karakterisasi pada OpenLCA 2.5. Langkah ini menghasilkan nilai numerik yang menunjukkan besarnya dampak masing-masing aliran terhadap setiap kategori.
4. Normalisasi dan Pembobotan
   Melakukan normalisasi untuk membandingkan kontribusi relatif dari berbagai kategori dampak, kemudian menerapkan pembobotan untuk mengidentifikasi isu lingkungan yang paling signifikan (key impact issues).

5.2. Kategori Dampak, Indikator Dampak, dan Hasil Penilaian Dampak Daur Hidup

Nilai kategori dampak berdasarkan perhitungan dengan software OpenLCA 2.5 diperoleh hasil sesuai pada Tabel 13 dan 14. Secara umum setiap 1 ton produk yang terdiri atas Pupuk Urea dan Amonia PT PIM dalam lingkup Cradle to Grave dapat menghasilkan potensi dampak lingkungan. Setiap lingkup dalam kajian ini berpotensi menghasilkan dampak lingkungan sebagai berikut:

1. **Tahap Upstream (Produksi Bahan Baku):** Tahap Upstream mendominasi pada 2 kategori dampak yaitu Penggunaan Energi dan Penurunan Sumber Daya Abiotik. Penggunaan Energi (Cumulative Energy Demand) bernilai 21.500 MJ (≈73% dari total) menunjukkan konsumsi energi terbesar terjadi pada proses ekstraksi dan produksi bahan baku. Penurunan Sumber Daya Abiotik (Fossil) bernilai 19.300 MJ (≈73% dari total), menunjukkan penggunaan sumber daya fosil intensif dalam produksi bahan baku. Efisiensi energi dan optimasi bahan baku di tahap Upstream sangat penting untuk menekan jejak energi dan penurunan abiotik fosil**.** Penggunaan sumber energi terbarukan dan bahan baku alternatif dapat signifikan menurunkan dampak lingkungan sebelum produk mencapai pabrik.
2. **Tahap Core (Produksi Pabrik):** Tahap core memiliki kontribusi relatif kecil dibandingkan downstream pada sebagian besar kategori dampak, kecuali pada kategori dampak Penurunan Sumber Daya Abiotik Non-Fosil. Pada dampak ini setiap 1 ton produk menghasilkan $9{,}50\times10^{-4}$ kg Sb eq, menjadi bagian signifikan dari total kategori ini. Beberapa kategori minor lainnya juga terpengaruh, tetapi nilainya tidak dominan dibanding tahap Upstream dan Downstream. Meski kontribusi tahap pabrik tidak sebesar tahap lain, perbaikan efisiensi proses pabrik, pengendalian konsumsi energi dan bahan kimia, serta pemeliharaan peralatan tetap relevan untuk menurunkan dampak minor dan meningkatkan performa lingkungan keseluruhan.

3. **Tahap Downstream (Penggunaan Produk):** Tahap ini menjadi kontributor dominan pada sebagian besar kategori dampak lingkungan yang dianalisis yaitu: Global Warming Potential (GWP) dengan nilai 2.930 kg CO_2 eq (≈74% dari total) hal ini menunjukkan emisi CO_2 dan N_2O dari penggunaan pupuk di lapangan sebagai sumber utama pemanasan global. Potensi Hujan Asam (Acidification Potential) 104 kg SO_2 eq (>98% dari total) hal ini dapat berasal dari transformasi nitrogen di tanah menjadi NOx dan SOx. Potensi Eutrofikasi dengan nilai 24,1 kg PO_4^{3-} eq (≈97% dari total), akibat run-off nutrien (N, P) ke badan air. Photochemical Oxidant Formation dengan nilai 0,74 kg C_2H_4 eq (≈93%), terkait emisi VOC dan NOx selama penggunaan pupuk. Pada kategori dampak toksisitas dan karsinogenik**,** Downstream menyumbang mayoritas terutama dari residu pupuk dan eksposur bahan kimia di lahan pertanian. Untuk dampak Water Footprint bernilai 35,2 m^3 water eq (≈57%), mencerminkan kebutuhan air pada irigasi atau pelarutan pupuk. Sementara itu kategori dampak Land Use Change 1.240 kg C deficit (≈62%), akibat perubahan lahan untuk penggunaan pupuk dan intensifikasi pertanian. Dominasi tahap Downstream menunjukkan bahwa penggunaan pupuk oleh konsumen merupakan titik kritis dalam mitigasi dampak lingkungan.

Berdasarkan analisis dampak yang telah diidentifikasi, khusus pada unit bisnis inti PT PIM (Core) akan dipilih kategori dampak yang paling signifikan dan relevan untuk diperhatikan dalam konteks pengelolaan lingkungan. Kategori dampak ini akan dianalisis lebih lanjut untuk menilai isu-isu penting yang berkaitan dengan operasi pabrik, sekaligus mengevaluasi kontribusi program inovasi lingkungan dalam mengurangi dampak tersebut. Diskusi mendalam mengenai kategori dampak yang timbul dari proses inti PT PIM disajikan secara terperinci pada Bab 6**.**

Tabel 13. Kategori Dampak Berdasarkan Karakterisasi Tahap Daur Hidup (FU: 1 ton produk Urea dan Amonia)

Kategori Dampak	Satuan per unit fungsi	Upstream	Core	Downstream	Total
Global Warming Potential	kg CO_2 eq	143,57	899,89	**2.925,84**	3.969,31
Potensi Penipisan Ozon	kg CFC-11 eq	8,42E-05	8,13E-06	**8,70E-05**	1,80E-04
Potensi Hujan Asam	kg SO_2 eq	0,72	0,82	**104,19**	105,72
Potensi Eutrofikasi	kg PO_4--- eq	0,06	0,41	**24,13**	24,60
Penggunaan Energi	MJ	**21.522,73**	153,47	7.604,15	29.280,35
Cumulative Energy Demand (non-renewable, fossil)	MJ	**21.469,80**	101,47	7.504,49	29.075,80
Cumulative Energy Demand (non-renewable, biomass)	MJ	0,02	0,03	**0,49**	0,54
Cumulative Energy Demand (non-renewable, nuclear)	MJ	**31,51**	17,86	**47,46**	96,83
Photochemical oxidant	kg C_2H_4 eq	0,05	0,01	**0,74**	0,80
Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil)	MJ	**19.348,50**	94,96	7.064,93	26.508,40
Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil dan non fossil)	kg Sb eq	6,32E-05	**9,50E-04**	8,60E-04	1,87E-03
Karsinogenik	CTUh	**7,00E-06**	2,03E-06	3,44E-05	4,34E-05
Toxicity	kg 1,4-DB eq	104,89	35,96	**243,77**	384,62
Water Footprint	m^3 water eq	17,61	8,45	**35,18**	61,25
Land use change	kg C deficit	765,85	10,01	**1.235,87**	2.011,73
Terrestrial Ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,10	0,06	**0,75**	0,92

Tabel 14. Tabel Kategori Dampak Jejak Air (FU: 1 ton produk Urea dan Amonia)

Kategori Dampak	Satuan per unit fungsi	Upstream	Core	Downstream	Total
Jejak kelangkaan air	m^3 water eq	1,76E+01	17,61	**8,45**	35,18
Eutrofikasi air tawar	kg P eq	7,40E-03	7,40E-03	**6,18E-03**	0,02
Eutrofikasi air laut	kg N eq	1,05E-01	0,11	**0,64**	14,49
Asidifikasi air tawar	kg SO_2 eq	7,15E-01	0,72	**0,82**	104,19
Ekotoksisitas air tawar	kg 1,4-DB eq	5,00E+01	49,97	**31,27**	76,86
Ekotoksisitas air laut	kg 1,4-DB eq	1,05E-01	0,11	**0,64**	14,49
Toksisitas (karsinogenik) terhadap manusia karena polusi air	CTUh	7,00E-06	7,00E-06	**2,03E-06**	3,44E-05
Toksisitas (non-karsinogenik) terhadap manusia karena polusi air	kg 1,4-DB eq	1,05E+02	104,89	**35,96**	243,77

5.3. Keterbatasan Hasil LCIA Relatif terhadap Tujuan dan Lingkup LCA

Berdasarkan hasil penilaian kualitas data (Data Quality Rating – DQR) yang dijabarkan pada Bab 4, dapat disimpulkan bahwa data inventori yang dikumpulkan memiliki kualitas tinggi dan cukup memadai untuk melaksanakan tahap Life Cycle Impact Assessment (LCIA) sesuai dengan tujuan, lingkup, dan batasan sistem yang telah ditetapkan pada kajian ini. Hal ini memastikan bahwa input dan output yang digunakan untuk perhitungan kategori dampak mencerminkan kondisi nyata proses produksi pupuk Urea dan Amonia di PT PIM pada periode Tahun 2024. Meskipun demikian, terdapat beberapa keterbatasan dalam hasil penilaian dampak, yang perlu diperhatikan dalam interpretasi data:

1. Relevansi Dampak Terbatas pada Produk Tertentu

    - Nilai kategori dampak yang dihitung hanya mencerminkan dampak paling relevan dari produksi pupuk Urea dan Amonia di PT PIM.
    - Dampak dari proses lain di luar sistem produk yang dikaji, seperti distribusi regional atau penggunaan di sektor lain, tidak diperhitungkan.

2. Keselarasan Model Karakterisasi dengan PCR

    - Model karakterisasi yang digunakan telah diterapkan sesuai dengan ketentuan Product Category Rules (PCR) yang menjadi acuan.
    - Hal ini menjamin konsistensi metodologi dengan standar internasional dan memastikan perhitungan dampak lingkungan dapat direproduksi.

3. Pengaruh Cut-off dan Keterbatasan Data

    - Penggunaan cut-off dalam inventori menyebabkan beberapa input dan output dengan kontribusi rendah (<1%) tidak dimasukkan.
    - Perbedaan sumber data, baik primer maupun sekunder, dapat menghasilkan variasi kecil pada nilai dampak, sehingga tidak semua aliran material atau energi tercakup secara lengkap dalam LCIA.

4. Cakupan Unit Proses

    - Semua unit proses yang termasuk dalam batasan sistem telah diperhitungkan dalam kajian.
    - Proses-proses yang secara eksplisit berada di luar cut-off atau di luar batas sistem tidak dimasukkan, sehingga dampak terkait proses tersebut tidak tercermin dalam hasil akhir LCIA.

Dengan memperhatikan keterbatasan ini, hasil LCIA tetap valid untuk mendukung analisis isu lingkungan utama, perencanaan pengurangan dampak, serta evaluasi kontribusi program inovasi lingkungan di PT PIM. Namun, interpretasi harus dilakukan dengan pemahaman bahwa beberapa input minor dan proses eksternal mungkin tidak tercakup, sehingga nilai dampak dapat sedikit berbeda jika seluruh aliran diperhitungkan secara lengkap.

5.4. Analisa Keterkaitan LCIA dengan Tujuan dan Lingkup LCA

Hasil LCIA menunjukkan bahwa nilai kategori dampak lingkungan dari produk pupuk Urea dan Amonia telah sesuai dengan tujuan kajian, yaitu untuk menilai beban dan potensi dampak lingkungan sepanjang siklus hidup (cradle-to-grave), serta memenuhi persyaratan Permen LH No. 7 Tahun 2025. Dalam kajian ini, pembahasan difokuskan pada tahap Core, yaitu proses inti PT PIM, karena tahap ini merupakan titik kritis dalam pengelolaan operasional pabrik dan memiliki potensi untuk dikendalikan melalui strategi internal. Temuan ini menjadi dasar bagi perencanaan program inovasi lingkungan di pabrik, sehingga pengurangan dampak dapat dicapai melalui intervensi internal yang terukur. Pembahasan lebih rinci akan disampaikan pada **Bab 6**.

5.5. Analisa Keterkaitan LCIA dengan Hasil LCI

Penilaian dampak siklus hidup (Life Cycle Impact Assessment – LCIA) menyediakan dasar analisis untuk menilai kontribusi potensial dari seluruh lingkup siklus hidup, mulai dari tahap Upstream (Cradle) hingga Downstream (Grave), berdasarkan inventarisasi siklus hidup (Life Cycle Inventory – LCI). Sesuai dengan SNI ISO 14044, nilai potensi dampak dihitung dari hasil LCI yang diklasifikasikan ke dalam kategori dampak, sehingga masing-masing kategori memiliki kontribusi yang berbeda terhadap dampak lingkungan total. Pada kajian ini, OpenLCA versi 2.5 digunakan untuk menghitung potensi dampak yang terkait dengan data inventaris siklus hidup. Secara ringkas, keterkaitan antara hasil LCIA dan hasil LCI disajikan pada **Tabel 15**, sementara representasi lengkapnya dapat dilihat pada **Lampiran 1**.

Berdasarkan hasil **karakterisasi dampak** pada Tabel 13 dan Tabel 14, terlihat bahwa proses-proses di tahap **Upstream (hulu)** dan **Core (inti pabrik)** memberikan kontribusi terbesar terhadap sebagian besar kategori dampak. Hal ini menunjukkan bahwa sejumlah **data inventaris emisi dan penggunaan sumber daya** yang dimasukkan ke dalam proses produksi pupuk Urea dan Amonia berkontribusi secara signifikan terhadap dampak lingkungan. Kontribusi yang berasal dari lingkup Upstream juga menandakan adanya **data background** seperti: bahan baku, energi, dan transportasi bahan mentah yang turut mempengaruhi nilai kategori dampak.

Tabel 15. Keterkaitan LCIA dan LCI: Potensi Hujan Asam, Potensi Eutrofikasi, Toxicity, Global Warming Potential, dan Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil)

Name	Inventory result	Unit	Characterization factor	Unit	Impact assessment result	Unit
Potensi Hujan Asam						**kg SO_2 eq.**
Ammonia	52,78	kg	1,6	kg SO_2 eq/kg	84,44	kg SO_2 eq.
Sulfur dioxide	6,89	kg	1,2	kg SO_2 eq/kg	8,27	kg SO_2 eq/kg
Nitrogen dioxide	14,19	kg	0,5	kg SO_2 eq/kg	7,09	kg SO_2 eq/kg
Potensi Eutrofikasi						**kg PO_4--- eq**
Ammonia	52,78	kg	0,35	kg PO_4--- eq/kg	18,47	kg PO_4--- eq/kg
Dinitrogen monoxide	9,01	kg	0,27	kg PO_4--- eq/kg	2,43	kg PO_4--- eq/kg
Nitrogen dioxide	14,19	kg	0,13	kg PO_4--- eq/kg	1,84	kg PO_4--- eq/kg
Toxicity						**kg 1,4-DB eq**

Name	Inventory result	Unit	Characterization factor	Unit	Impact assessment result	Unit
Nickel	0	kg	35.000	kg 1,4-DB eq/kg	106,13	kg 1,4-DB eq
Barium	0,14	kg	630	kg 1,4-DB eq/kg	89,79	kg 1,4-DB eq
Thallium	0	kg	225.000	kg 1,4-DB eq/kg	36,26	kg 1,4-DB eq
Global Warming Potential						**kg CO_2 eq**
Dinitrogen monoxide	9,01	kg	265	kg CO_2 eq/kg	2.388,19	kg CO_2 eq/kg
Carbon dioxide	884,83	kg	1	kg CO_2 eq/kg	884,83	kg CO_2 eq/kg
Carbon dioxide, fossil	510,8	kg	1	kg CO_2 eq/kg	510,8	kg CO_2 eq/kg
Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil)						**MJ**
Gas, natural, in ground	564,12	m^3	34,5	MJ/m^3	19.461,97	MJ
Oil, crude, in ground	153,05	kg	43,2	MJ/kg	6.611,7	MJ
Coal, hard, unspecified, in ground	21,67	kg	18,16	MJ/kg	393,47	MJ

Hasil penilaian dampak siklus hidup menunjukkan adanya kontribusi signifikan dari berbagai substansi terhadap beberapa kategori dampak lingkungan utama. Pada kategori Potensi Hujan Asam (Acidification Potential, AP), Amonia (NH_3) menjadi kontributor terbesar dengan nilai 84,44 kg SO_2 eq, jauh melebihi kontribusi sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen dioksida (NO_2) yang masing-masing hanya memberikan 8,27 kg dan 7,09 kg SO_2 eq. Hal ini menunjukkan bahwa emisi Amonia dari proses produksi pupuk Urea dan Amonia merupakan sumber utama potensial terjadinya hujan asam. Keterlibatan SO_2 dan NO_2 relatif minor, meskipun tetap relevan karena berasal dari pembakaran bahan bakar dan proses inti pabrik. Oleh karena itu, pengelolaan emisi Amonia melalui optimasi reaktor, sistem ventilasi, atau teknologi pengendalian emisi menjadi langkah penting untuk mitigasi dampak hujan asam.

Pada kategori Potensi Eutrofikasi (Eutrophication Potential, EP), Amonia kembali menyumbang nilai terbesar sebesar 18,47 kg PO_4^{3-} eq, disusul oleh dinitrogen monoksida (N_2O) dan nitrogen dioksida masing-masing sebesar 2,43 kg dan 1,84 kg PO_4^{3-} eq. Kontribusi Amonia ini menunjukkan bahwa limbah nitrogen dari proses produksi memiliki potensi mencemari perairan melalui limpasan nutrien. Meskipun N_2O dan NO_2 memberikan kontribusi yang lebih kecil, keduanya tetap relevan untuk kualitas air dan emisi gas rumah kaca yang bersifat terkait dengan nutrien. Dengan demikian, pengendalian nitrogen di tahap produksi dan manajemen limbah menjadi langkah penting untuk menurunkan dampak eutrofikasi. pengendalian nitrogen pada tahap produksi dan manajemen limbah menjadi langkah penting untuk menurunkan dampak eutrofikasi. Namun, hasil kajian menunjukkan bahwa hotspot kategori eutrofikasi justru berada pada tahap downstream, yakni fase penggunaan produk pupuk di lahan pertanian. Hal ini sangat relevan untuk diangkat karena efektivitas manajemen pemupukan dan praktik pengelolaan lahan memiliki keterkaitan langsung dengan potensi eutrofikasi.

Pada tahap penggunaan, sebagian nitrogen yang diaplikasikan ke lahan tidak seluruhnya terserap oleh tanaman, melainkan mengalami kehilangan melalui proses runoff, leaching, atau volatilisasi. Aliran nitrogen dan fosfor ke badan air menyebabkan peningkatan konsentrasi nutrien di perairan yang memicu pertumbuhan alga berlebih (algal bloom) dan penurunan kualitas ekosistem perairan. Oleh karena itu, strategi pengelolaan berkelanjutan seperti penerapan precision farming, efisiensi dosis dan waktu pemupukan, serta penggunaan pupuk slow-release atau berbasis inhibitor nitrifikasi menjadi sangat penting untuk meminimalkan dampak eutrofikasi pada tahap downstream.

Kategori Toksisitas (Toxicity) menunjukkan peran signifikan dari logam berat, terutama Nickel (Ni), Barium (Ba), dan Thallium (Tl). Nickel menjadi penyumbang terbesar, sebesar 106,13 kg 1,4-DB eq, meskipun data inventaris awalnya nol, yang kemungkinan berasal dari proses produksi bahan baku atau data sekunder. Barium dan Thallium memberikan kontribusi signifikan terhadap potensi toksisitas manusia dan ekosistem, masing-masing sebesar 89,79 kg dan 36,26 kg 1,4-DB eq. Hal ini menegaskan perlunya pengendalian penggunaan bahan kimia beracun, serta pengolahan limbah logam berat dan monitoring kualitas air dan udara di sekitar pabrik.

Pada kategori Global Warming Potential (GWP), dinitrogen monoksida (N_2O) menjadi kontributor utama dengan nilai 2.388,19 kg CO_2 eq, diikuti oleh karbon dioksida (CO_2) sebesar 884,83 kg CO_2 eq dan CO_2 fosil 510,8 kg CO_2 eq. Pada lingkup core, dominasi N_2O menunjukkan bahwa reaksi produksi Urea, termasuk dekomposisi Amonia, adalah sumber utama emisi gas rumah kaca. Kontribusi CO_2 dan CO_2 fosil masih signifikan, terutama terkait dengan konsumsi bahan bakar fosil dan energi listrik untuk operasi pabrik. Oleh karena itu, pengendalian N_2O melalui optimasi proses dan implementasi teknologi mitigasi gas rumah kaca, serta peningkatan efisiensi energi, menjadi strategi penting untuk menurunkan GWP.

Pada kategori Penurunan Sumber Daya Abiotik (Fossil), gas alam menjadi penyumbang terbesar dengan nilai 19.461,97 MJ, diikuti oleh minyak mentah 6.611,7 MJ dan batu bara 393,47 MJ. Tingginya kontribusi gas alam menunjukkan ketergantungan besar pabrik terhadap bahan bakar fosil untuk energi proses. Upaya mitigasi dapat dilakukan melalui efisiensi energi, penggantian sebagian bahan bakar fosil dengan energi terbarukan, atau optimasi proses untuk mengurangi konsumsi energi secara keseluruhan.

Secara keseluruhan, analisis LCIA ini menegaskan bahwa Amonia dan N_2O merupakan kontributor kritis untuk sebagian besar kategori dampak lingkungan, sementara logam berat memberikan dampak signifikan pada kategori toksisitas. Kontribusi energi fosil pada tahap Core menekankan pentingnya efisiensi proses produksi. Hasil ini menjadi dasar strategis untuk menentukan prioritas mitigasi, dengan fokus pada pengelolaan emisi Amonia dan N_2O, pengendalian limbah logam berat, serta efisiensi energi dan bahan baku pada tahap Core.

5.6. Pernyataan LCIA sebagai Ekspresi Relatif dan Tidak Memprediksi Dampak Kategori Endpoint

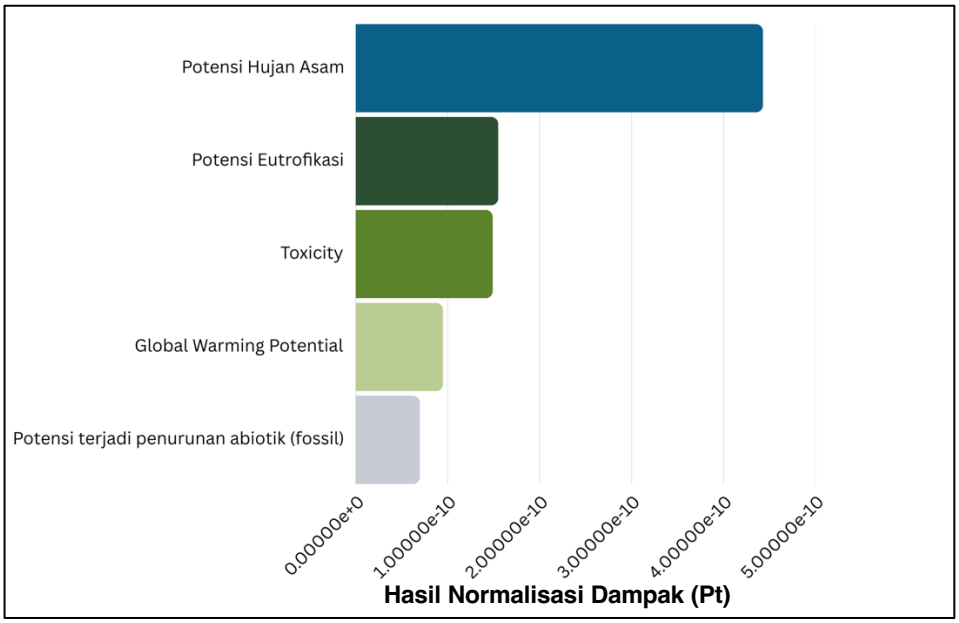
Hasil LCIA ini mengacu pada midpoint category yang telah ditentukan daslam Permen LH No 7 Tahun 2025 yang bukan merupakan gambaran terhadap terlampauinya nilai ambang, batas keselamatan atau risiko. Oleh karena itu Hasil LCIA merupakan ekspresi relatif dan tidak memprediksi dampak pada kategori endpoint.

BAB 6. INTERPRETASI DAUR HIDUP

6.1. Identifikasi Isu Penting

Merujuk pada hasil analisis yang disajikan pada **Bab 5.2**, dapat diketahui bahwa lingkup downstream memberikan kontribusi terbesar terhadap sebagian besar kategori dampak lingkungan yang dievaluasi dalam kajian ini. Walaupun demikian, pembahasan interpretasi difokuskan pada lingkup inti (core) yang mencakup unit bisnis utama PT PIM, yaitu proses produksi Amonia dan pupuk Urea. Penekanan pada lingkup inti dilakukan dengan pertimbangan bahwa aspek tersebut merupakan titik kendali yang paling strategis untuk dilakukan intervensi, terutama terkait dengan peningkatan efisiensi operasional pabrik, pengendalian konsumsi energi dan bahan kimia, serta program pemeliharaan peralatan. Upaya tersebut diharapkan dapat menekan kontribusi terhadap dampak minor sekaligus memperkuat performa lingkungan secara keseluruhan.

Pada konteks pengelolaan lingkungan, lingkup inti aktivitas PT PIM terbukti berkontribusi terhadap berbagai kategori dampak lingkungan secara kumulatif, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 13 dan 14. Namun, identifikasi isu-isu lingkungan yang dianggap penting tidak dapat semata-mata ditetapkan berdasarkan daftar kategori dampak, mengingat adanya perbedaan karakteristik indikator pada setiap kategori. Oleh sebab itu, proses identifikasi isu penting dalam penelitian ini dilaksanakan melalui pendekatan normalisasi, yang bertujuan untuk mengukur dan membandingkan besaran relatif dari setiap indikator dampak terhadap total sistem produk yang dianalisis. Pendekatan ini mengacu pada pedoman SNI ISO 14044:2017, sehingga hasil interpretasi memiliki dasar metodologis yang terstandarisasi. Faktor normalisasi yang diterapkan adalah CML, World 2000, dengan alasan bahwa referensi tersebut memiliki cakupan global, merepresentasikan seluruh tahapan siklus hidup produk, serta mempertimbangkan interval waktu analisis yang relatif panjang sehingga hasil yang diperoleh lebih komprehensif. Penerapan normalisasi ini memungkinkan penentuan prioritas isu lingkungan yang lebih obyektif, sehingga dapat dijadikan dasar dalam perumusan strategi perbaikan berkelanjutan. Hasil dari proses normalisasi dan pembobotan untuk masing-masing kategori dampak selanjutnya disajikan pada bagian berikut.



Gambar 4. Hasil pembobotan kategori dampak Metode World 2000

Gambar 4 menampilkan lima kategori dampak utama isu penting berdasarkan hasil analisis normalisasi dan pembobotan. Pemilihan kategori tersebut didasarkan pada pertimbangan metodologis bahwa tidak semua kategori dampak memiliki tingkat kontribusi yang signifikan terhadap sistem produk yang dikaji. Oleh karena itu, melalui proses normalisasi diperoleh gambaran mengenai besaran relatif dari setiap kategori dampak, sehingga dapat ditentukan kategori yang memiliki proporsi tertinggi terhadap total beban lingkungan. Hasil analisis menunjukkan bahwa kelima kategori dampak yang teridentifikasi memiliki kontribusi yang lebih menonjol dibandingkan kategori lainnya. Hal ini mencerminkan adanya pengaruh langsung dari inventori dominan, seperti konsumsi energi berbasis fosil, pelepasan emisi gas rumah kaca, senyawa kimia berbahaya, serta emisi gas yang bersifat asidifikasi. Dengan kata lain, kelima kategori tersebut mewakili isu lingkungan yang paling krusial pada sistem produksi Amonia dan pupuk Urea, baik dalam konteks sumber daya fossil, pencemaran udara, maupun risiko terhadap ekosistem dan kesehatan manusia. Dengan menggunakan pendekatan ini, fokus pembahasan isu penting menjadi lebih terarah dan berbasis bukti kuantitatif, sehingga strategi pengelolaan lingkungan yang diusulkan dapat diarahkan pada aspek-aspek yang memberikan kontribusi terbesar terhadap keseluruhan dampak lingkungan.

Tabel 16. Isu penting berdasarkan rasio alokasi produk

Jenis Produk	Potensi Hujan Asam	Potensi Eutrofikasi	Toxicity	Global Warming Potential	Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil)
	kg SO_2 eq	kg PO4--- eq	kg 1,4-DB eq	kg CO_2 eq	MJ
Urea (1 ton)	98,83	24,66	189,47	3.664,73	20.640,10
Amonia (1 ton)	211,10	23,71	3.367,50	8.624,61	116.201,00

Berdasarkan Tabel 16, terlihat adanya variasi kontribusi dampak lingkungan yang cukup signifikan antara produk Urea dan Amonia. Dari kelima kategori dampak yang dianalisis, Amonia secara konsisten menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan Urea untuk setiap 1 ton produk yang dihasilkan, kecuali pada potensi eutrofikasi yang relatif seimbang. Hal ini menunjukkan bahwa sistem produksi Amonia lebih intensif dalam penggunaan energi dan lebih besar dalam menghasilkan emisi yang berdampak lingkungan. Unit proses yang paling berkontribusi (hotspot) pada kategori dampak isu penting secara umum adalah Ammonia Plant dan Urea Plant. Pada kategori dampak Potensi terjadi penurunan abiotic (fossil) kontributor utamanya adalah dari penggunaan natural gas sebagaimana yang tercantum di Tabel 17 Kontributor utama dampak Global Warming Potential (GWP) adalah Ammonia Plant, Ammonia usage, dan Natural gas supply. Hal ini sesuai dengan hasil analisis inventori terkait besaran emisi gas rumah kaca pada Tabel 17. Emisi gas rumah kaca didominasi berasal dari pelepasan CO_2 di subsistem tersebut.

Tabel 17. Nilai intensitas kategori dampak berdasarkan isu penting setiap subsistem core proses di PT PIM Tahun 2025

Kategori Dampak	Satuan per unit fungsi	RWI	FWS	PWS	SU	EU	QC	ASP	WWTP	AP	UP	G	T	EOL	TOTAL
Potensi Hujan Asam	kg SO_2 eq	0,00	0,07	0,00	0,17	0,01	3,50E-04	0,00	0,01	**0,67**	0,55	0,01	13,10	**91,00**	106,00
Potensi Eutrofikasi	kg PO_4--- eq	1,02E-08	0,02	0,00	0,02	5,00E-04	0,01	0,00	**0,25**	0,05	0,12	2,29E-03	1,49	**22,60**	24,60
Toxicity	kg 1,4-DB eq	0,00	19,70	0,00	24,40	0,82	0,12	0,00	2,44	**83,80**	0,08	1,38	221,00	**22,60**	385,00
Global Warming Potential	kg CO_2 eq	7,44	6,08	0,00	393,00	13,40	0,01	0,00	0,13	**487,00**	0,00	2,32	544,00	**2.380,00**	3.970,00
Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil)	MJ	0,00	71,50	0,00	4.440,00	152,00	0,12	0,00	2,19	**13.200,00**	0,00	41,10	7.060,00	0,47	26.500,00

Keterangan: warna biru untuk kontribusi terbesar core dan merah untuk kontribusi terbesar secara keseluruhan.

RWI	: Raw Water Intake	EU	: Electricity Utility	UP	:Urea Plant
FWS	: Filter Water System	QC	: Quality Control	G	: Gudang
PWS	: Polished Water System	WWTP	: Waste Water Treatment Plant	T	: Transport to Customer
SU	: Steam Utility	AP	: Ammonia Plant	EOL	: End of Life

Tabel 17 memperlihatkan distribusi intensitas kategori dampak lingkungan pada berbagai subsistem hulu (upstream), inti (core process), dan hilir (downstream) PT PIM untuk tahun 2025. Dari hasil tersebut, terlihat bahwa beban lingkungan tidak tersebar secara merata, melainkan terkonsentrasi pada unit-unit tertentu yang dominan dalam penggunaan energi maupun menghasilkan emisi langsung. Hotspot dari keselkuruhan proses ditunjukkan warna merah, sementara pada lingkup core kajian hotspot ditunjukkan warna biru. Kategori dampak **potensi hujan asam**, nilai total tercatat sebesar $1{,}06\times10^{2}$ kg SO_2 eq, dengan kontribusi terbesar berasal dari End of Life (EOL) sebesar 91,0 kg SO_2 eq, diikuti oleh Urea Plant (UP) dan Ammonia Plant (AP) dengan masing-masing 0,674 dan 0,551 kg SO_2 eq. Temuan ini menunjukkan bahwa selain proses inti produksi, tahapan akhir siklus hidup produk memberikan kontribusi dominan terhadap pembentukan senyawa asidifikasi, yang kemungkinan besar berasal dari emisi NOx, SO_2, maupun NH_3 di fase penggunaan dan pembuangan. Pada **potensi eutrofikasi**, total dampak mencapai 24,6 kg PO_4^{3-} eq. Distribusi dampaknya menunjukkan bahwa End of Life (EOL) kembali menjadi penyumbang utama dengan 22,6 kg PO_4^{3-} eq, disusul oleh Waste Water Treatment Plant (WWTP) sebesar 0,254 kg PO_4^{3-} eq. Hasil ini mengindikasikan bahwa isu utama pada kategori eutrofikasi lebih banyak dipengaruhi oleh tahapan akhir siklus hidup produk, yang kemungkinan besar terkait dengan pelepasan nitrogen dan fosfor ke lingkungan, baik melalui degradasi pupuk yang tidak terserap tanaman maupun limbah cair proses produksi.

Sementara itu untuk kategori **toksisitas**, nilai total yang dihasilkan adalah 385 kg 1,4-DB eq. Kontributor utama berasal dari End of Life (EOL) dengan nilai 221 kg 1,4-DB eq, serta Urea Plant (UP) sebesar 83,8 kg 1,4-DB eq. Angka ini menegaskan bahwa pelepasan senyawa berbahaya yang berpotensi menimbulkan efek toksik terhadap manusia maupun ekosistem lebih dominan pada fase akhir siklus hidup produk serta proses produksi Urea. Hal ini konsisten dengan sifat pupuk kimia yang berpotensi menghasilkan senyawa residu ketika digunakan dalam lahan pertanian. Kategori **global warming potential (GWP)** menunjukkan nilai total sebesar $3{,}97\times10^{3}$ kg CO_2 eq. Kontribusi paling signifikan berasal dari fase End of Life (EOL) dengan $2{,}38\times10^{3}$ kg CO_2 eq, disusul oleh Urea Plant (UP) sebesar 487 kg CO_2 eq, serta Steam Utility (SU) dengan 393 kg CO_2 eq. Dominasi EOL pada kategori ini mengindikasikan bahwa emisi gas rumah kaca lebih besar dihasilkan ketika pupuk digunakan di lapangan, terutama akibat pelepasan CO_2 dan N_2O dari dekomposisi nitrogen. Sementara itu, tingginya kontribusi Steam Utility menunjukkan pentingnya pengelolaan energi panas dan efisiensi bahan bakar dalam proses produksi. Pada kategori terakhir, yaitu **potensi penurunan abiotik (fossil)**, terlihat nilai total $2{,}65\times10^{4}$ MJ. Sumber dominan berasal dari End of Life (EOL) dengan $7{,}06\times10^{3}$ MJ, serta Urea Plant (UP) dengan $1{,}32\times10^{4}$ MJ, sedangkan Steam Utility (SU) juga mencatat kontribusi signifikan sebesar $4{,}44\times10^{3}$ MJ. Hal ini menandakan bahwa ketergantungan terhadap energi berbasis fosil masih sangat tinggi, baik dalam proses produksi (khususnya pada Urea plant dan steam utility), maupun pada fase akhir siklus hidup produk.

Secara umum, hasil analisis ini menegaskan bahwa isu penting pada sistem produksi PT PIM tidak hanya terkonsentrasi pada unit proses inti (Ammonia Plant dan Urea Plant), tetapi juga sangat dipengaruhi oleh fase End of Life yang secara konsisten menjadi penyumbang terbesar pada hampir seluruh kategori dampak. Kondisi ini mengindikasikan bahwa strategi pengelolaan lingkungan tidak cukup hanya difokuskan pada peningkatan efisiensi dan pengendalian emisi di proses produksi, tetapi juga harus mencakup aspek hilir berupa pemanfaatan, distribusi, dan penggunaan produk di lapangan. Dengan demikian,

pendekatan manajemen lingkungan yang komprehensif perlu melibatkan efisiensi energi di unit utilitas (khususnya steam dan electricity utility), optimalisasi proses di pabrik Urea dan Amonia, serta strategi mitigasi dampak pada tahap akhir siklus hidup produk, misalnya melalui praktik pertanian berkelanjutan, pemanfaatan pupuk secara tepat dosis dan tepat guna, serta program pengelolaan residu untuk meminimalisasi pelepasan senyawa pencemar ke lingkungan.

Selama periode produksi Januari–Desember 2024, PT PIM telah melaksanakan berbagai program pengelolaan sumber daya sebagai bagian dari upaya sistematis untuk menurunkan potensi dampak lingkungan. Apabila dibandingkan dengan kajian LCA periode Januari–Desember 2022, jumlah program yang diimplementasikan menunjukkan peningkatan yang cukup signifikan, yaitu dari semula 39 program menjadi 54 program pada tahun 2024. Program-program tersebut mencakup lima kelompok utama, yaitu: pengurangan limbah B3 (7 program), pengurangan limbah pengelolaan sampah (11 program), efisiensi energi (15 program), penurunan emisi (18 program), serta efisiensi penggunaan air dan penurunan beban pencemar air (15 program). Pada kajian tahun 2023, implementasi 39 program yang terintegrasi dengan pendekatan LCA memberikan kontribusi penurunan dampak dengan kisaran efektivitas antara 0% hingga 11,87%. Peningkatan jumlah program pada tahun 2024 menunjukkan adanya eskalasi komitmen perusahaan terhadap pengelolaan lingkungan yang lebih proaktif. Namun demikian, efektivitas aktual dari program-program tersebut masih sangat dipengaruhi oleh faktor struktural, khususnya ketergantungan tinggi terhadap penggunaan gas alam (natural gas) sebagai bahan baku utama dalam proses produksi pupuk Urea dan Amonia. Hal ini menjadikan gas alam sebagai kontributor terbesar terhadap beberapa kategori dampak, seperti global warming potential dan abiotic depletion (fossil), sehingga ruang pengendalian dampak melalui program efisiensi teknis di luar konsumsi bahan baku masih relatif terbatas.

Selain penggunaan bahan baku, sejumlah unit proses inti seperti Ammonia Plant, Steam Utility, Urea Plant, dan Electricity Utility juga terus muncul sebagai hotspot utama yang menyumbang intensitas dampak pada isu penting. Fakta ini mengindikasikan bahwa meskipun jumlah program meningkat, fokus strategi mitigasi perlu diarahkan lebih spesifik ke unit-unit proses tersebut agar dapat memberikan pengaruh signifikan pada pengurangan dampak total. Dengan kata lain, kuantitas program belum tentu berbanding lurus dengan kualitas hasil mitigasi apabila tidak terintegrasi secara langsung dengan titik kritis penyebab dampak. Secara keseluruhan, rangkaian 54 program yang telah dijalankan PT PIM sepanjang tahun 2024 dapat dipandang sebagai langkah progresif yang menunjukkan arah peningkatan kinerja lingkungan. Namun, evaluasi lebih lanjut tetap diperlukan untuk memastikan bahwa intervensi program selaras dengan hotspot aktual yang diidentifikasi melalui kajian LCA, sehingga potensi penurunan dampak tidak hanya bersifat parsial, melainkan juga berkontribusi secara signifikan terhadap perbaikan performa lingkungan di tingkat sistem produksi. Rincian lengkap mengenai program-program tersebut disajikan pada **Tabel 18**.

Tabel 18. Program-program upaya penurunan kategori dampak

No	Nama Program	Kategori
1	Penggantian Sparepart Mycom (64-GC-2001)	Energi
		Emisi
2	Penggantian HTS Effluent Steam Generator (61-103-C2)	Energi
		Emisi
3	Waste Gas Release Final Desulfurizer (61-108-D) dalam Eskalasi Efisiensi Reaksi HTS dan LTS secara Bersamaan	Energi
		Emisi
4	Adjustment Steam Per Carbon Ratio dengan Treated Gas di Primary Reformer (61-101-B)	Energi
		Emisi
5	Peningkatan Kinerja Turbin Surface Condenser dengan Optimalisasi Adjustment Tekanan Vakum (62-EA-105)	Energi
		Emisi
6	Cleaning Convection Section Primary Reformer (61-101-B) menggunakan Metode CO2 Dry Ice Blasting	Energi
		Emisi
7	Penggantian Tube Superheater Package Boiler (63-BF-4002)	Energi
		Emisi
8	Pemanfaatan Cold Jet Non-Abrasif untuk Optimalisasi Turbine CO2 Compressor (62-GT-101) tanpa Menghasilkan Residu	Energi
		Emisi
9	Redesain dan Penyesuaian Sistem Pemakaian Steam SX 61-173-C dalam Meningkatkan Kinerja Proses	Energi
		Emisi
10	Pergantian Steam Trap Bocor di Pabrik Amonia	Energi
		Emisi
11	Pergantian Steam Trap Bocor di Pabrik Urea	Energi
		Emisi
12	Upgrade Woodward Control Air Compressor 61-101-J dan Feed Gas Compressor 61-102-J	Energi
		Emisi
13	Stop Slow Roll Pompa BFW 61-104-JA	Energi
		Emisi
14	Redesain Sistem Kontrol Tekanan Compressor 61-PV1104A untuk Peningkatan Efisiensi Produksi Urea	Energi
		Emisi
15	Perbaikan Cooling Tower For Ammonia (63-EF-2001) segmen E & F di Pabrik Utilitas-2	Energi
		Emisi
16	Efisiensi Turbin melalui Optimalisasi Surface Condenser 61-101-JTC	Energi
		Emisi
17	Optimalisasi Penggunaan Energi Listrik Di Water Intake Ketika Beban Puncak	Energi
18	PLTS On Grid	Energi
		Emisi
19	Dedusting Recovery System Debu Partikulat dan Amonia dengan Make Up Packing Ring	Emisi
20	Diversifikasi Debu Partikulat menjadi Pupuk Multinutrisi	Emisi
21	Pemanfaatan Blowdown Package Boiler-2 sebagai make up basin cooling water	Efisiensi Air
22	Pemanfaatan blowdown steam drum Ammonia-2 sebagai make up cooling tower Ammonia-2	

No	Nama Program	Kategori
23	Pemanfaatan Jacket Water Ammonia-2 sebagai make up cooling tower Utility-2	
24	Pemanfaatan Steam condensate Ammonia-2 untuk menurunkan konsumsi polish water di Deaerator pabrik Utility-2 (63-EG 4001)	
25	Pemanfaatan Air Backwash Sandfilter	
26	Peningkatan Efisiensi Polish Water melalui Penurunan Frekuensi Regenerasi Demin Plant Utility-1	
27	Pemanfaatan Process Condensate pabrik Ammonia-2 sebagai air umpan demin plant	
28	Pemanfaatan Process Condensate pabrik Urea-2 sebagai make up deaerator Utility-2	
29	Pemanfaatan Steam Condensate Urea-2 sebagai Make Up Water Deaerator Pabrik Utility-2	
30	Pemanfaatan Steam Condensate Pabrik Amonia 2 ke jacket water Secondary Reformer-2 (61-103-D)	
31	Peningkatan total flow regenerasi mixbed dan demin plant	
32	Pemanfaatan Condensate 53-EA-1001 sebagai air umpan Boiler	
33	Optimalisasi Kinerja Stripper (DA-101) Pabrik Urea-2 Untuk Menurunkan Kandungan Amonia	Program Pengelolaan Limbah Penurunan Beban Air Limbah
34	Optimalisasi hasil proses Urea melalui pupuk cair multinutrisi	
35	Limbah Regenerasi Kation Menjadi Pupuk Cair Alternatif	
36	PREMAN OK Peningkatan Frekuensi Predictive Maintenance Oli Kompresor Untuk Meningkatkan Masa Pakai Oli	Program Pengelolaan Limbah LB3
37	“Retur-CLAP” Rekayasa Temperatur Catalyst LTS Ammonia Plant	
38	Penggantian Katalis Primary Reformer Pabrik Amonia 2	
39	Penggantian Katalis Secondary Reformer Pabrik Amonia 2	
40	Optimalisasi Pengurangan Leakage Used Oil dengan Tube Stainless Steels Anti Korosif pada Kompressor Lube Oil 61 - 101	
41	M-TALSIK Metode Titran Analisa Laboratorium Menggunakan Sisa Sampel Caustik Soda (NaOH)	
42	Pengurangan Limbah Laboratorium dengan Pemanfaatan Reagen Sulfuric Acid (H2SO4) Sisa Quality Control	
43	Drum Bekas Ferticol Red C Sebagai Alat Transportasi Ekonomis	Program Pengelolaan Limbah LNB3
44	Pemanfaatan Drum Bekas Ferticol Red C Sebagai Sarana Kebersihan Masyarakat	
45	KARE Karung Reject	
46	Pemanfaatan Karung Pupuk Bekas Kerjasama dengan Bank Sampah USK	
47	Pemanfaatan Karung Pupuk Bekas Kerjasama dengan Pihak Ketiga (UD Gaul Plastik)	
48	Pemanfaatan Karung Pupuk Bekas Kerjasama dengan Pihak Ketiga (UD Gaul Plastik)	
49	Pemanfaatan Karung Pupuk Bekas Kerjasama dengan Pihak Ketiga (UD Gaul Plastik)	
50	“LiGaSi” Limbah Logam Besi	
51	MASKERAN Manajemen Sistem Kinerja Karyawan yang Terintegrasi secara Efisien dan Transparan	

No	Nama Program	Kategori
52	“SELF” Surat Elektronik Office	
53	Transformasi Digital untuk Mendukung Efektivitas Pelaporan Manajemen Perusahaan	

Berfokus pada 5 dampak dari isu penting yang sudah ditentukan pada Subbab 6.1 secara umum kontributor dampak berupa Natural gas dan catalyst banyak digunakan pada lingkup core khususnya paling besar yaitu unit proses Ammonia Plant dan juga steam utility meskipun tidak dominan. Sementara itu untuk katalis juga hanya digunakan pada unit Ammonia Plant. Beberapa kelompok program seperti energi dan Limbah B3 telah mempertimbangkan kontributor tersebut khususnya pada unit proses Ammonia Plant. Sebelum adanya program Program "Retur-CLAP" Rekayasa Temperatur Catalyst LTS Amonia Plant Catalyst LTS Amonia Plant memiliki lifetime selama 4 tahun. Timbulan limbah catalyst LTS mengalami penurunan sebesar 12,36 ton. Berdasarkan jumlah timbulannya, catalyst tergolong ke dalam limbah B3 dominan di PT. PIM. Hasil dari Program "Retur-CLAP" Rekayasa Temperatur Catalyst LTS Amonia Plant selama 9 tahun (2012-2021), timbulan catalyst bekas dapat diminimalisir sekaligus berkontribusi pada penurunan dampak tersebut. Terkait dampak yang berkaitan dengan penggunaan natural gas terdapat program energi yaitu Waste gas Release Final Desulfurizer, dimana program ini dapat menghasilkan penurunan kebutuhan steam untuk produksi ammonia, hal ini juga menurunkan kebutuhan gas alam dan gas rumah kaca yang dihasilkan dari proses pembangkitan steam di boiler. Selain itu masih ada beberapa program lain yang tujuannya dapat menurunkan potensi dampak.

1) Kategori program Bahan, Berbahaya, Beracun (B3)

Tabel 19. Integrasi Program B3 pada kategori dampak isu penting

Kategori Dampak	Satuan per unit fungsi	Sebelum	Setelah	% Penurunan
Potensi Hujan Asam	kg SO_2 eq	106,00	106,00	0,05%
Potensi Eutrofikasi	kg PO_4 eq	24,60	24,60	0,01%
Toxicity	kg 1,4-DB eq	388,00	385,00	0,88%
Global Warming Potential	kg CO2 eq	3.970,00	3.970,00	0,02%

Tabel 19 Hasil kajian menunjukkan bahwa program pengelolaan limbah B3, antara lain PREMAN OK, Retur-CLAP, M-TALSIK, Reuse H_2SO_4, serta penggantian katalis secara terintegrasi, telah memberikan kontribusi nyata dalam menurunkan potensi dampak lingkungan, dengan reduksi terbesar tercatat pada kategori Toksisitas sebesar 0,88%. Efektivitas program ini terutama dipengaruhi oleh berkurangnya kebutuhan katalis dan penurunan volume limbah LTS yang dihasilkan pada proses sintesis gas (syngas) dalam produksi Amonia. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa pengendalian dampak lingkungan tidak hanya dapat dicapai melalui pengelolaan limbah akhir, tetapi juga melalui optimalisasi material input pada proses produksi. Dengan demikian, program ini tidak semata-mata berfungsi sebagai upaya pengurangan limbah B3, tetapi juga sebagai strategi efisiensi sumber daya dan pengurangan beban lingkungan dari background process yang terkait dengan penggunaan katalis LTS. Jika implementasinya diperluas atau ditingkatkan intensitasnya, maka kontribusinya terhadap penurunan dampak toksisitas berpotensi menjadi

lebih signifikan di masa mendatang, sekaligus memperkuat kinerja lingkungan perusahaan secara menyeluruh.

2) Kategori program pengelolaan sampah

Tabel 20. Integrasi program pengelolaan sampah pada kategori dampak isu penting

Kategori Dampak	Satuan per unit fungsi	Sebelum	Setelah	% Penurunan
Potensi Hujan Asam	kg SO_2 eq	120,00	106,00	0,00%
Potensi Eutrofikasi	kg PO_4 eq	27,80	24,60	0,00%
Toxicity	kg 1,4-DB eq	386,00	385,00	0,02%
Global Warming Potential	kg CO_2 eq	3.970,00	3.970,00	0,00%
Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil)	MJ	26.500,00	26.500,00	0,00%

Berdasarkan pada **Tabel 20** terlihat bahwa program pengelolaan sampah seperti pemanfaatan drum bekas, Self, pemanfaatan karung pupuk, Kare, dan LiGasi hanya mampu menurunkan potensi dampak pada kategori **Toksisitas** dengan kontribusi relatif kecil, yaitu sekitar 0,02%. Penurunan ini terutama berkaitan dengan berkurangnya penggunaan serta pembuangan karung pupuk Urea dan logam besi ke lingkungan, sehingga dampak lingkungan yang ditimbulkan dari background data kedua material tersebut dapat ditekan.

Capaian ini juga menegaskan bahwa intensitas implementasi program NB3 belum cukup kuat untuk menghasilkan pengaruh signifikan terhadap isu penting. Program seperti Kare dan LiGasi, meskipun sudah berjalan, belum mampu menekan potensi dampak secara optimal. Dua alasan mendasar dapat diidentifikasi: (1) sifat limbah pengelolaan sampah memang memiliki kontribusi yang relatif kecil terhadap total nilai dampak dibandingkan dengan limbah B3 atau konsumsi energi fosil, dan (2) skala serta efektivitas implementasi program NB3 masih terbatas. Dengan demikian, walaupun program NB3 tetap penting dalam kerangka pengelolaan lingkungan perusahaan, kontribusinya terhadap pengurangan isu penting masih bersifat marginal. Hal ini menunjukkan bahwa strategi pengelolaan dampak lingkungan PT PIM ke depan sebaiknya tetap memprioritaskan program yang menyasar **hotspot utama**.

3) Kategori program efisiensi energi

Tabel 21. Integrasi program efisiensi energi pada kategori dampak isu penting

Kategori Dampak	Satuan per unit fungsi	Sebelum	Setelah	% Penurunan
Potensi Hujan Asam	kg SO_2 eq	106,00	106,00	0,08%
Potensi Eutrofikasi	kg PO_4 eq	24,60	24,60	0,12%
Toxicity	kg 1,4-DB eq	398,00	385,00	3,40%
Global Warming Potential	kg CO_2 eq	4.160,00	3.970,00	4,69%
Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil)	MJ	28.700,00	26.500,00	7,69%

Hasil integrasi program efisiensi energi yang ditunjukkan pada **Tabel 21** memperlihatkan bahwa upaya pengelolaan energi memiliki kontribusi yang lebih nyata

dibandingkan dengan program pengelolaan limbah B3 maupun pengelolaan sampah. Dari lima kategori dampak isu penting yang dianalisis, seluruhnya menunjukkan penurunan, meskipun dengan variasi tingkat kontribusi. Kategori dengan penurunan terbesar adalah **Potensi penurunan abiotik (fossil)** yang berkurang sebesar **7,69%**, menegaskan bahwa program efisiensi energi secara langsung menekan konsumsi sumber daya energi fosil yang menjadi salah satu hotspot utama dalam sistem produksi PT PIM. Dampak lain yang signifikan adalah **Global Warming Potential (GWP)** dengan penurunan **4,69%**, yang merefleksikan berkurangnya emisi CO_2 akibat efisiensi energi di berbagai unit proses, khususnya Ammonia Plant, Urea Plant, dan Steam Utility. Kontribusi pada kategori **Toksisitas** juga cukup jelas dengan penurunan **3,40%**, yang terkait dengan berkurangnya kebutuhan bahan bakar fosil dan emisi sampingannya yang berkontribusi terhadap toksisitas lingkungan. Sementara itu, penurunan pada **Eutrofikasi (0,12%)** dan **Potensi Hujan Asam (0,08%)** relatif kecil, namun tetap menunjukkan adanya pengaruh tidak langsung dari pengurangan emisi nitrogen oksida dan sulfur dioksida akibat efisiensi energi. Secara keseluruhan, program energi dapat dikatakan memiliki dampak mitigasi yang paling signifikan terhadap isu penting dibandingkan dengan program B3 maupun pengelolaan sampah. Hal ini logis mengingat sektor energi, terutama penggunaan gas alam sebagai bahan bakar dan bahan baku, merupakan kontributor dominan pada hampir semua kategori dampak. Dengan demikian, efisiensi energi tidak hanya berfungsi sebagai strategi penghematan biaya operasional, tetapi juga sebagai langkah strategis utama dalam menurunkan intensitas dampak lingkungan PT PIM. Namun demikian, pencapaian ini juga menunjukkan bahwa masih terdapat ruang perbaikan lebih lanjut. Penurunan dampak pada kategori GWP dan deplesi abiotik sudah cukup signifikan, tetapi untuk kategori lain seperti hujan asam dan eutrofikasi kontribusinya masih minimal. Oleh karena itu, implementasi program energi ke depan sebaiknya diperluas dengan pendekatan yang lebih integratif, misalnya melalui diversifikasi sumber energi ke arah energi terbarukan, optimasi sistem pemulihan panas (heat recovery system), serta pengurangan fugitive emission dari proses pembakaran.

4) Kategori program emisi

Tabel 22. Integrasi program emisi pada kategori dampak isu penting

Kategori Dampak	Satuan per unit fungsi	Sebelum	Setelah	% Penurunan
Potensi Hujan Asam	kg SO_2 eq	107,00	106,00	1,06%
Potensi Eutrofikasi	kg PO_4 eq	24,90	24,60	1,04%
Toxicity	kg 1,4-DB eq	398,00	385,00	3,42%
Global Warming Potential	kg CO_2 eq	4.160,00	3.970,00	4,60%
Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil)	MJ	28.700,00	26.500,00	7,68%

Berdasarkan pada **Tabel 22** dapat diketahui bahwa untuk program emisi sudah cukup optimal khususnya pada Global Warming Potential dan Potensi terjadinya penurunan abiotik (fossil). Program-program tersebut dapat menurunkan jumlah gas alam yang digunakan saat startup pabrik Amonia dan menurunkan jumlah gas alam untuk pembangkitan steam, sehingga dampak lingkungan yang diakibatkan oleh emisi penggunaan gas alam tersebut

dapat diturunkan Upaya implementasi program ini berpotensi ditingkatkan intensitasnya, sehingga pada masa yang akan datang dapat berkontribusi pada penurunan potensi dampak tersebut secara lebih signifikan.

5) Kategori program efisiensi air dan penurunan beban pencemar air.

Tabel 23. Integrasi program efisiensi air dan penurunan beban pencemar air pada kategori dampak isu penting

Kategori Dampak	Satuan per unit fungsi	Sebelum	Setelah	% Penurunan
Potensi Hujan Asam	kg SO_2 eq	106,00	106,00	0,02%
Potensi Eutrofikasi	kg PO_4 eq	24,60	24,60	0,18%
Toxicity	kg 1,4-DB eq	389,00	385,00	1,20%
Global Warming Potential	kg CO_2 eq	3.970,00	3.970,00	0,12%
Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil)	MJ	26.500,00	26.500,00	0,14%

Berdasarkan pada Tabel 23 Program efisiensi air yang dijalankan di pabrik, seperti pemanfaatan blowdown, steam condensate, process condensate, serta air hasil backwash, berperan penting dalam menurunkan kebutuhan air baku dari sungai yang sebelumnya digunakan pada sistem filter water dan polish water system. Contohnya, pemanfaatan blowdown Package Boiler-2 sebagai make up basin cooling water atau steam condensate Ammonia-2 untuk menurunkan konsumsi polish water di Deaerator Utility-2 secara langsung mengurangi konsumsi polish water baru, sehingga berdampak pada penurunan kebutuhan bahan kimia dalam proses demineralisasi. Selain itu, program peningkatan efisiensi Polish Water melalui penurunan frekuensi regenerasi Demin Plant Utility-1 dan peningkatan total flow regenerasi mixbed juga mendorong berkurangnya limbah regenerasi serta penggunaan chemical regenerant. Efek gabungan dari program ini tampak pada penurunan kategori dampak ekotoksisitas air tawardan hujan asam yang lebih signifikan dibandingkan kategori lain, sebagaimana tergambar pada Tabel 23.

Upaya pemanfaatan kondensat dari Ammonia-2 dan Urea-2 (misalnya untuk make up deaerator Utility-2 dan air umpan boiler) berkontribusi pada peningkatan sirkulasi internal air sehingga mengurangi ketergantungan terhadap pasokan air baru. Hal ini tercermin dalam menurunnya nilai Global Warming Potential dan penurunan abiotik (fossil), meskipun dalam skala yang masih kecil (<0,2%). Dengan demikian, meskipun persentase penurunan dampak secara keseluruhan belum terlalu signifikan (0,02%–1,20%), program-program tersebut menunjukkan arah perbaikan yang jelas. Dampak terbesar dirasakan pada kategori toxicity dan ekotoksisitas air karena pengurangan chemical dari proses pengolahan air, serta pada kategori hujan asam yang berhubungan dengan berkurangnya emisi akibat penurunan konsumsi energi dan bahan kimia di sistem utilitas.

6.2. Evaluasi Pemeriksaan Kelengkapan, Analisis Sensitivitas, Analisis Ketidakpastian, dan Konsistensi

6.2.1. Pemeriksaan kelengkapan

Kelengkapan data inventori yang disediakan oleh PT PIM dalam mendukung pelaksanaan kajian LCA dapat dikategorikan layak dan memenuhi standar kebutuhan studi. Proses verifikasi kelengkapan dilakukan dengan mengevaluasi kesesuaian data terhadap persyaratan yang telah ditetapkan pada tahap penentuan tujuan dan ruang lingkup. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa pada Bab 4, proporsi data yang digunakan didominasi oleh data

primer sebesar 95,48%, sementara kontribusi data sekunder hanya mencapai 4,52%. Kondisi ini menggambarkan bahwa ketersediaan data primer telah melampaui batas minimal 50%, sehingga dinyatakan cukup untuk menjamin validitas pelaksanaan kajian LCA sebagaimana tercantum dalam **Tabel 11**.

Dalam studi ini, pendekatan yang diutamakan adalah penggunaan data primer karena dianggap lebih representatif dalam menggambarkan kondisi aktual proses di lapangan. Dukungan data primer yang komprehensif ini membuat isu-isu penting yang teridentifikasi dalam analisis LCA menjadi lebih akurat serta dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Seluruh informasi yang diperlukan dari setiap tahapan sistem produk juga telah berhasil dikumpulkan dan dimanfaatkan untuk kepentingan interpretasi, dengan pengecualian data yang termasuk dalam kategori cut-off. Meskipun demikian, kelengkapan data inventori yang ada tetap perlu diperkuat melalui pelaksanaan analisis sensitivitas dan analisis ketidakpastian guna menghasilkan kesimpulan yang lebih solid. Analisis sensitivitas dilaksanakan dengan cara melakukan variasi terhadap parameter input pada rentang nilai minimum hingga maksimum, yang kemudian diuji menggunakan salah satu program aplikasi yang tersedia di PT PIM. Upaya ini tidak hanya bertujuan untuk menguji konsistensi hasil, tetapi juga untuk memberikan gambaran mengenai seberapa besar pengaruh perubahan input terhadap hasil akhir kajian LCA.

Apabila ditinjau berdasarkan produk yang dihasilkan, terlihat bahwa produk Amonia memberikan kontribusi dampak lingkungan yang lebih besar dibandingkan produk Urea pada beberapa kategori, yakni ekotoksisitas air tawar, ekotoksisitas terhadap manusia, potensi hujan asam, serta potensi penurunan abiotik (fossil). Sementara itu, pada kategori potensi pemanasan global (GWP), produk Urea justru memberikan kontribusi yang lebih tinggi dibandingkan Amonia (**Tabel 16).** Analisis ketidakpastian kemudian diarahkan pada faktor-faktor yang paling dominan memengaruhi isu penting. Dari hasil kajian, **penggunaan natural gas** dan **katalis** teridentifikasi sebagai kontributor utama, khususnya di unit proses **Ammonia Plant**. Hal ini dapat dijelaskan melalui dua alasan utama:

1. **Natural Gas** digunakan sebagai bahan baku utama sekaligus sumber energi. Pada proses reforming, natural gas dikonsumsi dalam jumlah besar, sehingga kontribusinya terhadap dampak **abiotic depletion (fossil)** menjadi signifikan. Selain itu, pembakaran natural gas menghasilkan emisi gas buang yang berdampak pada **GWP** dan **potensi hujan asam**. Besarnya konsumsi energi berbasis fosil ini menjadikan natural gas sebagai salah satu hotspot terbesar dalam rantai proses produksi.
2. **Katalis** (khususnya katalis LTS pada proses sintesis Amonia) juga memberikan kontribusi penting. Hal ini tidak hanya disebabkan oleh jumlah penggunaannya yang besar, tetapi juga karena karakteristik produksinya yang intensif energi serta mengandung logam-logam berat. Dalam perspektif LCA, rantai pasok katalis menyumbang dampak yang signifikan pada **ekotoksisitas air tawar** (15,24%), **human toxicity** (7,11%), serta **potensi hujan asam** (8,08%). Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 16. Dengan kata lain, meskipun katalis berfungsi sebagai material pendukung reaksi, jejak lingkungannya cukup dominan akibat kompleksitas proses ekstraksi dan pemurnian logam penyusunnya.

Program mitigasi yang dijalankan PT PIM kemudian difokuskan pada pengelolaan kedua faktor tersebut. Dari sekian program, **Program B3** terbukti memberikan penurunan dampak terbesar pada isu penting, yakni sebesar **0,88%** (Tabel 19). Di sisi lain, kelompok program efisiensi energi juga menunjukkan kontribusi cukup signifikan, dengan penurunan terbesar mencapai **7,68% pada kategori Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil) (Tabel 22)**, yang salah satunya erat kaitannya dengan Optimalisasi Turbine, Surface Condenser, hingga energi. Lebih jauh, pengujian sensitivitas dilakukan melalui simulasi skenario unggulan PT PIM, yaitu **"Multinutrisi" (**Diversifikasi Debu Partikulat menjadi Pupuk Multinutrisi**)**. Program ini bertujuan untuk mengonversi residu proses produksi menjadi produk bernilai guna melalui pemanfaatan larutan hasil scrubber dan kondensat, yang kemudian diformulasikan bersama limbah hasil regenerasi kation dari unit utilitas. Hal ini juga selaras dengan hasil kajian Life Cycle Assessment (LCA) tahun 2022, yang menempatkan unit Urea Plant sebagai hotspot terhadap kategori **Freshwater Ecotoxicity**, sehingga diversifikasi residu menjadi pupuk cair tidak hanya meningkatkan produktivitas masyarakat namun juga mereduksi beban lingkungan.

6.2.2. Analisis sensitivitas

Analisis sensitivitas dalam kajian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari variasi data terhadap isu penting yang teridentifikasi pada **Sub-bab 6.1.** Hasil sensitivitas kemudian dapat dijadikan sebagai dasar untuk rekomendasi pengeluaran atau penyertaan atas unit proses dan input-output baru yang berasal dari program-program di PT PIM dengan berdasarkan kriteria cut-off dalam lingkup kajian.

Prosedur analisis sensitivitas dilakukan dengan cara:

1. Membandingkan nilai dampak isu penting dari data sebelum integrasi program dan setelah integrasi keseluruhan program.
2. Mengasumsikan data untuk skenario dari salah satu program unggulan yang berpotensi dapat menurunkan potensi dampak dari isu penting.

a. Pemeriksaan sensitivitas berdasarkan sebelum dan setelah integrasi keseluruhan program

Tabel 24. Pemeriksaan Sensitivitas Sebelum dan Setelah Program

Parameter	Potensi Hujan Asam	Potensi Eutrofikasi	Toxicity	Global Warming Potential	Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil)
	kg SO_2 eq	kg PO_4--- eq	kg 1,4-DB eq	kg CO_2 eq	MJ
Sebelum Program	121,37	28,07	407,91	4.171,88	28.771,20
Setelah Program	105,72	24,60	384,62	3.969,31	26.508,40
Deviasi	-15,65	-3,47	-23,29	-202,57	-2.262,80
Deviasi, %	-12,89%	-12,36%	-5,71%	-4,86%	-7,86%
Sensitivitas	12,89	12,36	5,71	4,86	7,68

Pada **Tabel 24** dapat diketahui bahwa penerapan program menghasilkan perubahan yang cukup signifikan terhadap berbagai kategori dampak lingkungan. Kategori potensi hujan asam menunjukkan penurunan terbesar, dari 121,37 kg SO_2 eq sebelum program menjadi

105,72 kg SO_2 eq setelah program atau mengalami reduksi sebesar 12,89%. Hal ini mencerminkan efektivitas program dalam menekan emisi senyawa prekursor hujan asam, seperti sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x), yang berperan penting dalam pembentukan deposisi asam. Potensi eutrofikasi juga menunjukkan respons yang tinggi terhadap program dengan penurunan dari 28,07 menjadi 24,60 kg PO_4^{3-} eq atau setara dengan 12,36%. Hasil ini mengindikasikan adanya perbaikan dalam pengendalian pelepasan senyawa nutrien, khususnya nitrogen dan fosfor, yang berkontribusi terhadap pencemaran perairan. Selanjutnya, kategori toksisitas mengalami penurunan dari 407,91 menjadi 384,62 kg 1,4-DB eq, atau sekitar 5,71%. Persentase penurunan ini lebih rendah dibandingkan dengan hujan asam dan eutrofikasi, sehingga dapat disimpulkan bahwa kontribusi program terhadap penurunan emisi zat berbahaya belum menjadi fokus utama, meskipun secara absolut nilai reduksi tetap signifikan.

Pada kategori potensi pemanasan global, terjadi penurunan dari 4.171,88 menjadi 3.969,31 kg CO_2 eq atau sekitar 4,86%. Persentase reduksi ini merupakan yang paling rendah dibandingkan kategori lainnya, sehingga dapat dikatakan bahwa dampak mitigasi terhadap emisi gas rumah kaca masih relatif terbatas. Sementara itu, potensi penurunan abiotik yang berkaitan dengan konsumsi energi fosil berkurang dari 28.771,20 MJ menjadi 26.508,40 MJ, dengan persentase penurunan sebesar 7,86%. Hal ini menunjukkan bahwa program telah memberikan kontribusi positif terhadap efisiensi pemakaian sumber daya energi serta mendukung upaya konservasi energi. Secara keseluruhan, hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa kategori yang paling responsif terhadap program adalah potensi hujan asam dan potensi eutrofikasi, diikuti oleh penurunan konsumsi energi fosil. Sementara itu, kategori toksisitas dan potensi pemanasan global menunjukkan tingkat sensitivitas yang lebih rendah. Dengan demikian, program yang diterapkan dapat dinilai berhasil dalam menekan dampak lingkungan pada beberapa kategori utama, meskipun masih diperlukan strategi tambahan yang lebih terfokus untuk meningkatkan efektivitas pengurangan emisi gas rumah kaca dan zat toksik agar manfaat lingkungan yang dicapai lebih komprehensif.

b. Pemeriksaan sensitivitas atas program Pupuk Multinutrisi.

Tabel 25. Analisis Sensitivitas Untuk program Pupuk Multinutrisi

Parameter	Potensi Hujan Asam	Potensi Eutrofikasi	Toxicity	Global Warming Potential	Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil)
	kg SO_2 eq	kg PO_4--- eq	kg 1,4-DB eq	kg CO_2 eq	MJ
Sebelum Program	110,36	25,76	393,51	4.141,29	27.477,00
Setelah Program (5% pupuk tergantikan)	105,72	24,60	384,62	3.969,31	26.508,40
Deviasi	4,64	1,16	8,89	171,98	968,60
Deviasi, %	-4,20	-4,50	-2,26	-4,15	-3,53
Sensitivitas	4,20%	4,50%	2,26%	4,15%	3,53%

Penerapan program pupuk multinutrisi dengan skenario **5% pupuk tergantikan** menunjukkan adanya penurunan dampak lingkungan pada semua kategori yang dianalisis. Persentase deviasi terbesar terdapat pada **potensi eutrofikasi**

(–4,50%)dan **potensi hujan asam (–4,20%)**, diikuti oleh **Global Warming Potential (–4,15%)**, yang mengindikasikan efektivitas program dalam mengurangi emisi penyebab pencemaran udara dan perairan. Sementara itu, penurunan pada **penurunan abiotik (fossil)** sebesar –3,53% dan **toxicity** sebesar –2,26% relatif lebih kecil, namun tetap menunjukkan arah perbaikan. Nilai sensitivitas yang berkisar antara 2,26–4,50% memperlihatkan bahwa meskipun dampaknya tidak sangat besar, program ini tetap berkontribusi positif terhadap pengurangan emisi dan penggunaan sumber daya. Secara keseluruhan, hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa penerapan pupuk multinutrisi dapat mengurangi dampak lingkungan, terutama pada kategori eutrofikasi, hujan asam, dan emisi karbon, meskipun skalanya masih terbatas pada tingkat substitusi 5%.Khususnya pada kategori dampak yang paling relevan berdasarkan isu penting. Hasil analisis ketidakpastian Monte Carlo Terlampir pada Lampiran 2.

6.2.3. Analisis ketidakpastian

Analisis ketidakpastian dilakukan menggunakan simulasi Monte Carlo pada perangkat lunak OpenLCA 2.5 dengan total 1000 iterasi. Rentang ketidakpastian setiap parameter input ditetapkan terutama melalui distribusi lognormal, yang ditentukan oleh koefisien variasi (kuadrat dari deviasi standar geometris). Informasi kualitas data yang tercantum pada Tabel 4 digunakan sebagai dasar dalam penentuan parameter tersebut dan dikombinasikan dengan ketidakpastian dari proses latar belakang yang berasal dari database Ecoinvent v3.8. Hasil analisis ketidakpastian melalui simulasi Monte Carlo sebanyak 1000 iterasi disajikan pada Tabel 26.

Tabel 26. Analisis ketidakpastian dengan simulasi Monte-Carlo

Kategori Dampak	Satuan per unit fungsi	Parameter	Intensitas Program Multinutrisi		
			0%	5%	50%
Potensi Hujan Asam	kg SO2 eq	Rata-Rata	1,06E+02	1,03E+02	5,93E+01
		Standar Deviasi	1,11E+00	1,03E+00	5,94E+02
Potensi Eutrofikasi	kg PO4 eq	Rata-Rata	2,46E+01	2,34E+01	1,30E+01
		Standar Deviasi	2,70E-01	2,67E-01	2,66E-01
Toxicity	kg 1,4-DB eq	Rata-Rata	3,85E+02	3,52E+02	2,96E+02
		Standar Deviasi	1,33E+02	1,36E+02	1,13E+02
Global Warming Potential	kg CO2 eq	Rata-Rata	3,97E+03	3,79E+03	2,25E+03
		Standar Deviasi	2,95E+01	2,69E+01	1,88E+01
Potensi Terjadi Penurunan Abiotik (Fossil)	MJ	Rata-Rata	2,65E+04	2,54E+04	1,68E+04
		Standar Deviasi	1,11E+03	1,05E+03	5,94E+02

Hasil analisis ketidakpastian menggunakan simulasi Monte Carlo menunjukkan bahwa penerapan program multinutrisi memberikan pengaruh yang konsisten terhadap penurunan berbagai kategori dampak lingkungan. Secara umum, peningkatan intensitas program dari 0% hingga 50% menghasilkan penurunan nilai rata-rata pada seluruh kategori

dampak, yang mengindikasikan adanya efisiensi lingkungan yang signifikan seiring dengan pelaksanaan program.Pada kategori **potensi hujan asam (acidification potential)**, nilai rata-rata menurun dari $1{,}06\times10^{2}$ menjadi $5{,}93\times10^{1}$ kg SO_2 eq, menunjukkan penurunan dampak sebesar hampir 44%. Namun, nilai standar deviasi meningkat secara signifikan pada skenario 50%, yang mengindikasikan adanya ketidakpastian tinggi terhadap estimasi dampak ini. Peningkatan variasi tersebut dapat disebabkan oleh sensitivitas model terhadap emisi sulfur atau perbedaan kontribusi energi dalam sistem yang dianalisis.

Kategori **potensi eutrofikasi (eutrophication potential)** menunjukkan tren penurunan yang stabil, dari $2{,}46\times10^{1}$ menjadi $1{,}30\times10^{1}$ kg PO_4 eq, dengan standar deviasi yang relatif konstan (~$2{,}6\times10^{-1}$). Hal ini mengindikasikan bahwa hasil simulasi untuk kategori ini cukup stabil dan dapat diandalkan. Dampak tersebut menurun secara proporsional dengan meningkatnya intensitas program, yang menandakan bahwa penerapan multinutrisi berperan dalam mengurangi pelepasan nutrien ke lingkungan perairan. Pada kategori **toksisitas (toxicity)**, nilai rata-rata menurun dari $3{,}85\times10^{2}$ menjadi $2{,}96\times10^{2}$ kg 1,4-DB eq, dengan standar deviasi yang juga menurun dari $1{,}33\times10^{2}$ menjadi $1{,}13\times10^{2}$. Penurunan ini menunjukkan adanya peningkatan kestabilan hasil dan efektivitas program dalam menekan potensi dampak toksik terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Selanjutnya, pada kategori **potensi pemanasan global (Global Warming Potential, GWP)**, nilai rata-rata menurun dari $3{,}97\times10^{3}$ menjadi $2{,}25\times10^{3}$ kg CO_2 eq, disertai dengan penurunan standar deviasi dari $2{,}95\times10^{1}$ menjadi $1{,}88\times10^{1}$. Hasil ini menegaskan bahwa penerapan program multinutrisi berkontribusi langsung terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca, dengan tingkat ketidakpastian yang relatif rendah dan hasil yang konsisten. Terakhir, kategori **potensi penurunan sumber daya abiotik (Abiotic Depletion Potential – Fossil)** mengalami penurunan yang signifikan dari $2{,}65\times10^{4}$ menjadi $1{,}68\times10^{4}$ MJ. Penurunan ini disertai dengan menurunnya standar deviasi dari $1{,}11\times10^{3}$ menjadi $5{,}94\times10^{2}$, yang menunjukkan bahwa model memiliki kestabilan yang baik dalam memprediksi konsumsi energi berbasis fosil. Secara keseluruhan, hasil simulasi Monte Carlo memperlihatkan bahwa peningkatan intensitas program multinutrisi memberikan efek penurunan dampak lingkungan yang konsisten di seluruh kategori. Kecuali pada kategori hujan asam yang menunjukkan peningkatan ketidakpastian, seluruh kategori lainnya menunjukkan tingkat variabilitas yang relatif rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa model memiliki reliabilitas yang tinggi dan bahwa penerapan program multinutrisi dapat dipandang sebagai strategi yang efektif dan stabil dalam mengurangi beban lingkungan secara keseluruhan.

6.2.4. Pemeriksaan konsistensi

Konsistensi data inventarisasi dalam kajian LCA merupakan aspek yang penting untuk memastikan bahwa data yang digunakan mampu mewakili kondisi nyata proses produksi. Pada kajian ini, tingkat konsistensi data inventarisasi produksi pupuk Urea dan Amonia di PT PIM pada tahun 2024 dapat dinilai cukup memadai. Hal ini ditunjukkan oleh beberapa aspek pemeriksaan, antara lain sumber data, akurasi, cakupan waktu, cakupan teknologi, cakupan geografis, serta kesesuaian metodologi dengan standar internasional yang berlaku. **Tabel 26** berikut merangkum hasil analisis konsistensi dalam kajian ini.

Tabel 27. Hasil analisis konsistensi

Pemeriksaan	Hasil
Sumber data	Sebesar 97,40% data berasal langsung dari pengukuran dan perhitungan internal PT PIM, sedangkan 2,60% sisanya bersumber dari jurnal penelitian yang relevan. Proporsi ini menunjukkan bahwa sebagian besar data yang digunakan merupakan data primer yang representatif terhadap kondisi nyata perusahaan, sehingga memperkuat validitas hasil kajian.

Pemeriksaan	Hasil
Akurasi data	seluruh data produk memiliki tingkat akurasi yang sama karena bersumber dari data internal yang sudah tervalidasi. Hal ini memastikan bahwa tidak terdapat perbedaan kualitas data antar-proses, sehingga hasil analisis dapat dibandingkan secara konsisten.
Umur data/Cakupan Waktu	seluruh data primer berasal dari data aktual perusahaan untuk periode Januari hingga Desember 2024. Dengan demikian, data yang digunakan sepenuhnya menggambarkan kondisi terkini dari proses produksi, tanpa adanya ketergantungan pada data lama yang mungkin tidak relevan.
Cakupan Teknologi	seluruh data yang digunakan merupakan data aktual yang menggambarkan teknologi produksi yang benar-benar diterapkan di PT PIM pada tahun 2024. Hal ini penting untuk memastikan bahwa hasil LCA sesuai dengan teknologi operasional yang digunakan saat ini, bukan asumsi teknologi lain.
Cakupan Geografis	seluruh data primer diperoleh dari lokasi aktual perusahaan, yaitu PT PIM, sehingga hasil kajian sepenuhnya merefleksikan kondisi geografis setempat, baik dari segi ketersediaan sumber daya, kondisi lingkungan, maupun faktor-faktor eksternal yang memengaruhi produksi.
Metodologi	kajian ini telah dilakukan dengan mengacu pada standar SNI ISO 14040 dan SNI ISO 14044, yang merupakan pedoman internasional dalam pelaksanaan analisis siklus hidup. Hal ini memastikan bahwa prosedur, tahapan, dan metode yang digunakan memiliki kesesuaian dengan prinsip ilmiah dan dapat diterima secara internasional.
Tujuan dari lingkup, tujuan dari penerapan, Batasan sistem, sistem produk	kajian ini ditujukan untuk memberikan informasi mengenai nilai beban dan dampak lingkungan dari produksi pupuk Urea dan Amonia di PT PIM selama siklus hidupnya. Batasan sistem yang ditetapkan telah disesuaikan dengan kondisi aktual perusahaan, sehingga mampu menggambarkan input dan output nyata dari proses produksi yang berlangsung.
Penentuan unit fungsi	kajian ini konsisten menggunakan unit fungsi yang sama pada seluruh tahapan, yaitu setiap ton produk pupuk Urea dan Amonia. Konsistensi dalam unit fungsi ini penting untuk menjaga keselarasan perbandingan dan interpretasi hasil.

BAB 7. KESIMPULAN, KETERBATASAN, DAN REKOMENDASI

7.1. Kesimpulan

a. Penyusunan laporan penilaian daur hidup PT PIM Tahun 2025 telah disusun berdasarkan data inventory produksi dalam rentang Januari-Desember 2024. Unit fungsi yang digunakan adalah 1 ton produk Urea dan Amonia. Lingkup kajian adalah cradle to grave yang meliputi lingkup upstream, core dan downstream.
b. Produksi Urea dan Amonia memiliki kontribusi dampak lingkungan yang cukup besar, terutama pada kategori Global Warming Potential (3.970 kg CO_2 eq), Penggunaan Energi (29.300 MJ), serta Potensi Penurunan Abiotik (26.500 MJ). Hal ini menunjukkan bahwa proses produksi dan penggunaan produk sangat bergantung pada energi fosil serta menyumbang signifikan terhadap emisi gas rumah kaca. Tahap downstream (penggunaan produk oleh konsumen sebagai pupuk di area lahan dan pembangkitan energi) menjadi penyumbang terbesar pada hampir semua kategori dampak, terutama pada Global Warming Potential, Hujan Asam, Eutrofikasi, dan Land Use Change. Hal ini menandakan bahwa meskipun tahap produksi (core) penting, justru pemakaian produklah yang menjadi titik kritis dampak lingkungan. Kategori lain seperti Potensi Penipisan Ozon (1,80E-04 kg CFC-11 eq), Photochemical Oxidant (0,80 kg C_2H_4 eq), serta Karsinogenik (4,34E-05 CTUh) relatif kecil dibandingkan dengan kategori energi dan emisi karbon. Namun, tetap perlu diperhatikan karena dapat memberikan dampak pada skala lokal maupun kesehatan manusia. Selain itu, pada aspek Water Footprint (61,2 m^3 water eq) dan Land Use Change (2.010 kg C deficit) juga menunjukkan adanya tekanan pada sumber daya air dan lahan, sehingga produksi Urea dan Amonia tidak hanya berdampak pada emisi atmosfer tetapi juga pada ketersediaan sumber daya alam lain.
c. Jejak air dari 1 ton produk Urea dan Amonia menunjukkan bahwa tahap downstream memberikan kontribusi paling besar pada sebagian besar kategori dampak, terutama pada jejak kelangkaan air (35,2 m^3 water eq), eutrofikasi air laut (14,5 kg N eq), asidifikasi air tawar (104 kg SO_2 eq), serta toksisitas terhadap manusia dan ekotoksisitas. Total jejak air tercatat cukup signifikan, dengan dominasi dampak berasal dari penggunaan produk dibandingkan proses produksi. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa pemakaian Urea dan Amonia oleh konsumen menimbulkan tekanan tinggi terhadap sumber daya air dan kualitas ekosistem perairan. Oleh karena itu, pengelolaan berkelanjutan perlu difokuskan pada pengendalian emisi dan residu pada tahap pemakaian produk untuk mengurangi dampak terhadap air dan lingkungan perairan.
d. Hasil analisis menunjukkan bahwa kontribusi dampak lingkungan paling dominan pada kategori potensi penurunan abiotik (fossil) berasal dari unit Ammonia Plant. Hal ini terutama disebabkan oleh tingginya konsumsi natural gas pada proses sintesis Amonia yang berfungsi sebagai bahan baku sekaligus sumber energi. Selain itu, Urea Plant juga berkontribusi pada isu ini karena proses produksinya masih sangat bergantung pada natural gas, meskipun nilainya lebih rendah dibanding Ammonia Plant.
e. Apabila ditinjau secara menyeluruh pada kategori isu penting lainnya yaitu ekotoksisitas air tawar, toxicity, Global Warming Potential (GWP), asidifikasi, dan penurunan abiotik (fossil) dapat disimpulkan bahwa Ammonia Plantmerupakan hotspot utama. Faktor pemicunya adalah penggunaan natural gas yang menghasilkan emisi langsung

berupa CO_2, SO_2, NO_x, dan NH_3, serta penggunaan katalis yang berdampak melalui data background upstream.

f. Secara spesifik, kontribusi kategori Global Warming Potential (GWP) terbesar bersumber dari Ammonia Plant, diikuti oleh Urea Plant dan tahap penggunaan Urea (Urea usage). Dampak GWP ini terutama berasal dari pelepasan CO_2akibat pembakaran dan reforming natural gas, serta kontribusi tambahan dari aktivitas transportasi produk Amonia dan Urea meskipun nilainya relatif kecil. Untuk kategori ekotoksisitas air tawar dan toxicity, hotspot kembali ditemukan pada Ammonia Plant dan Urea Plant, yang erat kaitannya dengan input natural gas dan katalis. Sementara itu, pada kategori asidifikasi (acidification potential), sumber dominan adalah pelepasan SO_2, NH_3, dan NO_x dari unit proses yang sama, terutama saat pembakaran energi maupun reaksi kimia dalam produksi Amonia dan Urea.
g. Unit Ammonia Plant merupakan kontributor terbesar pada hampir semua kategori dampak dari lingkup inti produksi, sedangkan Urea Plant memberikan kontribusi tambahan yang signifikan terutama pada GWP, ekotoksisitas, toxicity, dan asidifikasi. Faktor kunci yang mendasari hotspot ini adalah tingginya ketergantungan pada natural gas sebagai feedstock dan energi, serta kontribusi katalis sebagai material kritis yang berdampak signifikan dalam analisis upstream.
h. Sensitivitas model menunjukkan respons yang proporsional antara peningkatan intensitas program dan besarnya penurunan dampak lingkungan. Semakin besar tingkat penerapan program, semakin signifikan pula pengurangan dampak yang dihasilkan. Ketidakpastian hasil relatif rendah pada sebagian besar kategori, yang mengindikasikan kestabilan model dan reliabilitas hasil simulasi.

7.2. Keterbatasan

Hasil kajian LCA yang disajikan dalam penelitian ini sepenuhnya didasarkan pada tujuan, sasaran, dan lingkup yang telah ditentukan sebelumnya. Kajian dilakukan dengan menggunakan kombinasi data primer yang diperoleh langsung dari PT Pupuk Iskandar Muda (PIM) untuk periode Januari–Desember 2024 dan data sekunder yang bersumber dari database komersial (Ecoinvent v3.8), jurnal penelitian, serta database nasional yang relevan. Meskipun kualitas data dinilai cukup representatif, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan agar hasil kajian dapat dipahami secara proporsional.

1. Konsistensi Data

Tingkat konsistensi data dalam kajian ini sudah cukup memadai, ditunjukkan oleh dominasi data primer sebesar 97,40% yang berasal dari hasil pengukuran dan perhitungan internal PT PIM. Sisanya, 2,60%, menggunakan data sekunder dari literatur dan jurnal ilmiah untuk melengkapi kekosongan data. Data yang digunakan memiliki cakupan waktu aktual tahun 2024, teknologi yang sesuai dengan kondisi operasional perusahaan, serta cakupan geografis yang terbatas pada lokasi produksi PT PIM. Kajian ini juga mengacu pada metodologi SNI ISO 14040 dan SNI ISO 14044, sehingga secara prosedural konsisten dengan standar internasional. Unit fungsi yang digunakan juga konsisten, yaitu satu ton produk pupuk Urea atau Amonia, sehingga memungkinkan perbandingan antar kategori dampak dilakukan secara setara.

2. Asumsi Sistem Produksi

Seluruh sistem produksi dalam kajian ini diasumsikan beroperasi dalam kondisi steady state atau stabil. Dengan demikian, variasi kecil atau fluktuasi jangka pendek yang tidak

memberikan pengaruh signifikan terhadap hasil akhir tidak diperhitungkan. Asumsi ini umum digunakan dalam kajian LCA untuk menyederhanakan representasi proses industri yang kompleks.

3. Keterbatasan Data dan Analisis Sensitivitas

Beberapa data dalam analisis sensitivitas masih menggunakan data generik dari database karena ketiadaan data primer yang memadai. Hal ini menimbulkan ketidakpastian tertentu, meskipun telah dilakukan pengujian melalui analisis sensitivitas dan analisis ketidakpastian. Perhitungan ketidakpastian dilakukan dengan menggunakan metode simulasi Monte Carlo pada software OpenLCA v2.5, di mana seluruh distribusi ketidakpastian yang terkait dengan arus, parameter, dan faktor karakterisasi telah diperhitungkan dalam model. Dengan cara ini, tingkat reliabilitas hasil dapat diperkirakan secara kuantitatif.

4. Batasan Metodologis

Hasil LCA ini terbatas pada kategori dampak yang dipilih, yakni potensi pemanasan global, potensi hujan asam, potensi eutrofikasi, toksisitas, serta potensi penurunan abiotik. Dampak lingkungan lain seperti degradasi keanekaragaman hayati, perubahan penggunaan lahan, serta emisi partikel halus tidak dianalisis lebih lanjut karena keterbatasan ruang lingkup dan ketersediaan data. Selain itu, kajian ini tidak mempertimbangkan aspek sosial dan ekonomi yang juga dapat relevan dalam penilaian keberlanjutan secara menyeluruh.

5. Implikasi Keterbatasan

Dengan adanya keterbatasan ini, hasil kajian sebaiknya dipahami sebagai representasi kondisi produksi pupuk Urea dan Amonia di PT PIM berdasarkan data terbaik yang tersedia, namun bukan sebagai nilai absolut yang sepenuhnya bebas dari ketidakpastian. Hasil kajian dapat digunakan sebagai dasar untuk pengambilan keputusan internal, perbaikan efisiensi proses, serta perumusan strategi pengurangan dampak lingkungan, tetapi tetap memerlukan kajian lanjutan untuk melengkapi aspek yang belum tercakup.

7.3. Rekomendasi

Berdasarkan hasil analisis hotspot, diketahui bahwa kontribusi dampak terbesar berasal dari lingkup downstream. Hanya saja intervensi penurunan dampak yang dapat dilaksanakan oleh PT PIM lebih tepatnya ada di lingkup Cradle (upstream) dan Core (on-site production). Unit proses yang paling dominan adalah Ammonia Plant, disusul oleh Urea Plant, serta unit pendukung berupa Steam Utility dan Electricity Utility. Dari sisi inventori, sumber utama hotspot berasal dari penggunaan natural gas sebagai bahan baku dan energi, serta katalis yang digunakan dalam proses reaksi. Kedua faktor tersebut menghasilkan emisi langsung (direct emission) seperti CO_2, serta emisi tidak langsung (background emission) dari database inventori yang mencakup SO_2, NO_x, NH_3, dan polutan lainnya. Oleh karena itu, strategi perbaikan kinerja lingkungan difokuskan pada unit proses dan inventori yang berkontribusi paling besar.

1. Optimalisasi Penggunaan Katalis

a. Pengelolaan katalis harus ditingkatkan untuk mengurangi kebutuhan katalis dalam jumlah besar, sehingga dampak dari inventori upstream (pembuatan katalis) dapat ditekan.
b. Perbaikan selektivitas dan umur katalis dilakukan dengan menjaga kemurnian bahan baku (feedstock), pengendalian kondisi operasi reaktor, serta pemilihan teknologi reaktor yang tepat.

c. Revitalisasi program manajemen katalis diperlukan agar pemakaian katalis lebih efisien, laju reaksi meningkat, dan hasil produksi lebih optimal dengan konsumsi katalis yang lebih rendah.

2. Efisiensi dan Substitusi Penggunaan Natural Gas

a. Program efisiensi energi di unit proses hotspot, khususnya pada reaktor ammonia dan Urea, dapat dilakukan melalui perbaikan sistem operasi, revamping pabrik, serta pemanfaatan teknologi hemat energi.
b. Diversifikasi energi dengan memanfaatkan sumber energi alternatif seperti biomassa, hidrogen hijau, atau pemanfaatan listrik dari energi terbarukan untuk mengurangi ketergantungan terhadap gas alam.
c. Utilisasi CO_2 hasil proses (carbon capture, utilization, and storage/CCUS) untuk produksi produk turunan, sehingga tidak hanya menurunkan emisi tetapi juga menambah nilai ekonomi.

3. Peningkatan Kualitas Data Emisi dan Inventori

a. Pengumpulan data primer yang tervalidasi perlu ditingkatkan pada setiap unit proses, khususnya untuk emisi langsung CO_2, NO_x, SO_2, dan NH_3, guna memperkuat representasi inventori.
b. Pengayaan data inventori infrastruktur dan maintenance agar sesuai dengan lingkup sistem, sehingga kontribusi dari tahap pendukung juga dapat dipertimbangkan secara lebih akurat.

4. Penguatan Analisis pada Lingkup Grave (Downstream)

Saat ini, data pada lingkup Grave (end-of-life/sekunder) masih terbatas dan bersifat generik. Oleh karena itu diperlukan:

a. Pengumpulan data primer atau studi lapangan untuk limbah produk pupuk pada fase pasca-penggunaan, termasuk emisi dari degradasi dan residu di lingkungan.
b. Penyesuaian aspek geografi, teknologi, dan cakupan waktu agar hasil lebih representatif untuk kondisi aktual Indonesia.
c. Hal ini penting agar penilaian dampak tidak hanya berfokus pada produksi, tetapi juga pada siklus hidup lengkap produk pupuk.

DAFTAR PUSTAKA

Boero, A. J.,Kardux, K., Kovaleva, M., Salas, D. A., Mooijer, J., Mashruk, S., Townsend, M., Pouwenhost, K., Medina, A. V., Ramirez, A. D., (2021). Environmental Life Cycle Assessment of Ammonia-Based Electricity. Energies. https://doi.org/10.3390/en14206721

ESDM. (2019). Nilai Faktor Emisi GRK Sistem Ketenagalistrikan Tahun 2018. (5), 1–1. Retrieved from https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/96d7c-nilai-fe-grk-sistem-ketenagalistrikan-tahun-2019.pdf

European Commission. (2010). ILCD handbook: General guide for Life cycle Assesment - Detailed guidance. Italy: European Union.

Garg, A., Pulles, T., Carruthers, I., Jaques, A., & Tejada, F. (2006). 2006 IPCC guidelines for Energy and Carbon Emissions. 2, 1–319.

Hauschild, M.Z., Rosenbaum, R.K., Olsen, S.I. (2018). Life Cycle Assessment: Theory and Practice, Springer Internasional AG.

IPCC (2006b) IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Intergovernmental Panel Climate Change.

Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2021. Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan Dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup.

Product Category Rules (PCR), 2020. Mineral or Chemicals Fertilizers Product Category Classification: UN CPC 3461, 3462, 3463,3464, dan 3465. EPD International.

UNEP, & SETAC (Producer). (2011). Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases: A Basis for Greener Processes and Products.

LAMPIRAN 1. Inventory Data

Tabel 28. Inventori RWI

RWI					
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**	**Dataset**
Input					
Water	4.386.059,77	m^3	Input	PT PIM	Resource/ Water, river, ID
Listrik PLN	4.487,32	MWh	Input	KESDM	Created
Solar	450,00	L	Input	PT PIM	Created
Pemanfaatan Sand Filter	45.188,00	m^3	Filter System	PT PIM	Created
Output		m^3			
Raw Water	4.250.102,56	m^3	Filter System	PT PIM	Created
Emission to Water		m^3			
Blowdown Clarifier	181.145,21	m^3	Lingkungan	PT PIM	Emission to Water
Emission to Air					
CO2	2.166,65	kg	Lingkungan	PT PIM	Emission to Air
CH4	0,09	kg	Lingkungan	PT PIM	Emission to Air
N2O	17,54	g	Lingkungan	PT PIM	Emission to Air

Tabel 29. Inventori Filter Water System

Filter Water System					
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**	**Dataset**
Input					
Raw Water	4.250.102,56	m^3	Dari Hitungan	PT PIM	Created
Coagulan aid	518,00	kg	Input	Ecoinvent	market for polyacrylamide I polyacrylamide I Cutoff, U - GLO
Alum Sulfat	240.700,00	kg	Input	Ecoinvent	market for aluminium sulfate, powder I aluminium sulfate, powder I Cutoff, U - RoW
Chlorine	11.474,00	kg	Input	Ecoinvent	market for chlorine, liquid I chlorine, liquid I Cutoff, U - RER
Asam Sulfat (Proses)	2.123.543,61	kg	Input	Ecoinvent	market for sulfuric acid I sulfuric acid I Cutoff, U - RoW
Caustic Soda	1.752.109,56	kg	Input	Ecoinvent	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state I sodium hydroxide, without water, in 50% solution state I Cutoff, U - GLO
Resin Cation Dupont HPR 1200	12,18	ton	Input	Ecoinvent	market for cationic resin I cationic resin I Cutoff, U - RoW
Resin Anion Dupont HPR 4800	8,24	ton	Input	Ecoinvent	market for anionic resin I anionic resin I Cutoff, U - RoW
Resin Anion Lewatit MP 500	1,06	ton	Input	Ecoinvent	market for anionic resin I anionic resin I Cutoff, U - RoW
Resin Kation Dowex HPR 1200	1,91	ton	Input	Ecoinvent	market for cationic resin I cationic resin I Cutoff, U - RoW
Carbon Molecul Sieve	0,12	ton	Input	Ecoinvent	market for activated silica I activated silica I Cutoff, U - GLO
Listrik	855,47	MWh	Electric Utility	PT PIM	Created
Process condensate Amonia 2 ke Demin Plant (filter water)	264.480,00	m^3	Amonia	PT PIM	Created

Filter Water System					
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**	**Dataset**
Input					
Steam condensate Amonia 2 ke Jacket (Polish Water)	26.448,00	m^3	Amonia	PT PIM	Created
Blowdown Packaged Boiler-2	8.317,20	m^3	Steam Utility	PT PIM	Created
Output					
Filtered Water QC	22.287,78	m^3	QC	PT PIM	Created
Filtered Water Utilitas	2.228.777,69	m^3	Polish	PT PIM	Created
Filtered Water Ammonia	1.321.146,96	m^3	Amonia	PT PIM	Created
Filtered Water Urea	931.916,98	m^3	Urea	PT PIM	Created
Filtered Water Gudang	9,39	m^3	Gudang	PT PIM	Created
Limbah Filter Water System	20,97	m^3	WWTP	PT PIM	Created
Limbah Sand Filter	45.188,00	m^3	RWI		Efisiensi Air

Tabel 30. Polished Water System

Polished Water System					
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**	**Dataset**
Input					
Filtered Water Utilitas	2.228.777,69	m^3	Filter Water	PT PIM	Created
Listrik	1.871,15	MWh	Electric Utility	PT PIM	Created
Steam condensate Urea 2 ke Dearator Utility 2 (Polish Water)	262.284,48	m^3	Urea	PT PIM	Created
Proces Condensate Urea 2 ke Dearator Utility 2 (Polish Water)	291.427,20	m^3	Urea	PT PIM	Created
Steam condensate Amonia 2 ke Dearator utility 2 (Polish Water)	133.387,92	m^3	Amonia	PT PIM	Created
Output		m^3			
Polished Water Utilitas (BFW)	1.439.628,19	m^3	Steam Utility	PT PIM	Created
Polished Water Ammonia	1.190.626,70	m^3	Amonia	PT PIM	Created
Polished Water Urea	18.035,00	m^3	Urea	PT PIM	Created
Limbah regen demin (Limbah Polish Sistem)	267.587,40	m^3	WWTP	PT PIM	Created
Hasil Efisiensi Program					
Hemat Polish Water	631,82	m^3	Sistem Sendiri		Efisiensi Air
Total Flow regen mixbed dan demin plant	637,15	m^3	Sistem Sendiri		Efisiensi Air
Limbah Regen Kation menjadi Pupuk Cair	0,12	m^3	Sistem Sendiri		PBPA

Tabel 31. Inventori Steam Utility

Steam Utility					
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**	**Dataset**
Input					
Natural Gas	2.959.121,03	MMBTU	Input	Ecoinvent	market for natural gas, high pressure | natural gas, high pressure | Cutoff, U - RoW
Listrik	5.175,33	MWh	Electric Utility	PT PIM	Created
Polished Water Utilitas (BFW)	1.439.628,19	m^3	Polish Water	PT PIM	Created
Kalgen 121	502,60	kg	Input	Ecoinvent	market for hydrazine | hydrazine | Cutoff, U - RoW
Kalgen - 358	895,00	kg	Input	Ecoinvent	market for hydrazine | hydrazine | Cutoff, U - RoW
Oxynon A - 701	308,20	kg	Input	Ecoinvent	market for hydrazine | hydrazine | Cutoff, U - RoW
Oxynon M - 603	275,20	kg	Input	Ecoinvent	market for hydrazine | hydrazine | Cutoff, U - RoW
Oxynon M - 601	9.280,00	kg	Input	Ecoinvent	market for hydrazine | hydrazine | Cutoff, U - RoW
Kurita H - 6060	1.640,00	kg	Input	Ecoinvent	market for hydrazine | hydrazine | Cutoff, U - RoW
Kurin Power - 932	1.035,60	kg	Input	Ecoinvent	
Condensate 53-EA-1901 sebagai air Boiler	11.067,84	m^3	Sistem Sendiri		Efisiensi Air
Output					
Steam	905.223,97	ton	Amonia dan Urea	PT PIM	Created
Blowdown	8.317,20	m^3	Filter Water	PT PIM	Efisiensi Air
Emission to Air					
CO2	167.146,06	ton	Lingkungan	PT PIM	Emission to Air
CH4	3,12	ton	Lingkungan	PT PIM	Emission to Air
N2O	0,31	ton	Lingkungan	PT PIM	Emission to Air

Tabel 32. Inventori Electricity Utility

Electricity Utility					
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**	**Dataset**
Input					
Natural gas	1.111.239,45	MMBTU	Input	Ecoinvent	market for natural gas, high pressure I natural gas, high pressure I Cutoff, U - RoW
Output					
Listrik	49.336,52	MWh	Filter,polish,steam,ASP,Amonia,Urea dan Gudang	PT PIM	Created
Emission to Air					
CO_2	62.768,40	ton	Lingkungan	PT PIM	Emission to Air
CH_4	1,17	ton	Lingkungan	PT PIM	Emission to Air
N_2O	0,12	ton	Lingkungan	PT PIM	Emission to Air

Tabel 33. Inventory QC Urea

QC Urea					
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**	**Dataset**
Input					
Sodium Hydroxida (NaOH)	8.000,00	g	Input	Ecoinvent	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state I sodium hydroxide, without water, in 50% solution state I Cutoff, U - GLO
Zinc Acetat Dihydrat	6.750,00	g	Input	Ecoinvent	market for potassium hydroxide I potassium hydroxide I Cutoff, U - GLO
Ferrous Ammonium Sulfat Hexahydrate	4.081,00	g	Input	Ecoinvent	market for chemical, inorganic I chemical, inorganic I Cutoff, U - GLO
Oxalic Acid Dihydrate	3.000,00	g	Input	Ecoinvent	market for oxalic acid I oxalic acid I Cutoff, U - GLO
Ferri Chloride Hexahydrate	3.943,00	g	Input	Ecoinvent	market for potassium carbonate I potassium carbonate I Cutoff, U - GLO
Potassium Sodium Tartrate Tetrahydrate	3.000,00	g	Input	Ecoinvent	market for chemical, organic I chemical, organic I Cutoff, U - GLO
Sodium Bisulfit	3.500,00	g	Input	Ecoinvent	market for disodium disulphite I disodium disulphite I Cutoff, U - GLO
Kalium Permanganat	1.500,00	g	Input	Ecoinvent	market for copper sulfate I copper sulfate I Cutoff, U - GLO
Sodium Sulfit (Na2SO3)	2.000,00	g	Input	Ecoinvent	market for sodium sulfite I sodium sulfite I Cutoff, U - RoW
Copper (II) Sulfat	500,00	g	Input	Ecoinvent	market for copper sulfate I copper sulfate I Cutoff, U - GLO
Ammonium Acetat	1.900,00	g	Input	Ecoinvent	market for chemical, organic I chemical, organic I Cutoff, U - GLO
L(+) Ascorbic Acid	1.000,00	g	Input	Ecoinvent	market for copper sulfate I copper sulfate I Cutoff, U - GLO
Sodium Sulfat Anhydrate	14.711,00	g	Input	Ecoinvent	market for chemical, organic I chemical, organic I Cutoff, U - GLO
HClO4 (Perchloric Acid)	105,00	Lit	Input	Ecoinvent	market for silica sand I silica sand I Cutoff, U - GLO

QC Urea					
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**	**Dataset**
Input					
Hydrochloride Acid 37% (HCL)	77,50	Lit	Input	Ecoinvent	market for chemical, inorganic I chemical, inorganic I Cutoff, U - GLO
Mercury (II) Iodide	1.050,00	g	Input	Ecoinvent	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state I hydrochloric acid, without water, in 30% solution state I Cutoff, U - RoW
Dimethyl 1-4 Phenilene Diamin	100,00	g	Input	Ecoinvent	market for para-phenylene diamine I para-phenylene diamine I Cutoff, U - GLO
Kalium Hydrogen Phatalate	603,00	g	Input	Ecoinvent	market for chemical, inorganic I chemical, inorganic I Cutoff, U - GLO
Amonium Thicynat	500,00	g	Input	Ecoinvent	market for sulfamic acid I sulfamic acid I Cutoff, U - GLO
4 Dimethylamino Benzaldehyde (PDAB)	146,00	g	Input	Ecoinvent	market for benzaldehyde I benzaldehyde I Cutoff, U - RoW
4 Amino 3 Hydroxy 1 Nephtalien Sulfanic Acid (ANSA)	100,00	g	Input	Ecoinvent	market for sodium chloride, powder I sodium chloride, powder I Cutoff, U - GLO
Silver Sulfat	400,00	g	Input	Ecoinvent	market for boric acid, anhydrous, powder I boric acid, anhydrous, powder I Cutoff, U - GLO
Filtered Water QC	22.287,78	m^3	Filter Water	PT PIM	Created
Asam sulfat	18,40	kg	Input	Ecoinvent	
Output					
Limbah QC	22.287,78	m^3	WWTP	PT PIM	Created
Program Hasil Pemanfaatan					
Sodium Hydroxida (M-Talsik) (tambahan)	35,41	kg	Sistem Sendiri		Limbah B3
Reuse H2SO4	40.480,00	g	Sistem Sendiri		Limbah B3

Tabel 34. Inventori ASP

ASP					
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**	**Dataset**
Input					
Nitrogen (cair dan gas)	2.986.327,00	Nm^3	Input	PT PIM	Resource/in air
Listrik	5.106,23	MWh	Electric Utility	PT PIM	Created
Output					
Nitrogen unit Urea	1.493.163,50	Nm^3	Urea	PT PIM	Created
Nitrogen unit Amonia	1.493.163,50	Nm^3	Amonia	PT PIM	Created

Tabel 35. Water Treatment Plant

Waste Water Treatment Plant					
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**	**Dataset**
Input					
Limbah Amonia plant	13.959,06	m^3	Amonia	PT PIM	Created
Limbah Urea plant	139.590,59	m^3	Urea	PT PIM	Created
Limbah gudang pengantongan	20.938,59	m^3	Gudang	PT PIM	Created
Limbah Filter Water System	20,97	m^3	Filter Water	PT PIM	Created
Limbah regen demin (Limbah Polish Sistem)	267.587,40	m^3	Polish Water	PT PIM	Created
Limbah QC	22.287,78	m^3	QC	PT PIM	Created
Amonia Limbah Amonia Plant	93,87	ton	Amonia	PT PIM	Created
Amonia Limbah Urea Plant	9,39	ton	Urea	PT PIM	Created
Amonia Limbah Gudang	1,04	ton	Gudang	PT PIM	Created
Asam Sulfat (KPPL)	374.600,00	kg	Input	Ecoinvent	market for sulfuric acid l sulfuric acid l Cutoff, U - RoW
Output					
Limbah Outlet WWTP	464.384,38	m^3	Lingkungan	PT PIM	Emission to Water
COD	72,73	ton	Lingkungan	PT PIM	Emission to Water
Amonia (sebagai NH3-N)	73,01	ton	Lingkungan	PT PIM	Emission to Water
Total Nitrogen (sbg N)	215,88	ton	Lingkungan	PT PIM	Emission to Water
TSS	7,65	ton	Lingkungan	PT PIM	Emission to Water
Minyak & Lemak	0,07	ton	Lingkungan	PT PIM	Emission to Water

Tabel 36.Inventori Ammonia Plant

Ammonia Plant					
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**	**Dataset**
Input					
Natural Gas (Fuel Reforming dan bahan baku)	8.803.496,84	MMBTU	Input	Ecoinvent	market for natural gas, high pressure | natural gas, high pressure | Cutoff, U - RoW
Udara (secondary)	264.876,84	KNm^3	Input	PT PIM	Resource
Steam (reforming dan heating)	378.861,74	ton	Steam Utility	PT PIM	Created
Listrik Ammonia	11.927,41	MWh	Electric Utility	PT PIM	Created
Nitrogen ASP	1.493.163,50	KNm^3	ASP	PT PIM	Created
Filtered Water Ammonia	1.321.146,96	m^3	Filter Water	PT PIM	Created
Polished Water Ammonia	1.190.626,70	m^3	Polish Water	PT PIM	Created
Anti Foaming Silicone SAG - 7133	400,00	kg	Input	Ecoinvent	market for polydimethylsiloxane | polydimethylsiloxane | Cutoff, U - GLO
aMDEA	2.520,00	kg	Input	Ecoinvent	market for solvent, organic | solvent, organic | Cutoff, U - GLO
Sodium Carbonate	13.450,00	kg	Input	Ecoinvent	market for soda ash, light, crystalline, heptahydrate | soda ash, light, crystalline, heptahydrate | Cutoff, U - GLO
Sponge Iron	35,86	ton	Input	Ecoinvent	market for nickel, class 1 | nickel, class 1 | Cutoff, U - GLO
Mercury Guard Chamber Activated Carbon	1,51	ton	Input	Ecoinvent	market for activated carbon, granular | activated carbon, granular | Cutoff, U - GLO
Katalis Hydrotreater (Cobalt-Molybdenum)	0,98	ton	Input	Ecoinvent	market for nickel, class 1 | nickel, class 1 | Cutoff, U - GLO
Katalis Desulfurizer (Zinc Oxide)	5,42	ton	Input	Ecoinvent	market for nickel, class 1 | nickel, class 1 | Cutoff, U - GLO
Katalis Primary Reformer (Nikel Oxide dan Potasium)	8,34	ton	Input	Ecoinvent	market for nickel, class 1 | nickel, class 1 | Cutoff, U - GLO
Katalis Secondary Reformer (Nikel Oxide dan Calcium Aluminate)	13,99	ton	Input	Ecoinvent	market for nickel, class 1 | nickel, class 1 | Cutoff, U - GLO
Katalis HTS (Iron)	15,91	ton	Input	Ecoinvent	market for nickel, class 1 | nickel, class 1 | Cutoff, U - GLO
Katalis LTS (Chopper-Zinc)	15,08	ton	Input	Ecoinvent	market for nickel, class 1 | nickel, class 1 | Cutoff, U - GLO
Katalis Methanator	2,53	ton	Input	Ecoinvent	market for nickel, class 1 | nickel, class 1 | Cutoff, U - GLO
Katalis Ammonia Converter	8,09	ton	Input	Ecoinvent	market for nickel, class 1 | nickel, class 1 | Cutoff, U - GLO
Lubricating Oil	7,70	ton	Input	Ecoinvent	market for lubricating oil | lubricating oil | Cutoff, U - RoW
Output					
Ammonia Product	28.531,59	ton	Jual	PT PIM	Created
Ammonia to Urea Plant	262.784,45	ton	Urea	PT PIM	Created
CO2 to Urea Plant	373.592,38	ton	Urea	PT PIM	Created
Amonia Limbah Amonia Plant	93,87	ton	WWTP	PT PIM	Created
Limbah Amonia plant	13.959,06	m^3	WWTP	PT PIM	Created

Ammonia Plant					
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**	**Dataset**
Lubricating Oil	7,70	ton	Input	Ecoinvent	market for lubricating oil l lubricating oil l Cutoff, U - RoW
Process condensate Amonia 2 ke Demin Plant (filter water)	264.480,00	m^3	Filter Water	PT PIM	Efisiensi Air
Steam condensate Amonia 2 ke Jacket (Polish Water)	26.448,00	m^3	Polish Water	PT PIM	Efisiensi Air
Steam condensate Amonia 2 ke Dearator utility 2 (Polish Water)	133.387,92	m^3	Polish Water	PT PIM	Efisiensi Air
Emission to Air					
CO2	177.466,64	ton	Lingkungan	PT PIM	Emission to Air
CH4	9,29	ton	Lingkungan	PT PIM	Emission to Air
N2O	0,93	ton	Lingkungan	PT PIM	Emission to Air
Hasil Efisiensi Program					
Blowdown Steam Drum Ammonia-2 (Filter Water) (Pengurangan)	13.224,00	m^3	Sistem Sendiri		Efisiensi Air
Blowdown Jacket Water Ammonia-2 (Filter Water) (Pengurangan)	52.896,00	m^3	Sistem Sendiri		Efisiensi Air
Subtitusi waste gas venting (Pengurangan)	27.573,48	GJ	Sistem Sendiri		Energi dan Emisi
Subtitusi waste gas venting (Pengurangan)	1,00	Item	Sistem Sendiri		
Penggantian Sparepart Mycom (Pengurangan)	1.292,47	GJ	Sistem Sendiri		Energi dan Emisi
Penggantian Sparepart Mycom (Pengurangan)	1,00	item	Sistem Sendiri		
Penggantian HTS Effluent Steam Generator (Pengurangan)	108.468,11	GJ	Sistem Sendiri		Energi dan Emisi
Penggantian HTS Effluent Steam Generator (Pengurangan)	1,00	item	Sistem Sendiri		
Optimalisasi S/C Ratio di Primary Reformer (Pengurangan)	79.711,45	GJ	Sistem Sendiri		Energi dan Emisi
Optimalisasi S/C Ratio di Primary Reformer (Pengurangan)	1,00	item	Sistem Sendiri		
Katalis LTS (Retur-CLAP) (Tambahan)	12,36	ton	Sistem Sendiri		Limbah B3
Katalis Primary Reformer (Tambahan)	0,09	ton	Sistem Sendiri		Limbah B3
Preman Ok - Oli bekas (Penambahan)	22,30	ton	Sistem Sendiri		Limbah B3
Cleaning Primary Reformer	430.768,73	GJ	Sistem Sendiri		Energi dan Emisi
Cleaning Primary Reformer	1,00	item	Sistem Sendiri		

Ammonia Plant					
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**	**Dataset**
Optimasi Steam SX 61-173-C	77.417,36	GJ	Sistem Sendiri		Energi dan Emisi
Optimasi Steam SX 61-173-C	1,00	Item	Sistem Sendiri		
Pergantian Steam Trap Bocor	3.969,08	GJ	Sistem Sendiri		Energi dan Emisi
Pergantian Steam Trap Bocor	1,00	Item	Sistem Sendiri		
Upgrade Woodward Control Air and Feed Gas	167.049,78	GJ	Sistem Sendiri		Energi dan Emisi
Upgrade Woodward Control Air and Feed Gas	1,00	Item	Sistem Sendiri		
Stop Slow Roll Pompa BFW	52.654,42	GJ	Sistem Sendiri		Energi dan Emisi
Stop Slow Roll Pompa BFW	1,00	Item	Sistem Sendiri		
Optimalisasi Produk Urea adjust set poin press	149.883,42	GJ	Sistem Sendiri		Energi dan Emisi
Optimalisasi Produk Urea adjust set poin press	1,00	Item	Sistem Sendiri		
Perbaikan Cooling Tower	530,68	GJ	Sistem Sendiri		Energi dan Emisi
Perbaikan Cooling Tower	1,00	Item	Sistem Sendiri		
Optimalisasi Surface Condenser	256.791,57	GJ	Sistem Sendiri		Energi dan Emisi
Optimalisasi Surface Condenser	1,00	Item	Sistem Sendiri		
Katalis Secondary Reformer	0,45	ton	Sistem Sendiri		Limbah B3
Pengurangan Oli Bocor dgn ganti tube stainless steal	3,68	ton	Sistem Sendiri		Limbah B3

Tabel 37. Inventori Urea Plant

Urea Plant					
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**	**Dataset**
Input					
Steam	526.362,23	ton	Steam Utility	PT PIM	Created
Listrik Urea	22.481,39	MWh	Electric Utility	PT PIM	Created
Ammonia to Urea Plant	262.784,45	ton	Amonia	PT PIM	Created
CO2 to Urea Plant	373.592,38	ton	Amonia	PT PIM	Created
Nitrogen	1.493.163,50	Nm^3	ASP	PT PIM	Created
Filtered Water Urea	931.916,98	m^3	Filter Water	PT PIM	Created
Polished Water Urea	18.035,00	m^3	Polish Water	PT PIM	Created
Output					
Urea	435.867,42	ton	Gudang	PT PIM	Created
Limbah Urea plant	139.590,59	m3	WWTP	PT PIM	Created
Amonia Limbah Urea Plant	9,39	ton	WWTP	PT PIM	Created
Steam condensate Urea 2 ke Dearator Utility 2 (Polish Water)	262.284,48	m^3	Polish Water	PT PIM	Created
Proces Condensate Urea 2 ke Dearator Utility 2 (Polish Water)	291.427,20	m^3	Polish Water	PT PIM	Created
Emission to Air		m^3			
Ammonia	160,10	ton	Lingkungan	PT PIM	Emission to Air
Particulates	26,82	ton	Lingkungan	PT PIM	Emission to Air

Tabel 38. Inventori Gudang

Gudang					
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**	**Dataset**
Input					
Urea	435.867,42	ton	Urea	PT PIM	Created
Ferticol Red C	104.200,00	kg	Input	Ecoinvent	market for chemical, organic l chemical, organic l Cutoff, U - GLO
Uresoft / Anti caking	118.200,00	kg	Input	Ecoinvent	market for chemical, inorganic l chemical, inorganic l Cutoff, U - GLO
BBM Solar Forklift	94.195,00	Liter	Input	PT PIM	Created
LISTRIK	1.919,54	MWh	Electric Utility	PT PIM	Created
Kantong Pupuk Urea (@70 gram)	139.696,64	kg	Input	Ecoinvent	market for polypropylene, granulate l polypropylene, granulate l Cutoff, U - GLO, market for extrusion, plastic film l extrusion, plastic film l Cutoff, U - GLO
Benang Jahit Polyester Fiber	2.880,00	Ea	Input	Ecoinvent	market for fibre, polyester l fibre, polyester l Cutoff, U - GLO
Filter Water	9,39	m^3	Filter Water	PT PIM	Created
Jumlah Drum (@drum 9 kg)	4.689,00	kg	Input	PT PIM	Created

Gudang					
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**	**Dataset**
Output					
Urea Produk	436.089,82	ton	Jual	PT PIM	Created
KANTONG PUPUK UREA (@70 gram)	470.742,30	kg	Jual	PT PIM	Created
Limbah Urea plant	139.590,59	m^3	WWTP	PT PIM	Created
Amonia Limbah Gudang	9,39	ton	WWTP	PT PIM	Created
Emission to Third Party					
Kantong Reject	186,48	kg	Olah Pihak Ketiga	Ecoinvent	market for waste polypropylene l waste polypropylene l Cutoff, U - RoW
Kantong Expired	106,05	kg	Sisa Tahun lalu dimanfaatkan program Limbah Non B3		

Tabel 39. Inventori Transport

Transport to Consumer					
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**	**Dataset**
Input Urea					
Urea Produk	436.089,82	ton		PT PIM	Created
Transport, Urea to aceh (subsidi)-truck	17.352.261,05	t*km		PT PIM	isikan dataset
Transport, Urea to aceh (non-subsidi)-truck	20.778.647,47	t*km		PT PIM	isikan dataset
Transport, Urea to Sumut (non subsidi)-truck	433.434,82	t*km		PT PIM	isikan dataset
Transport, Urea to Sumut (subsidi)-ship	56.028.424,76	t*km		PT PIM	isikan dataset
Transport, Urea to Sumbar (subsidi)-truck	1.924.923,56	t*km		PT PIM	isikan dataset
Transport, Urea to Sumbar (non subsidi)-truck	94.301.195,14	t*km		PT PIM	isikan dataset
Transport, Urea to Riau (subsidi)-truck	624.100,54	t*km		PT PIM	isikan dataset
Transport, Urea to Riau (subsidi)-truck	3.192.949,27	t*km		PT PIM	isikan dataset
Transport, Urea to Kepri-truck	132.427,46	t*km		PT PIM	isikan dataset
Output Urea					
Urea Produk at Consumer	436.089,82	ton	Consumer	PT PIM	Created
Input Ammonia					
Ammonia Produk	28.531,59	ton		PT PIM	isikan dataset
Transport, Amonia to Medan-ship	3.024.337,49	t*km		PT PIM	isikan dataset
Transport, Amonia to Singapura-ship	24.410.537.691,99	t*km		PT PIM	isikan dataset
Output Ammonia					
Ammonia Produk at Consumer	28.531,59	ton	Consumer	PT PIM	isikan dataset

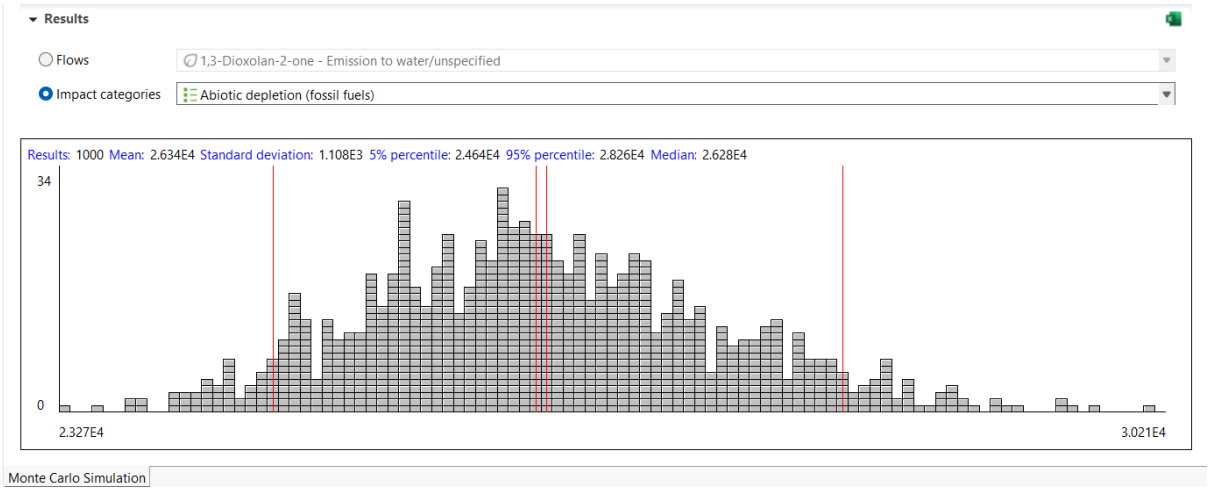
Tabel 40. Inventori End of Life

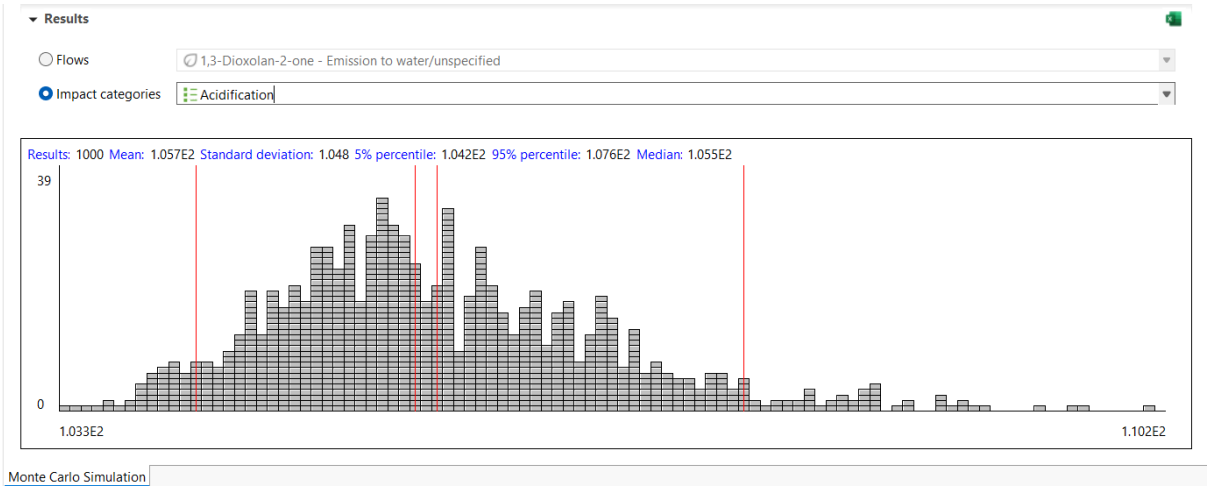
End of life				
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**
Usage and End of Life Urea				
Input	**Amount**	**Unit**	**Dataset**	
Urea	436.089,82	ton		
Output	**Amount**	**Unit**		
land	4.360.898,20	ha		IPCC
N2O	4.176.681,40	kg		IPCC
CO_2	318.345.568,60	kg		IPCC
NH_3	24.358.731,37	kg		FE= Brentrup et al, 2018
NO_2	6.591.186,14	kg		IPCC
Usage and End of Life Ammonia				
Input	**Amount**	**Unit**		
ammonia, from PIM	28.531,59	ton		Boero et al., 2021
Water	11.427.381,01	kg		Boero et al., 2022
Gas turbine	0,02	p		Boero et al., 2023
Output				
Electricity	36.862.519,38	kWh		Boero et al., 2023
Heat	95.252.750,08	kWh		Boero et al., 2024
NH3	122.899.639,61	mg		Boero et al., 2025
N2O	85.078.694,73	mg		Boero et al., 2026

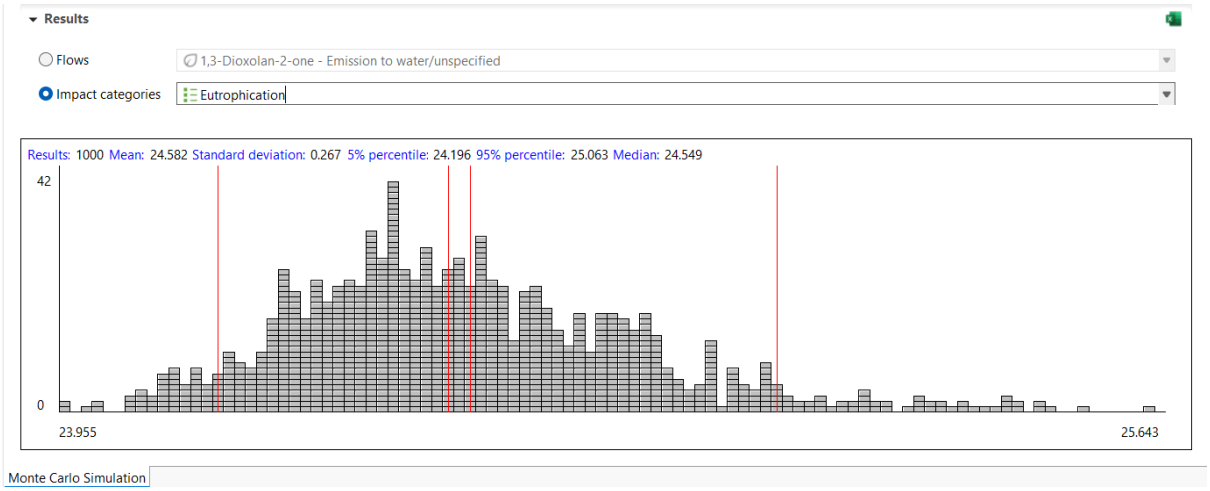
End of life				
Aliran	**Jumlah**	**Unit**	**From/to**	**Sumber Data**
NOx	24.661.025,47	g		Boero et al., 2027
NO	35.609.193,72	g		Boero et al., 2028
Water	44.714.236,01	m^3		Boero et al., 2029

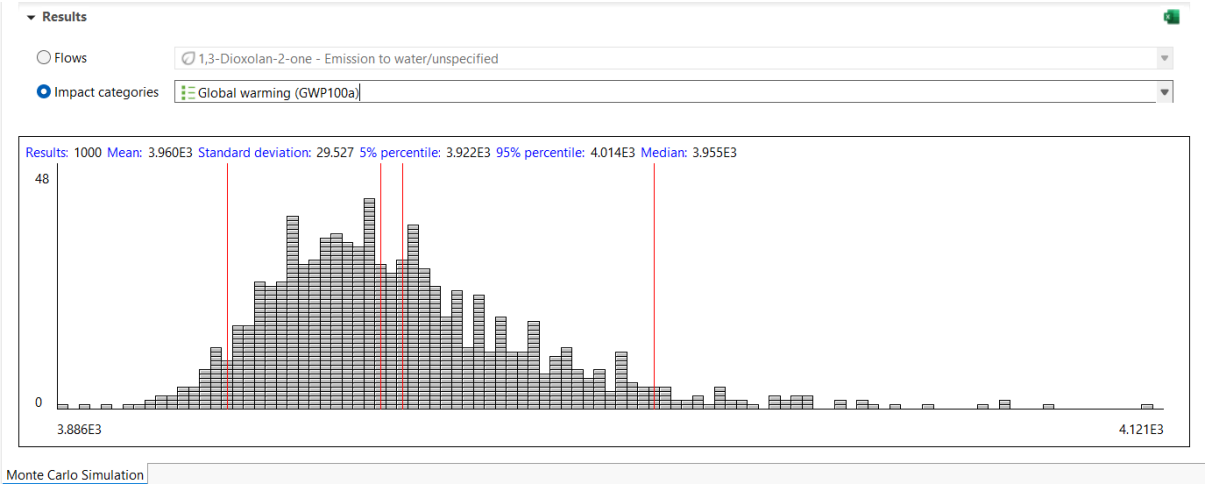
LAMPIRAN 2. Hasil Monte Carlo

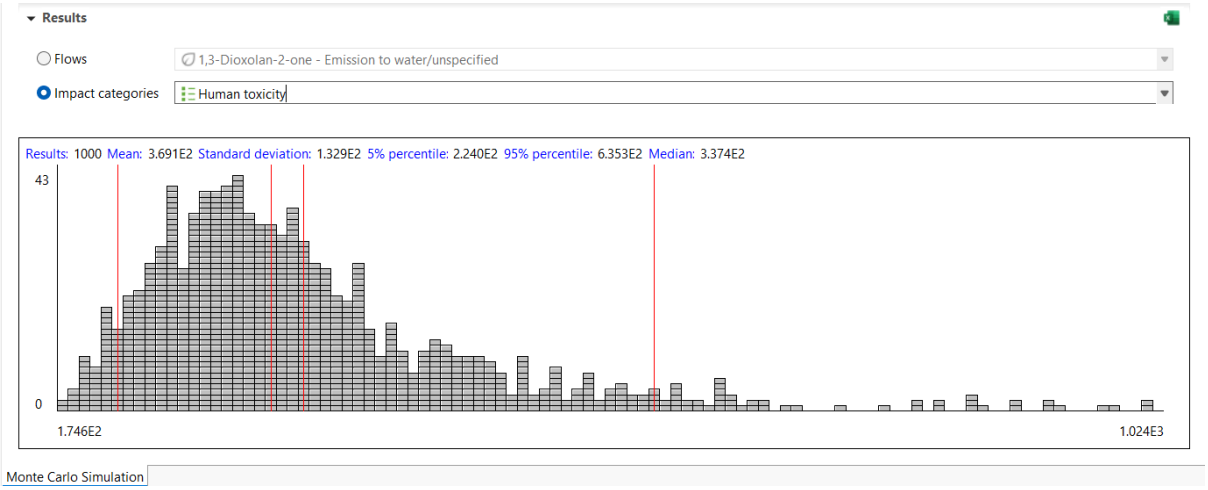
a. Skenario Baseline



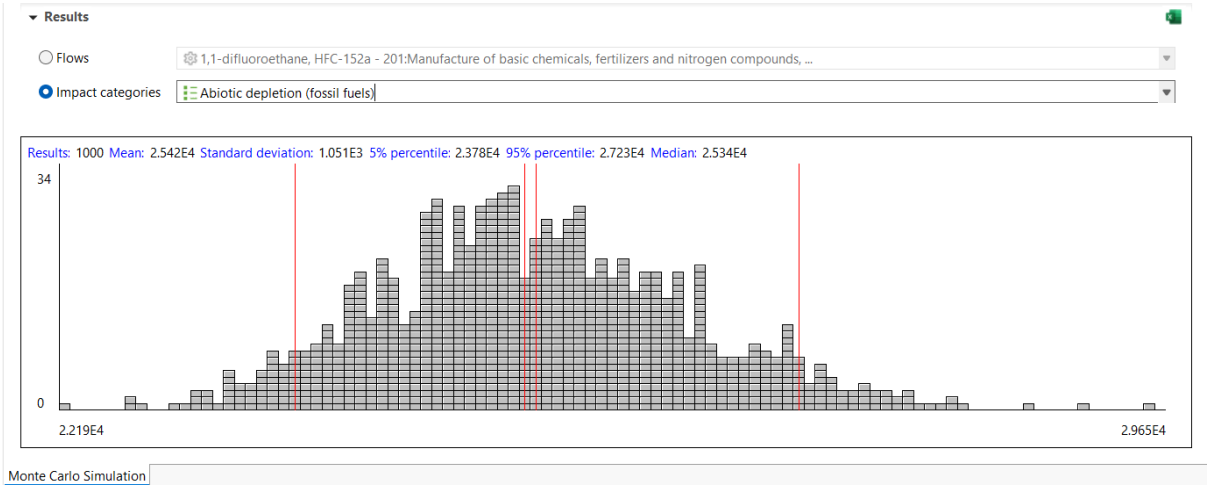


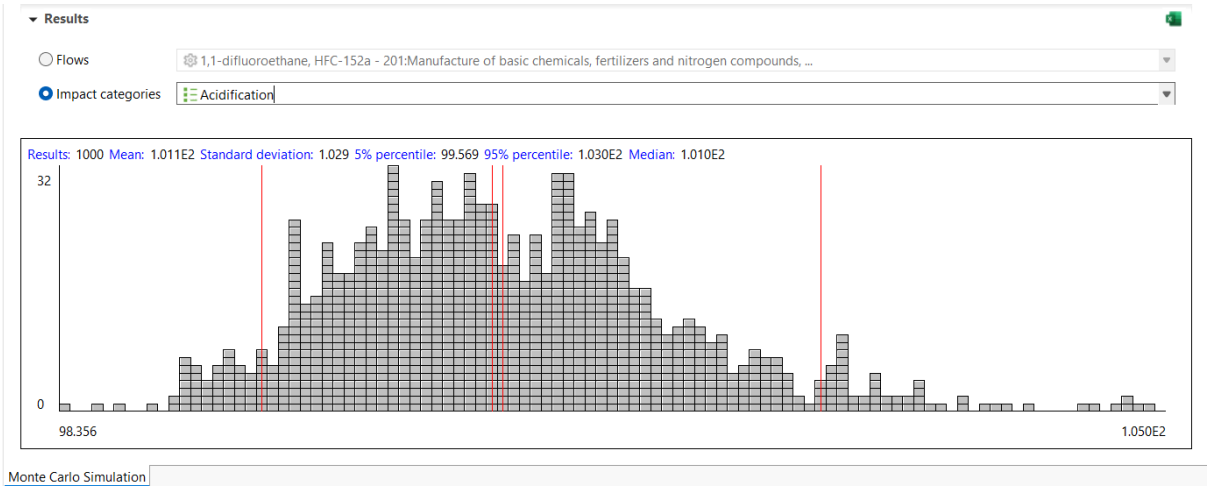


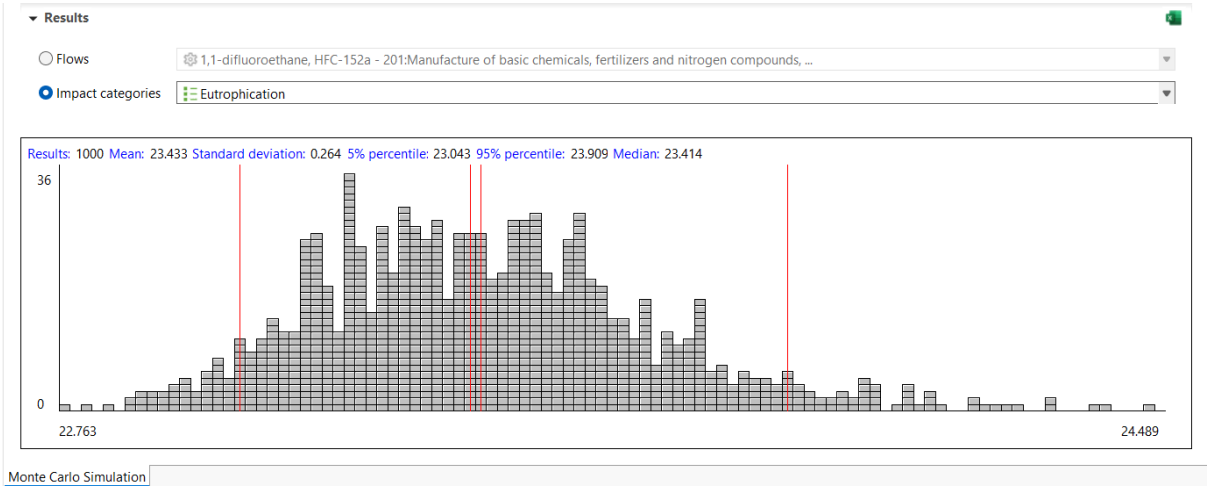

Results
Flows
1,3-Dioxolan-2-one - Emission to water/unspecified
Impact categories
Global warming (GWP100a)
Results: 1000 Mean: 3.960E3 Standard deviation: 29.527 5% percentile: 3.922E3 95% percentile: 4.014E3 Median: 3.955E3
48
0
3.886E3
4.121E3
Monte Carlo Simulation


Results
Flows
1,3-Dioxolan-2-one - Emission to water/unspecified
Impact categories
Human toxicity
Results: 1000 Mean: 3.691E2 Standard deviation: 1.329E2 5% percentile: 2.240E2 95% percentile: 6.353E2 Median: 3.374E2
43
0
1.746E2
1.024E3
Monte Carlo Simulation

b. Skenario Multinutrisi 5%



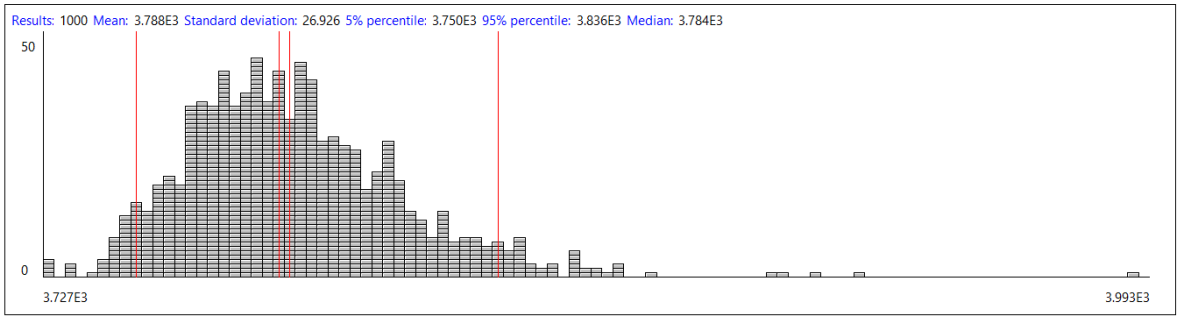




Results

Flows 1,1-difluoroethane, HFC-152a - 201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and nitrogen compounds, ...

Impact categories Global warming (GWP100a)

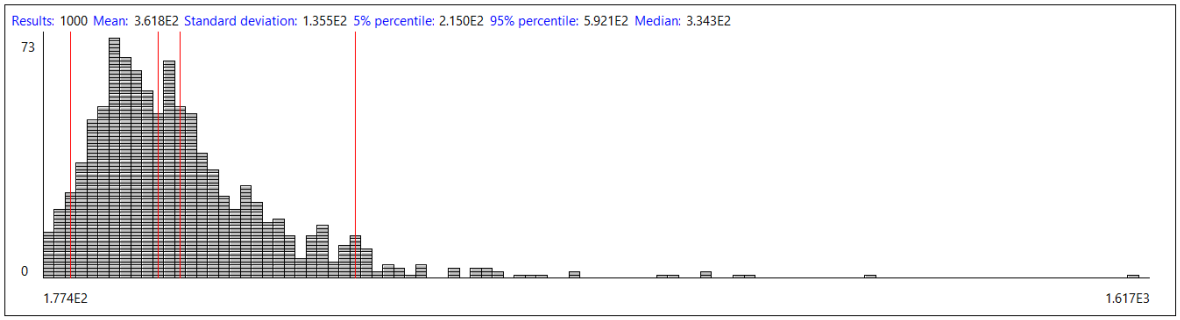


Monte Carlo Simulation

Results

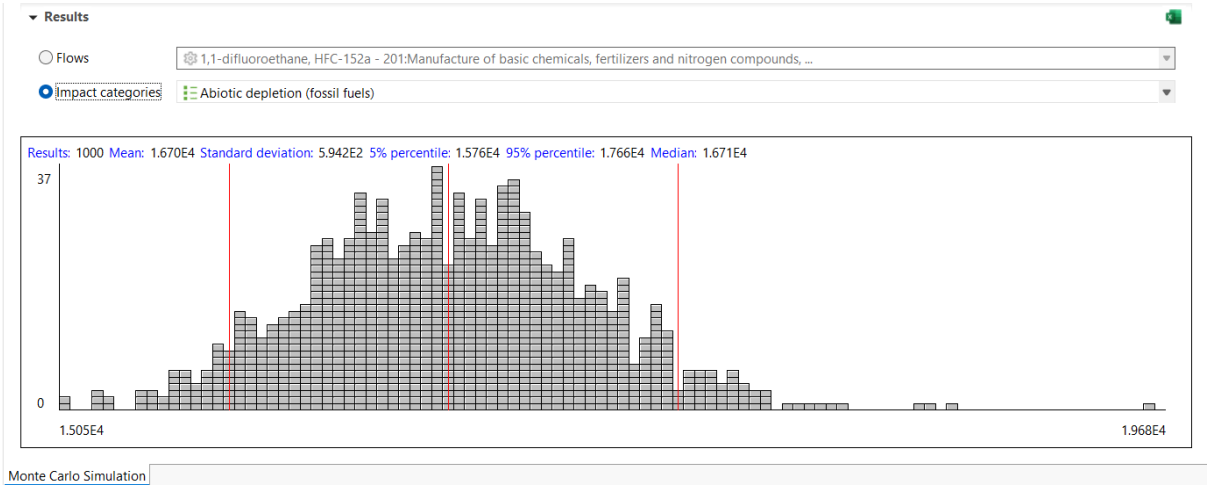
Flows 1,1-difluoroethane, HFC-152a - 201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and nitrogen compounds, ...

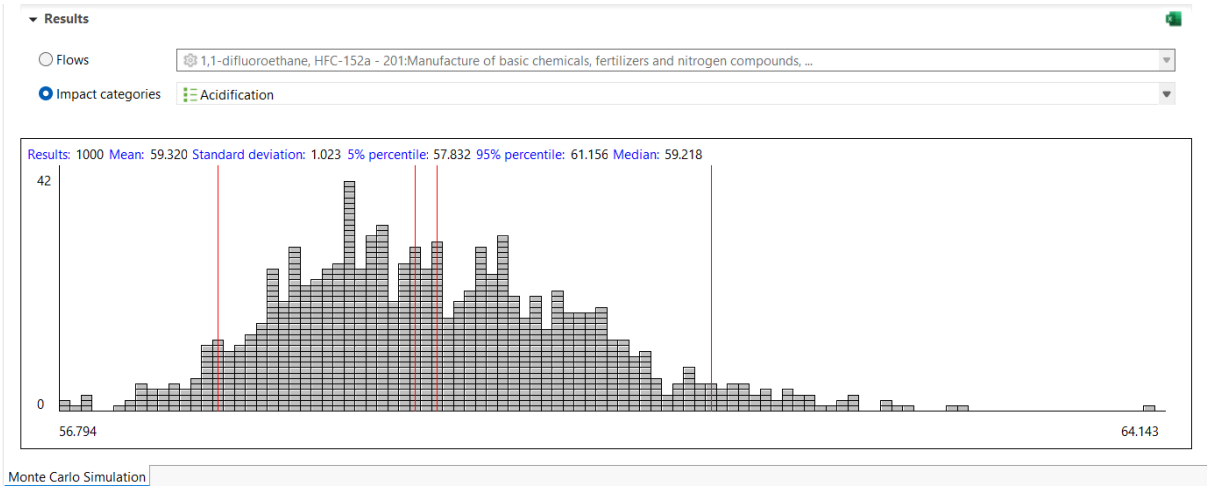
Impact categories Human toxicity

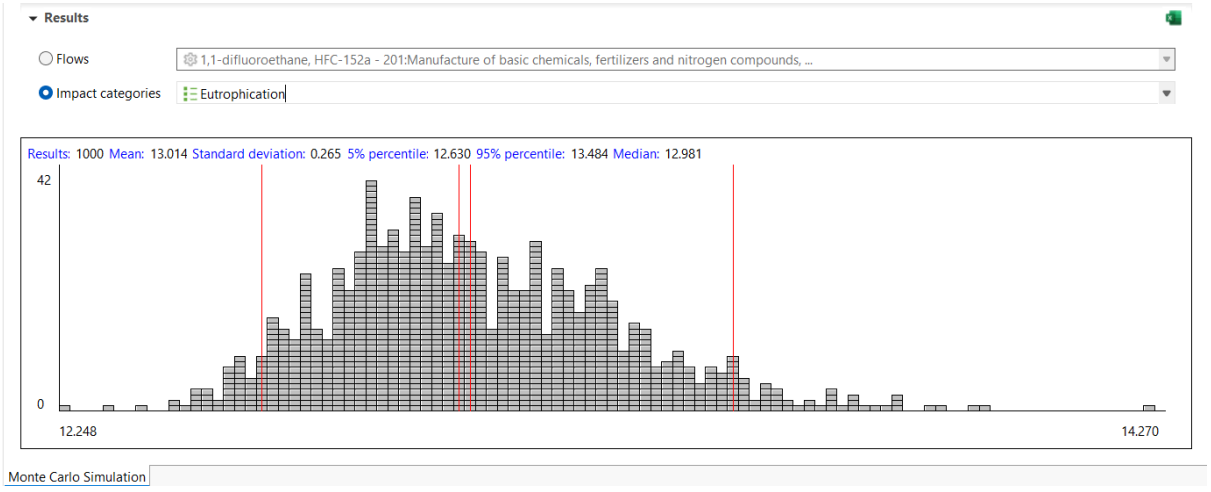


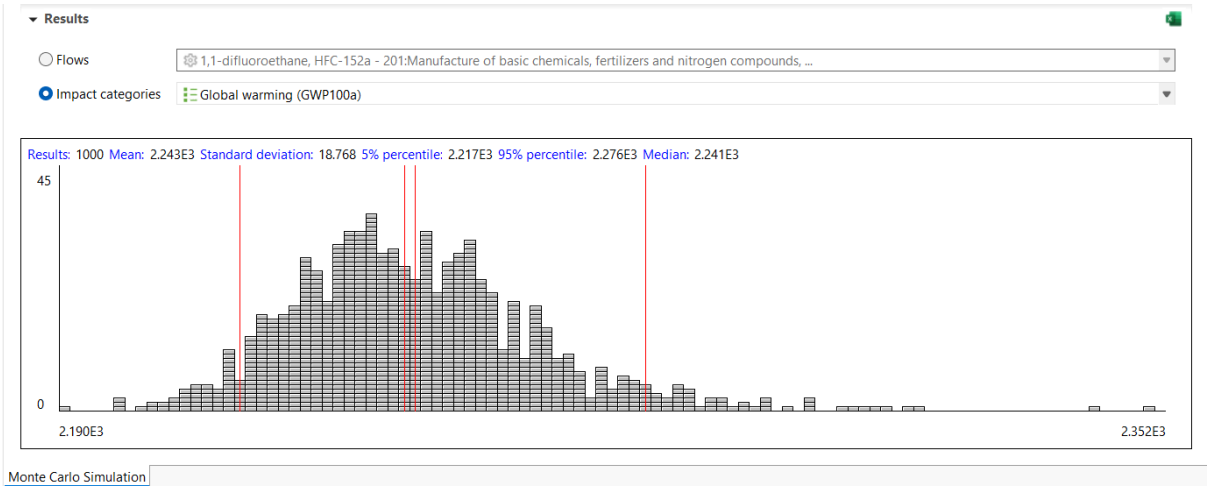
Monte Carlo Simulation

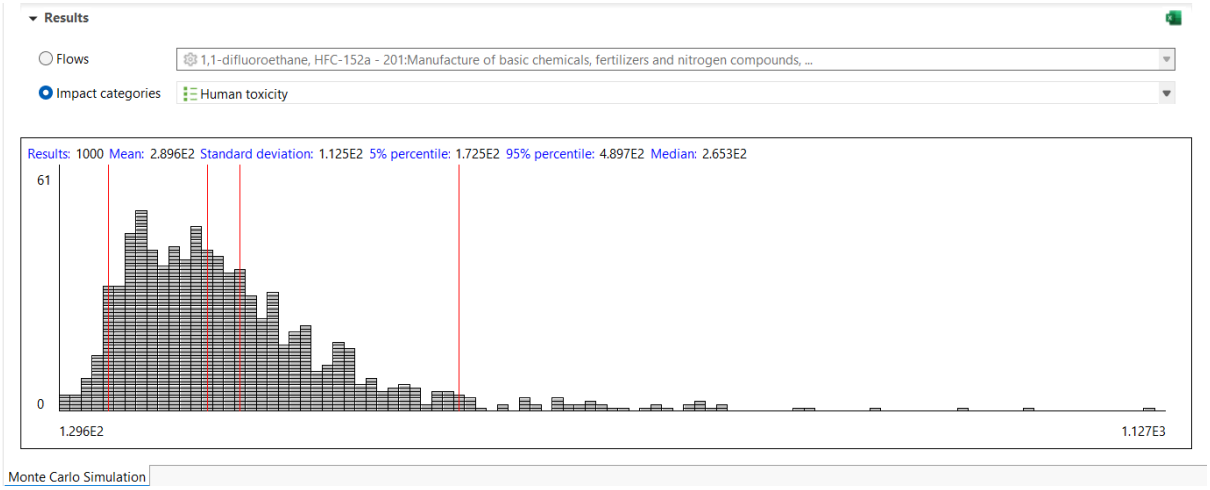
c. Skenario Mulnitrisi 50%








Results
Flows
1,1-difluoroethane, HFC-152a - 201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and nitrogen compounds, ...
Impact categories
Global warming (GWP100a)
Results: 1000 Mean: 2.243E3 Standard deviation: 18.768 5% percentile: 2.217E3 95% percentile: 2.276E3 Median: 2.241E3
45
0
2.190E3
2.352E3
Monte Carlo Simulation


Results
Flows
1,1-difluoroethane, HFC-152a - 201:Manufacture of basic chemicals, fertilizers and nitrogen compounds, ...
Impact categories
Human toxicity
Results: 1000 Mean: 2.896E2 Standard deviation: 1.125E2 5% percentile: 1.725E2 95% percentile: 4.897E2 Median: 2.653E2
61
0
1.296E2
1.127E3
Monte Carlo Simulation

LAMPIRAN 3. Faktor Normalisasi

CML, World 2000		
Impact category	**Normalization factor**	**Weighting factor**
Potensi terjadi penurunan abiotik	2,09E+08	-
Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil fuels)	3,80E+14	-
Potensi Hujan Asam	2,39E+11	-
Potensi Eutrofikasi	1,58E+11	-
Eutrofikasi air tawar	2,36E+12	-
Global warming Potential	4,18E+13	-
Toxicity	2,58E+12	-
Ekotoksisitas air laut	1,94E+14	-
Potensi Penipisan Ozon	2,27E+08	-
Photochemical Oxidant	3,68E+10	-
Ekotoksisitas air tawar	1,09E+12	-

LAMPIRAN 4. Daftar Referensi Perangkat Lunak

Perangkat lunak yang digunakan adalah:

- OpenLCA : https://www.openlca.org/download-form/
- Microsoft Excel : https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/excel
- Microsoft Word : https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/word

LAMPIRAN 5. Pedigree Matrix for Data Sensitivity

Parameter	Kondisi	Nilai
Cakupan Teknologi (TeR)	Data dari perusahaan, proses dan bahan yang sedang dipelajari	1
Cakupan Waktu (TiR)	Perbedaan kurang dari 3 tahun dengan periode waktu kumpulan data	1
Cakupan Geografi (GR)	Data rata-rata dari area yang lebih luas di mana area yang diteliti disertakan	1
Kelengkapan (C)	Data representatif dari semua situs yang relevan	1
Presisi (P)	Data terverifikasi sebagian berdasarkan asumsi atau data tidak terverifikasi berdasarkan pengukuran	2
Konsistensi (M)	Metodologi kajian diterapkan pada seluruh komponen analisis kajian	1
Data Qualitry Rating (DQR)		**1,35**

Indicator score	**1**	**2**	**3**	**4**	**5** (default)
Reliability	Verified[5] data based on measurements[6]	Verified data partly based on assumptions ***or*** non-verified data based on measurements	Non-verified data partly based on qualified estimates	Qualified estimate (e.g. by industrial expert)	Non-qualified estimate
Completeness	Representative data from all sites relevant for the market considered, over an adequate period to even out normal fluctuations	Representative data from >50% of the sites relevant for the market considered, over an adequate period to even out normal fluctuations	Representative data from only some sites (<<50%) relevant for the market considered ***or*** >50% of sites but from shorter periods	Representative data from only one site relevant for the market considered ***or*** some sites but from shorter periods	Representativeness unknown or data from a small number of sites ***and*** from shorter periods
Temporal correlation	Less than 3 years of difference to the time period of the dataset	Less than 6 years of difference to the time period of the dataset	Less than 10 years of difference to the time period of the dataset	Less than 15 years of difference to the time period of the dataset	Age of data unknown or more than 15 years of difference to the time period of the dataset
Geographical correlation	Data from area under study	Average data from larger area in which the area under study is included	Data from area with similar production conditions	Data from area with slightly similar production conditions	Data from unknown ***or*** distinctly different area (North America instead of Middle East, OECD-Europe instead of Russia)
Further technological correlation	Data from enterprises, processes and materials under study	Data from processes and materials under study (i.e. identical technology) but from different enterprises	Data from processes and materials under study but from different technology	Data on related processes or materials	Data on related processes on laboratory scale ***or*** from different technology

Sumber: UNEP & SETAC, 2011

LAMPIRAN 6. Tinjauan Kritis

- **Proses Review**

Panel peninjau memiliki tugas untuk menilai apakah:

1. Metode yang digunakan untuk melaksanakan LCA konsisten dengan internasional standar ISO 14040: 2016 dan ISO 14044:2017
2. Kesesuaian kajian LCA dengan Pedoman Penyusunan Laporan Penilaian Daur Hidup (LCA) Tahun 2021.
3. Metode yang digunakan untuk melaksanakan LCA valid secara ilmiah dan teknis,
4. Data yang digunakan sesuai dan masuk akal dalam kaitannya dengan tujuan penelitian
5. Interpretasi mencerminkan keterbatasan yang diidentifikasi dan tujuan penelitian,
6. Laporan studi transparan dan konsisten.

- **Hasil Evaluasi umum oleh panel peninjau**

Kajian LCA secara umum telah dilakukan sesuai dengan ISO 14040: 2016; ISO 14044:2017; dan sesuai dengan Pedoman Penyusunan Laporan Penilaian Daur Hidup (LCA) Tahun 2021. Panel peninjau kritis menemukan kualitas keseluruhan dari metodologi yang dipilih dan penerapannya dalam analisis memadai untuk tujuan penelitian. Pelaporan studi dan hasilnya transparan dan komprehensif. Komposisi data yang diterapkan cukup, pembahasan hasil sudah mencakup aspek-aspek yang relevan sesuai dengan tujuan penelitian, dan kesimpulan didasarkan pada hasil penelitian dan sesuai dengan tujuan yang ditetapkan. Komentar yang diberikan oleh panel peninjau ini oleh penulis didokumentasikan dalam tabel di bawah ini.

Daftar komentar dan masukan terhadap draft Laporan LCA tersaji sebagai berikut:
Reviewer 1: Dr. rer. nat. Rio Aryapratama (Departemen Teknik Kimia, FT UGM)
Reviewer 2: Muhammad Mufti Azis, Ph.D. (Departemen Teknik Kimia, FT UGM)

Sub bab	Bagian Laporan	Jenis komentar: Teknis = Te Editorial = Ed Grafis = G	Rekomendasi reviewer	Tanggapan Tim Penyusun
1.1	Profil Perusaaan	Ed	**Reviewer 1:** Sebaiknya bab 1 ini dipecah menjadi setidaknya 2 subbab (Profil Perusahaan dan Latar Belakang kajian) **Reviewer 2:** Sudah disusun dengan baik	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
1.2	Latar belakang kajian	Ed	**Reviewer 1**: Sebaiknya bab 1 ini dipecah menjadi setidaknya 2 subbab (Profil Perusahaan dan Latar Belakang kajian) **Reviewer 2**: Sudah disusun dengan baik	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
2.1	Tujuan Kajian		**Reviewer 1**: Sudah disusun dengan baik **Reviewer 2**: Sudah disusun dengan baik	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
2.2	Lingkup LCA (Hal 12)	Ed	**Reviewer 1**: Sudah disusun dengan baik **Reviewer 2**: Sebutkan juga terkait cradle to gravenya	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
	2.2.1.2 Aliran Acuan	Te	**Reviewer 1**: '1 ton produk' : Tolong dijelaskan ton produk apa tepatnya **Reviewer 2**: Sudah disusun dengan baik	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
	2.2.3 Alasan pemilihan batasan sistem	Te	**Reviewer 1**: Apakah PCRnya masih valid hingga saat ini? **Reviewer 2**: Sudah disusun dengan baik	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
	2.2.4 Gambar Diagram Sistem Produk	G G	**Reviewer 1**: Panah dari chemical fertilizer production sebaiknya disambungkan ke kotak distribution **Reviewer 2**: Pada core process, utilities: electrcity, water, and steam apakah semuanya diproduksi di PIM?	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
	2.2.6 Prosedur alokasi	Te	**Reviewer 1**: Lengkapi nama PCRnya beserta versinya (jika ada)	Sudah disesuaikan dan ditambahkan

Sub bab	Bagian Laporan	Jenis komentar: Teknis = Te Editorial = Ed Grafis = G	Rekomendasi reviewer	Tanggapan Tim Penyusun
			Reviewer 2: Sudah disusun dengan baik	
	2.2.7 Pengumpulan data Tabel 7 No. 5	Ed	**Reviewer 1**: Sudah disusun dengan baik **Reviewer 2**: Digitalisasi atau digitasi?	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
	2.2.10 Persyaratan Kualitas Data	Ed	**Reviewer 1:** Sudah disusun dengan baik **Reviewer 2:** Tabel 4 atau Tabel 8?	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
	2.2.12 Pernyataan cakupan interpretasi dan format laporan	Te	**Reviewer 1:** Tolong tambahkan dasar pemilihan kategori dampak wajib dan tambahan ini (Permennya) **Reviewer 2:** Sudah disusun dengan baik	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
3.1	Standar atau referensi yang dirujuk	Te Ed Ed	**Reviewer 1**: No. 2: Mohon dicek apakah PCR ini ada versinya? Jika ada mohon ditulis juga dan tolong dicek tanggal validitynya juga. **Reviewer 2**: Judul Bab 3 (Hal 19): Taruh di halaman berikutnya. **Reviewer 2**: No. 4: Tolong tuliskan juga KLHKnya	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
3.2	Metode perhitungan yang digunakan		**Reviewer 1**: Sudah disusun dengan baik **Reviewer 2:** Sudah disusun dengan baik	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
3.3	Pemilihan metode penilaian dampak		**Reviewer 1**: Sudah disusun dengan baik **Reviewer 2**: Sudah disusun dengan baik	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
4.1	Deskripsi Kualitatif Proses	G Ed G	**Reviewer 1:** Gambar 2: Pada aliran dari ‘transport to consumer‘ ke ‘usage & end of life‘ sebaiknya dituliskan juga nama dan quantity aliran materialnya **Reviewer 2**: Judul Bab 4: Tolong diposisikan di halaman selanjutnya **Reviewer 2:** Gambar 2: Jelaskan arti simbol huruf E, S pada legend di gambar ini (atau minimal pada judul gambar).	Sudah disesuaikan dan ditambahkan

Sub bab	Bagian Laporan	Jenis komentar: Teknis = Te Editorial = Ed Grafis = G	Rekomendasi reviewer	Tanggapan Tim Penyusun
4.2	Prosedur pengumpulan data		**Reviewer 1**: Sudah disusun dengan baik **Reviewer 2**: Sudah disusun dengan baik	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
4.3	Sumber literatur		**Reviewer 1:** Sudah disusun dengan baik **Reviewer 2**: Sudah disusun dengan baik	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
4.4	Prosedur Perhitungan Data Hal 27	Te	**Reviewer 1:** 0,1626; 0,234900; 0,957757 → tuliskan satuan **Reviewer 2:** Sudah disusun dengan baik	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
4.5	Inventori Daur Hidup	Te	**Reviewer 1**: Sudah disusun dengan baik. **Reviewer 2**: Tabel 12: Mohon pastikan kembali neraca airnya. Di bagian input ada 4.39E+06 m^3 water. Kemana water tersebut, apakah ada yg terdischarged ke lingkungan atau tersirkulasi di pabrik?	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
4.6	Validasi Data	Te Te	**Reviewer 1:** Tabel 13, Hal 37: Pada tabel 11 terdapat total 1+10=11 data (di luar dari database ecoinvent), yang merupakan data sekunder. Namun di Tabel 12 ini hanya 9. Tolong dicek kembali. **Reviewer 2**: Tabel 4.6, Raw Water Intake, Output: Apakah ini berasal dari data ESDM? Tolong dituliskan juga ESDMnya.	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
5.1	Prosedur Penilaian Dampak Daur Hidup	Ed	**Reviewer 1**: Sudah disusun dengan baik **Reviewer 2**: Judul Bab 5: Posisikan di halaman berikutnya.	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
5.2	Kategori Dampak, Indikator Dampak, dan Hasil Penilaian Dampak Daur Hidup	Ed Ed	**Reviewer 1**: Tabel 16: Pada tabel ini format angkanya disamakan saja jika misalnya mau menggunakan format scientific **Reviewer 1**: Tabel 17: Pada tabel ini format angkanya disamakan saja jika misalnya mau	Sudah disesuaikan dan ditambahkan

Sub bab	Bagian Laporan	Jenis komentar: Teknis = Te Editorial = Ed Grafis = G	Rekomendasi reviewer	Tanggapan Tim Penyusun
			menggunakan format scientific **Reviewer 2**: Sudah disusun dengan baik.	
5.3	Keterbatasan Hasil LCIA Relatif terhadap Tujuan dan Lingkup LCA		**Reviewer 1**: Sudah disusun dengan baik. **Reviewer 2**: Sudah disusun dengan baik.	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
5.4	Analisis Keterkaitan LCIA dengan Tujuan dan Lingkup LCA		**Reviewer 1**: Sudah disusun dengan baik. **Reviewer 2**: Sudah disusun dengan baik.	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
5.5	Analisis Keterkaitan LCIA dengan Hasil LCI	Te Te	**Reviewer 1**: Hal 48, '...Dengan demikian, pengendalian nitrogen di tahap produksi....': Bagaimana dengan di downstream/penggunaan? Pada kajian ini hotspot Eurofikasi ada di bagian donwnstream. Saya rasa ini relevan untuk diangkat karena manajemen pemupukan dan pengelolaan lahan pertanian erat kaitannya dengan eutrofikasi. **Reviewer 2**: Hal 48, '...Dominasi N_2O menunjukkan bahwa...': Dicek kembali apakah N_2O ini terjadi di produksi Urea atau di bagian penggunaan Urea (mengingat hotpsot kajian ini ada di bagian Downstream/penggunaan)	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
5.6	Pernyataan LCIA sebagai ekspresi relatif dan tidak memprediksi dampak kategori endpoint		**Reviewer 1**: Sudah disusun dengan baik **Reviewer 2**: Sudah disusun dengan baik	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
6.1	Identifikasi isu penting	Ed Te Ed	**Reviewer 1**: Gambar 4: Jelaskan metode normalisasi pada judul gambar. **Reviewer 1:** Tabel 20, Hal. 53: Jelaskan maksud	Sudah disesuaikan dan ditambahkan

Sub bab	Bagian Laporan	Jenis komentar: Teknis = Te Editorial = Ed Grafis = G	Rekomendasi reviewer	Tanggapan Tim Penyusun
		Ed Ed	angka ber-font merah dan biru pada judul tabel ini. Mengapa pada Potensi terjadi penuruan abiotik (fossil) tidak ada angka berhuruf merah? **Reviewer 2**: Judul Bab 6: Posisikan di halaman berikutnya. **Reviewer 2**: Tabel 22 dan teksnya: Tolong dicek tulisan nomor tabel/tautan tabel. Bagian ini sedang membahas Tabel 22 **Reviewer 2**: Tabel 23 dan teksnya, Tabel 24 dan teksnya, Tabel 25 dan teksnya, Tabel 26 dan teksnya: Tolong dicek kesesuaian nomor tabel dan tautan tabel.	
6.2	Evaluasi pemeriksaan kelengkapan, konsistensi, analisis sensitivitas, analisis ketidakpastian	Ed Ed Ed	**Reviewer 1:** Tabel 28, typo '5% pupupuk...' **Reviewer 2:** Tabel 27 dan teksnya: Cek lagi kesesuaian nomor tabel dan tautan tabel **Reviewer 2:** Tabel 29 dan teksnya: Tolong cek kesesuaian nomor tabel dan tautan tabel	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
7.1	Kesimpulan	Te Ed Te	**Reviewer 1**: Tuliskan juga kesimpulan secara umum terkait sensitivitas/implementasi program **Reviewer 2**: Judul Bab 7: Tempatkan di halaman selanjutnya. **Reviewer 2**: poin b, '...penggunaan produk oleh konsumen...': Tolong sedikit diberi tambahan penjelasan penggunaan produk oleh konsumen sebagai apa	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
7.2	Keterbatasan kajian yang dilakukan		**Reviewer 1:** Sudah disusun dengan baik **Reviewer 2:** Sudah disusun dengan baik	Sudah disesuaikan dan ditambahkan
7.3	Rekomendasi berdasarkan isu penting		**Reviewer 1:** Sudah disusun dengan baik **Reviewer 2:** Sudah disusun dengan baik	Sudah disesuaikan dan ditambahkan

LAMPIRAN 7. Swadeklarasi Tinjauan Kritis 1

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama	:	Dr.rer.nat. Ir. Rio Aryapratama, S.T., M.Eng., M.Sc.
Jabatan	:	Dosen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Alamat	:	Jl. Grafika No. 2, Kampus UGM, Yogyakarta, 55281
Telepon	:	+6285163219532

Menyatakan bahwa telah melaksanakan tinjauan kritis (critical review) terhadap Laporan Kajian LCA PT. Pupuk Iskandar Muda Tahun 2025 yang berlandaskan ISO SNI 14040:2006, ISO SNI 14044:2006, Pedoman Penyusunan Laporan Penilaian Daur Hidup (LCA) Tahun 2021, dan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2025. Tinjauan kritis tersebut telah dilakukan secara independen dan tanpa tekanan atau paksaan dari pihak manapun.

Demikian surat pernyataan ini saya buat agar dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Yogyakarta, 5 Oktober 2025



Dr.rer.nat. Ir. Rio Aryapratama, S.T., M.Eng., M.Sc.

LAMPIRAN 8. Swadeklarasi Tinjauan Kritis 2

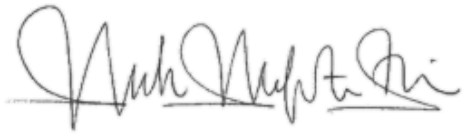
Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama	:	Ir. Muhammad Mufti Azis, S.T., M.Sc.,Ph.D.,IPM
Jabatan	:	Dosen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Alamat	:	Jl. Grafika No. 2, Kampus UGM, Yogyakarta, 55281
Telepon	:	+6285163219532

Menyatakan bahwa telah melaksanakan tinjauan kritis (critical review) terhadap Laporan Kajian LCA PT. Pupuk Iskandar Muda Tahun 2025 yang berlandaskan ISO SNI 14040:2006, ISO SNI 14044:2006, Pedoman Penyusunan Laporan Penilaian Daur Hidup (LCA) Tahun 2021, dan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2025. Tinjauan kritis tersebut telah dilakukan secara independen dan tanpa tekanan atau paksaan dari pihak manapun.

Demikian surat pernyataan ini saya buat agar dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Yogyakarta, 5 Oktober 2025



Ir. Muhammad Mufti Azis, S.T., M.Sc.,Ph.D.,IPM

LAMPIRAN 9. Data Tim Penyusun Internal

Ketua dan Anggota tim penyusun internal secara keseluruhan merupakan karyawan PT Pupuk Iskandar Muda (PIM) yang telah memenuhi persyaratan penyusunan Laporan Akhir Kajian LCA PROPER sebagaimana tertulis dalam Permen LH No 7 Tahun 2025. Bukti lampiran Daftar Riwayat Hidup Singkat dan Sertifikat Evaluator LCA yang dikeluarkan oleh BNSP tercantum pada QR Code berikut.

Scan QR Code CV dan
sertifikat penyusun internal



LAMPIRAN 10. Biodata penyusun eksternal

Laporan ini disusun oleh Tim LKFT Universitas Gadjah Mada. Tim LKFT Universitas Gadjah Mada bekerja dengan perusahaan, pemerintah, dan pembuat keputusan lainnya untuk mengidentifikasi dan menerapkan tindakan yang tepat untuk meminimalkan dampak lingkungan dari produk dan layanan. Seluruh tim penyusun internal merupakan dosen, konsultan, dan praktisi LCA yang dibuktikan dari terpenuhinya syarat penyusun eksternal. Bukti Riwayat hidup singkat dan sertifikat evaluator yang dikeluarkan oleh BNSP terlampir pada QR Code berikut. Laporan Analisis Daur Hidup (Life Cycle Assessment) PT Pupuk Iskandar Muda telah dilakukan sesuai standar SNI ISO 14040-2016 dan SNI ISO 14044-2017.

Scan QR Code CV dan
sertifikat penyusun eksternal



Pusat Kajian LKFT UGM
Gedung Pancabrata Prof. Herman
Johannes (ERIC), Lantai 2, Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 1 Kampus UGM, Yogyakarta
55281
Phone +62-274-631180
Fax +62-274-631180
E-mail: lkft@ugm.ac.id atau langsung Muhammad Mufti
Azis, PhD.
(muhammad.azis@ugm.ac.id)

INDEKS LAPORAN

Bab	Pengungkapan	Halaman	Alasan Tidak Dicantumkan
Tujuan & Lingkup	Tujuan Kajian	15	Dicantumkan
	Pernyataan komparatif yang ditujukan untuk disampaikan ke masyarakat	15	Dicantumkan
	Sistem produk dan fungsi sistem produk	15	Dicantumkan
	Unit Fungsi atau Unit Deklarasi	15	Dicantumkan
	Batasan Sistem Kajian	15	Dicantumkan
	Kriteria cut-off	17	Dicantumkan
	Prosedur alokasi	17	Dicantumkan
	Pengumpulan data	18	Dicantumkan
	Asumsi	19	Dicantumkan
	Keterbatasan kajian LCA yang dilakukan	19	Dicantumkan
	Persyaratan kualitas data	20	Dicantumkan
	Perlakuan terhadap data yang hilang	21	Dicantumkan
	Pernyataan cakupan interpretasi dan format laporan	21	Dicantumkan
	Tinjauan kritis	22	Dicantumkan
Metode Pelaksanaan LCA	Standar atau Referensi yang Dirujuk	24	Dicantumkan
	Metode Perhitungan yang Digunakan	24	Dicantumkan
	Pemilihan Metode Penilaian Dampak	24	Dicantumkan
Inventori daur hidup	Deskripsi Kualitatif Unit Proses	26	Dicantumkan
	Prosedur Pengumpulan Data	29	Dicantumkan
	Sumber Literatur	29	Dicantumkan
	Prosedur Perhitungan Data	30	Dicantumkan
	Inventori Data	30	Dicantumkan
	Penilaian kualitas data	34	Dicantumkan
	Perlakuan atas data yang hilang	43	Dicantumkan
Penilaian dampak daur hidup	Prosedur Penilaian Dampak Daur Hidup (Life Cycle Impact Assessment/LCIA)	47	Dicantumkan
	Kategori Dampak, Indikator Dampak, dan Hasil Penilaian Dampak Daur Hidup	47	Dicantumkan
	Keterbatasan Hasil LCIA Relatif terhadap Tujuan dan Lingkup LCA	51	Dicantumkan
	Analisa Keterkaitan LCIA dengan Tujuan dan Lingkup LCA	51	Dicantumkan
	Analisa Keterkaitan LCIA dengan Hasil LCI	52	Dicantumkan
	Pernyataan LCIA sebagai Ekspresi Relatif dan Tidak Memprediksi Dampak Kategori Endpoint	52	Dicantumkan

Bab	Pengungkapan	Halaman	Alasan Tidak Dicantumkan
Interpretasi daur hidup	Identifikasi Isu Penting	55	Dicantumkan
	Evaluasi Pemeriksaan Kelengkapan, Analisis Sensitivitas, Analisis Ketidakpastian, dan Konsistensi	66	Dicantumkan
Kesimpulan, keterbatasan dan rekomendasi	Kesimpulan	73	Dicantumkan
	Keterbatasan	74	Dicantumkan
	Rekomendasi	75	Dicantumkan

TINJAUAN KRITIS **DILAKUKAN**/~~TIDAK DILAKUKAN~~

Bab	Pengungkapan	Halaman	Alasan Tidak Dicantumkan
Tinjauan Kritis	Proses Review	100	Dicantumkan
	Hasil Evaluasi umum oleh panel peninjau	101	Dicantumkan
	Swadeklarasi Tinjauan Kritis	106	Dicantumkan

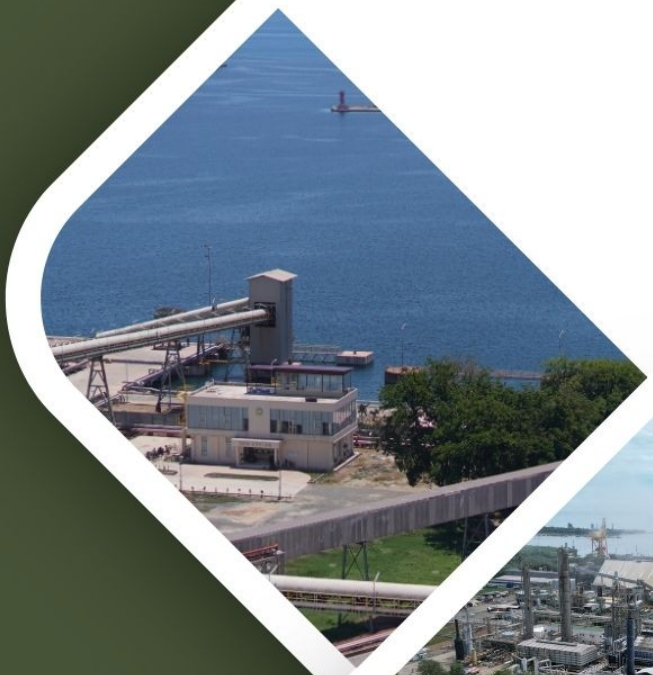
DAFTAR ISTILAH

Istilah	Definisi/Penjelasan
Inherent	Sifat atau karakteristik bawaaan dari suatu barang maupun jasa.
Reduce	Pengurangan konsumsi atau produksi limbah
Reuse	Pemakaian ulang
Recycle	Daur ulang
Upstream/proses hulu	Proses yang terjadi sebelum bahan baku masuk ke proses inti dari organisasi, antara lain ekstraksi dan produksi bahan baku, produksi sumber energi dan lainnya.
Core/proses inti	Proses yang terjadi di dalam organisasi, yang masuk dalam kendali organisasi
Downstream/proses hilir	Proses atau kegiatan setelah keluar dari pintu organisasi, dapat merupakan kegiatan distribusi, konsumsi dan juga pengolahan di akhir hidup produk.
Emission Factor	Koefisien yang menunjukkan banyaknya emisi per unit aktivitas.
Unit deklarasi	Unit acuan dalam deklarasi lingkungan Tipe III atau komunikasi jejak, berdasarkan satu modul informasi atau lebih.
Unit fungsi	Kinerja yang terukur dari sistem produk untuk digunakan sebagai unit acuan
Kategori dampak	Pengelompokan yang mewakili isu lingkungan yang menjadi perhatian dan bisa dihubungkan dengan hasil analisis inventori daur hidup
Klasifikasi	Penempatan hasil life cycle inventory pada kategori dampak tertentu
Karakterisasi	Perhitungan hasil indikator kategori dengan faktor yang diturunkan dari model karakterisasi yang digunakan. Karakterisasi dilakukan untuk mengonversi hasil inventori daur hidup menjadi unit umum indikator kategori
Global Warming Potential	Peningkatan suhu di bumi yang diakibatkan terperangkapnya panas/ radiasi matahari oleh gas rumah kaca sehingga tidak dapat terlepas ke atmosfer. Gas emisi termasuk seperti karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4) dan dinitrogen oksida (N_2O). Satuan ukurnya adalah kg CO_2 eq.
Penipisan ozon	Disebut juga lubang ozon adalah berkurangnya kadar ozon pada lapisan stratosfer karena pembentukan bahan kimia reaktif akibat reaksi dengan sinar matahari dengan bahan pencemar seperti metana (CH_4), nitrogen oksida (NOx), karbon monoksida (CO), dan sulfur dioksida (SO_2)
Penggunaan energi (cumulative energi demand)	Jumlah energi yang dibutuhkan pada satu siklus daur hidup untuk menghasilkan suatu produk baik yang bersifat langsung maupun tidak langsung
Photochemical oxidant	Pembentukan bahan kimia reaktif akibat reaksi dengan sinar matahari dengan bahan pencemar seperti metana (CH_4), nitrogen oksida (NO_x), karbon monoksida (CO), dan sulfur dioksida (SO_2). Satuan ukurnya kg C_2H_4 eq.
Jejak air	ukuran yang menguantifikasi dampak lingkungan potensial yang berkaitan dengan air secara kuantitatif (SNI ISO 14046)
Land use change	Bertambahnya suatu penggunaan lahan dari satu sisi penggunaan ke penggunaan yang lainnya diikuti dengan

Istilah	Definisi/Penjelasan
	berkurangnya tipe penggunaan lahan yang lain dari suatu waktu ke waktu berikutnya, atau berubahnya fungsi suatu lahan pada kurun waktu yang berbeda
Jejak kelangkaan air (water scarcity)	Dampak potensial terkait dengan kuantitas pemakaian air tanpa mempertimbangkan kualitas air.
Abiotic Resource Depletion	Penipisan/berkurangnya jumlah sumber daya alam yang tidak terbarukan di alam yang diukur berdasarkan jumlah energi yang diambil. Sumber daya alam termasuk sumber daya energi seperti bijih besi, minyak mentah, termasuk energi angin. Unit satuannya adalah MJ/kWh.
Eutrofikasi (air tawar dan air laut)	Dampak terhadap ekosistem perairan yang dipengaruhi oleh materi makro nutrien berupa nitrogen, fosfat dan parameter Chemical Oxygen Demand. Unit satuannya adalah kg PO_4 eq.
Hujan asam (Asidifikasi)	Dampak pengasaman yang ditimbulkan oleh bahan pencemar nitrogen oksida (NO_x) dan sulfur dioksida (SO_2). Unit satuannya adalah kg SO_2 eq.
Ekotoksisitas (air tawar dan air laut)	Potensi dampak yang diakibatkan bahan beracun berupa fenol, raksa (Hg), arsen (As), kadmium (Cd), kromium (Cr), tembaga (Cu), timbal (Pb), nikel (Ni), vanadium (V), dan seng (Zn) kepada makhluk hidup di air tawar dan laut. Unit satuannya adalah kg 1,4-db eq.
Toksisitas terhadap manusia	Potensi dampak terhadap kesehatan manusia dikarenakan bahan beracun berupa fenol, raksa (Hg), arsen (As), kadmium (Cd), kromium (Cr), tembaga (Cu), timbal (Pb), nikel (Ni), vanadium (V), dan seng (Zn). Unit satuannya adalah kg 1,4-db eq.
ReCiPe	ReCiPe adalah metode penilaian dampak lingkungan yang dikembangkan pada tahun 2008 oleh Dutch National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Radboud University Nijmegen, Leiden University, dan PRé Sustainability.

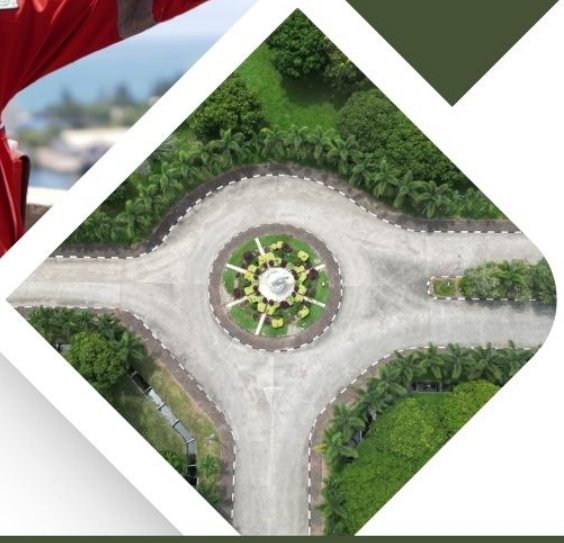
DAFTAR SINGKATAN

Singkatan	Kepanjangan
BBM	Bahan Bakar Minyak
CML	Centrum voor Milieukunde Leiden (Center of Environmental Science)
EPD	Environmental Product Declaration
GWP	Global Warming Potential
ILCD	International Reference Life Cycle Data System
ISO	International Organization for Standardization
KLH	Kementerian Lingkungan Hidup
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
PCR	Product Category Rules
PLN	Perusahaan Listrik Negara
PPKL	Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan
SNI	Standar Nasional Indonesia
UGM	Universtias Gadjah Mada
UPNVY	UPN “Veteran” Yogyakarta









Prepared by:

Tim LCA LKFT UGM

Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta 55281.|Phone+62-274-513665|Email: teknik@ugm.ac.id

Presented to:

PT Pupuk Iskandar Muda

Jalan Medan Banda Aceh PO Box 021
Krueng Geukeuh, Aceh Utara
Indonesia