

PENGAJIAN PRODUKSI *LYSINE* UNTUK MENGOPTIMASI PENGUNAAN *STEAM EVAPORATOR, DRYER* DAN METODE *CO-FIRING*

Irmayani Dwi Fardian dan Windi Zamrudy

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia
irmadwifardian@gmail.com ; [windi.zamrudy@polinema.ac.id]

ABSTRAK

Penilaian daur hidup proses produksi industri di Indonesia menunjukkan keberhasilannya dalam mendorong industri untuk melakukan pengelolaan lingkungan. LCA menjadi syarat yang secara teknis harus dipenuhi oleh perusahaan. Berdasarkan informasi di website Indonesian *Life Cycle Assessment Network* (ILCAN), kajian LCA Indonesia saat ini masih dalam tahap pengembangan dan diketahui publikasi ilmiah tentang LCA di Indonesia relatif sedikit dibandingkan negara-negara Asia Tenggara lainnya, khususnya di bidang industri manufaktur. Oleh karena itu, untuk mengetahui dan mengevaluasi sejauh mana dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses produksi *Lysine* sehingga perlu dilakukan kajian secara ilmiah. Tujuan dari penelitian yaitu, untuk mengkaji dampak dari proses produksi *Lysine* dan dapat mengidentifikasi peluang perbaikan pada proses produksi. Metode LCA dilakukan melalui empat tahap yaitu *goal and scope*, *Life Cycle Inventory* (LCI), *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) dan interpretasi hasil dengan menggunakan *software open LCA*. Metode yang digunakan dalam *software* adalah *CML IA Baseline*. Jenis dampak yang dilakukan penilaian, yaitu *Global Warming Potential* (GWP), *eutrofication*, dan *photochemical oxidation*. Dari analisa LCA, dampak terbesar dari produksi *Lysine* adalah *global warming potential* dengan kontribusi 89%. Hal ini dapat terjadi karena dalam prosesnya dibutuhkan *steam* yang dihasilkan dari pembakaran batubara, sehingga dihasilkan gas rumah kaca yang dilepas ke atmosfer. Dalam upaya penurunan dampak lingkungan yang dihasilkan, perusahaan dapat mengoptimasi penggunaan *steam* pada *evaporator* dan *dryer* serta menggunakan metode *Co-Firing* dalam penggunaan bahan bakar untuk menghasilkan *steam*.

Kata kunci: daur hidup, life cycle assessment, lysine

ABSTRACT

Life cycle assessment of industrial production processes in Indonesia shows its success in encouraging industry to carry out environmental management. LCA is a requirement that technically must be fulfilled by the company. Based on information on the Indonesian Life Cycle Assessment Network (ILCAN) website, the Indonesian LCA study is currently still in the development stage and it is known that there are relatively few scientific publications about LCA in Indonesia compared to other Southeast Asian countries, especially in the manufacturing industry. Therefore, to find out and evaluate the extent of the environmental impact resulting from the Lysine production process, a scientific study needs to be carried out. The aim of the research is to examine the impact of the Lysine production process and identify opportunities for improvement in the production process. The LCA method is carried out through four stages, namely goal and scope, Life Cycle Inventory (LCI), Life Cycle Impact Assessment (LCIA) and interpretation of results using open LCA software. The method used in the software is CML IA Baseline. The types of impacts assessed are Global Warming Potential (GWP), eutrophication and photochemical oxidation. From the LCA analysis, the biggest impact of Lysine production is global warming potential with a contribution of 89%. This can happen because the process requires steam produced from burning coal, resulting in greenhouse gases being released into the atmosphere. In an effort to reduce the resulting environmental impact, companies

can optimize the use of steam in evaporators and dryers and use the Co-Firing method in using fuel to produce steam.

Keywords: *life cycle, life cycle assessment, lysine*

1. PENDAHULUAN

Penilaian daur hidup telah menjadi alat penting dalam mendorong industri di Indonesia untuk lebih bertanggung jawab terhadap pengelolaan lingkungan [1]. Kegiatan industri memberikan dampak terhadap perubahan lingkungan, termasuk perubahan kualitas air, tanah, dan udara. Untuk mengurangi polusi dan dampak lingkungan yang terjadi selama siklus hidup produk, metode analisis siklus hidup (LCA) merupakan metode analisis yang tepat [2]. LCA menjadi syarat yang secara teknis harus dipenuhi oleh perusahaan untuk memenuhi dokumen hijau. Dokumen Hijau adalah laporan yang berisi data dan bukti kinerja pengelolaan lingkungan hidup melebihi dari yang diwajibkan [1].

Penilaian Daur Hidup atau Life Cycle Assessment (LCA) berdasarkan SNI ISO 14040:2016 dan SNI ISO 14044:2017 merupakan kompilasi dan evaluasi masukan, keluaran, dan dampak lingkungan potensial dari sistem produk di seluruh daur hidupnya [3]. LCA merupakan metode penilaian lingkungan yang dapat digunakan untuk banyak tujuan dan mampu mencakup berbagai aspek. Selain digunakan oleh pemerintah untuk penilaian dalam kegiatan dibidang pengendalian pencemaran dan/atau kerusakan lingkungan hidup, LCA juga dapat digunakan bagi manajemen perusahaan dalam pengambilan keputusan dengan berbasis data dan fakta terkait keberlanjutan lingkungan didalam proses produksi [4].

Salah satu dari 9 asam amino esensial yang diperlukan makhluk hidup adalah Lysine. Asam amino Lysine berpotensi untuk dikomersialkan karena banyak digunakan pada berbagai bidang. Namun, sebagian besar produksi Lysine digunakan sebagai feed additive. Lysine merupakan jenis asam amino yang mempunyai tingkat pencernaan 98% sehingga mudah diserap dalam saluran pencernaan unggas. Lysine digunakan untuk mensintesis protein yang berhubungan erat dengan pembentukan daging pada tubuh terutama bagian dada ternak unggas. Lysine dicampur dalam pakan untuk meningkatkan laju pertumbuhan, deposisi protein dan lemak [5].

Proses produksi Lysine dapat melalui proses kimia maupun proses biokimia, dimana proses biokimia dikatakan lebih ekonomis meskipun yield yang dihasilkan relatif lebih rendah. Proses fermentasi Lysine merupakan proses utama yang diproduksi menggunakan strain corynebacteria, terutama *Corynebacterium glutamicum*. Selain melalui proses fermentasi, Lysine juga akan melalui proses pemisahan sel dengan sentrifugasi atau ultrafiltrasi, pemisahan dan pemurnian produk, penguapan dan drying [6].

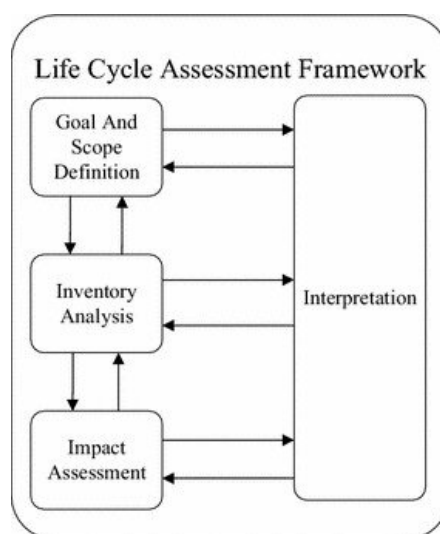
Berdasarkan informasi di website Indonesian Life Cycle Assessment Network (ILCAN), kajian LCA Indonesia saat ini masih dalam tahap pengembangan dan diketahui publikasi ilmiah tentang LCA di Indonesia relatif sedikit dibandingkan negara-negara Asia Tenggara lainnya, khususnya di bidang industri manufaktur [7]. Oleh karena itu, untuk mengetahui dan mengevaluasi sejauh mana dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses produksi Lysine sehingga perlu dilakukan kajian secara ilmiah.

Penilaian daur hidup terhadap suatu produk walaupun produk yang diproduksi sama dapat menghasilkan dampak lingkungan yang berbeda tergantung dari kondisi geografis perusahaan dan pemakaian bahan baku. Berdasarkan uraian tersebut diatas, penulis

melakukan analisa mengenai dampak lingkungan hidup terhadap proses produksi Lysine dengan menggunakan metode Life Cycle Assessment di salah satu perusahaan yang berlokasi di Jawa Timur.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Lokasi penelitian berada di salah satu pabrik yang memproduksi *Lysine* di Jawa Timur. Penelitian ini menggunakan data sekunder milik perusahaan pada periode bulan Januari hingga Desember 2021. Pengolahan dan analisa data menggunakan *software OpenLCA 1.11.0* [8] dengan metode *Life Cycle Assessment*. Perhitungan dampak dilakukan berdasarkan metode *CML IA (baseline)*. Tahapan LCA dibagi menjadi empat tahap, yaitu:



Gambar 1. Tahapan LCA [9]

2.1 Goal and Scope

Penentuan *Goal and Scope* digunakan untuk menentukan tujuan dan ruang lingkup dari penelitian yang dilakukan agar dapat mengetahui data yang dibutuhkan ketika melakukan penilaian daur hidup. Penelitian LCA ini akan menganalisis dampak lingkungan dari proses produksi *Lysine*. Penelitian ini dibatasi dengan sistem *gate-to-gate*, yaitu menentukan dampak lingkungan dari bagian proses produksi *Lysine* dimulai dari pengolahan bahan baku hingga menjadi produk *Lysine*.

2.2 Inventory Analysis

Pada tahap inventori dilakukan untuk menentukan siklus hidup dari produksi *Lysine*. Pengumpulan keseluruhan data *input* dan *output* yang sesuai dengan ruang lingkup yang telah ditentukan. Data yang digunakan berasal dari data sekunder perusahaan yang digambarkan dalam *neraca massa* dan diagram alir.

2.3 Impact Assessment

Pengelompokan dan penilaian tentang dampak lingkungan yang dihasilkan berdasarkan data pada *Life Cycle Inventory*. Dampak lingkungan yang akan dikaji adalah *Global Warming Potential (GWP)*, *Eutrophication Potential (EP)*, dan *photochemical oxidation*. Database yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *CML-IA baseline*.

2.4 Interpretation

Tahapan interpretasi dilakukan berdasarkan hasil dari tahap inventori. Nilai dampak lingkungan yang didapatkan dari proses produksi *Lysine* akan dianalisis proses yang menghasilkan dampak paling tinggi dan akan diberikan saran perbaikan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Tujuan dan Ruang Lingkup LCA

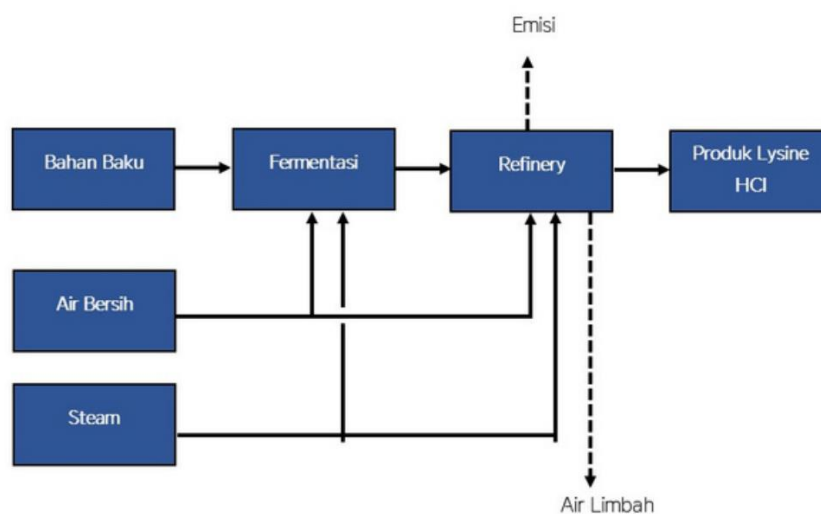
Dalam menentukan tujuan dan ruang lingkup LCA, perlu ditentukan unit fungsional yang dibahas terlebih dahulu. Unit fungsional pada penelitian ini adalah produksi satu ton *Lysine* untuk satu tahun. Tujuan yang akan dicapai adalah mengidentifikasi peluang perbaikan kinerja lingkungan produk pada berbagai titik dalam daur hidupnya sehingga dapat memberikan informasi berbasis data kepada petinggi perusahaan selaku pemberi keputusan dalam pengelolaan lingkungan hidup berdasarkan dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 2021 tentang PROPER. Adapun ruang lingkup yang digunakan dalam metode LCA adalah *gate to gate* dikarenakan produksi *Lysine* yang hanya sebagai bahan *intermediate*, sehingga ruang lingkup hanya dibatasi pada proses produksi.

3.2 Analisis Inventori

Tahap inventori dilakukan berdasarkan data input dan output material pada proses produksi *Lysine*. Data input didapatkan berdasarkan data sekunder milik perusahaan yang terdiri dari bahan baku utama dan bahan pendukung. Data output berupa produk *Lysine*, produk samping, emisi yang dihasilkan akibat proses produksi serta air limbah selama proses produksi.

Bahan baku pembuatan *Lysine* terbagi mejadi 2, bahan baku utama yaitu dalam bentuk *molasses* dan *raw sugar* yang harus dicairkan terlebih dahulu dan bahan baku pendukung sebagai bahan untuk pengendalian pH dan proses *ion exchange*.

Proses produksi *Lysine* secara garis besar terdiri dari 3 tahapan, yaitu proses penyiapan bahan baku, proses fermentasi, dan proses *refinery* (pemurnian).



Gambar 2. Diagram alir proses produksi *Lysine*

Bahan baku yang digunakan sebagian akan melalui proses *liquefaction* (pencairan). Kemudian bahan akan diatur pH dan mengalami proses filtrasi terlebih dahulu sebelum digunakan untuk menghilangkan pengotor-pengotor yang terikut dalam pengangkutan bahan baku. Proses utama pada produksi *Lysine* adalah proses fermentasi yang menggunakan mikroorganisme berupa bakteri *Corynebacterium sp* dan *Breuibacterium sp* [10] dengan jumlah yang sebanding dengan bahan baku yang digunakan. Proses fermentasi dimulai dari tahap *seeding* pada tanki pembibitan. Tujuan *seeding* agar mikroorganisme (bakteri) dapat beradaptasi di dalam media *seeding* sebelum fermentasi dilakukan. Proses *seeding* berlangsung ± 22 jam. Setelah melalui tahapan *seeding*, maka mikroorganisme akan dialirkan ke tangki fermentor untuk dilakukan fermentasi selama ± 43 jam dengan terus menjaga kestabilan proses.

Proses selanjutnya adalah proses *refinery* terdiri dari tahapan pemurnian, yang menggabungkan proses *filtration*, *decolorization*, *dewatering*, *drying*, pengayakan, hingga pengemasan produk. Produk hasil proses fermentasi terdiri dari mikroorganisme mati, sisa media, kotoran dan *Lysine* yang akan diproses lebih lanjut pada membran filter. Setelah melalui proses filtrasi, proses pemurnian berikutnya adalah dekolorisasi. Proses dekolorisasi bertujuan untuk menghilangkan pengotor warna yang terkandung dalam bahan baku, sehingga diperoleh produk kristal berwarna putih. Proses dekolorisasi dilakukan dengan menggunakan *ion exchange* resin. Selanjutnya produk akan dilakukan pencucian dengan menambahkan air dan dilakukan *dewatering*. Pencucian menggunakan air dilakukan untuk melarutkan pengotor yang masih terkandung didalam produk hasil dari proses dekolorisasi. Setelah dilakukan proses pencucian, selanjutnya dilakukan proses *dewatering* menggunakan filterpress yang bertujuan untuk menurunkan kadar air yang terkandung di dalam produk. Selanjutnya akan dilakukan pengeringan pada unit *dryer* yang dilengkapi dengan *shifter*. *Shifter* ini berfungsi untuk memisahkan produk berdasarkan ukuran dengan menggunakan *screen* dengan ukuran tertentu yang akan dilanjutkan ke tahapan *packaging*. Proses pengemasan dilakukan dengan mempertimbangkan faktor-faktor pengaturan RH, kelembaban, ukuran kristal, kemurnian, kontaminasi bakteri, bahan-bahan asing dan spesifik volume.

Sumber air limbah hasil produksi berasal dari air proses produksi yaitu kegiatan fermentasi dan *refinery*, utilitas dan *blowdown boiler*. Air sisa proses umumnya mengandung zat organik (BOD dan COD), minyak, *Ammonia* dan lemak, serta padatan terlarut. Sedangkan emisi pencemaran udara berasal dari penggunaan batubara pada boiler untuk proses pembuatan *steam*. Pada boiler berbahan bakar batubara, pembakaran bahan bakar menghasilkan polutan berupa emisi atmosfer yang dikeluarkan melalui cerobong asap. Gas buang yang dikeluarkan seringkali mengandung polutan berupa partikel (debu) atau berupa gas seperti NO_2 , CO , CO_2 dan SO_2 . Gas buang yang dikeluarkan cerobong asap ke atmosfer, baik dalam bentuk partikel maupun gas, merupakan emisi yang dapat mencemari lingkungan [11]

Tabel 1. Data Input Output Produksi Lysine

Input	Jumlah	Output	Jumlah
Beet Molasses, kg	14.221.290	Lysine, ton	115.876
Cane Molasses, kg	4.435.572	Produk samping, kg	21.912.775
Raw Sugar, kg	233.412.891	Emisi CO ₂ , kg	159.865
Ammonia, kg	37.857.370	Emisi SO ₂ , kg	8,936
Asam Sulfat, kg	70.674	Emisi NO ₂ , kg	200,9
Causic Soda, kg	833.672	Air Limbah, kg	152.882.619

Sumber : Data Sekunder Perusahaan

Data hasil analisis inventori (input dan output) pada proses produksi *Lysine* disajikan pada Tabel 1. Setelah data diperoleh, data dianalisis secara kuantitatif untuk mengetahui dampak lingkungan yang ditimbulkan pada setiap tahapan proses. Dampak lingkungan berfokus pada kategori dampak seperti berikut: *Global Warming Potential* (GWP), *Photochemical Oxidant* dan *Eutrofication Potential* (EP).

3.3 Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Analisis impact atau dampak memiliki tujuan untuk mengevaluasi dampak yang ditimbulkan sehingga berguna sebagai dasar pertimbangan perbaikan proses produksi dan lingkungan industri. Data inventori proses produksi *Lysine* kemudian diolah menggunakan aplikasi *OpenLCA*. Prakiraan dampak lingkungan yang disebabkan oleh proses produksi *Lysine* dihitung menggunakan database *CML-IA Baseline*. Terdapat beberapa hasil yang muncul dari pengolahan data tersebut. Akan tetapi, pada penelitian dan analisis ini hanya potensi *Global Warming Potential* (GWP), *Eutrofication Potential* (EP), dan *photochemical oxidation*.

Tabel 2. Life Cycle Impact Assessment Result

Indikator	Bahan Baku ×10 ⁵	Fermentasi ×10 ⁷	Refinery ×10 ⁸	Utilitas ×10 ⁷	Unit
Global Warming Potential	2.980	2.598	15.466	15.001	kg CO ₂ eq
Eutrophication Potential	17,196	11,568	13,76	115,84	kg PO ₄ --- eq
Photochemical Oxidation	2,444	1,742	3,376	7,703	kg C ₂ H ₄ eq

Sumber : Perhitungan *software openLCA*

Proses produksi *Lysine* terdiri dari tiga tahapan utama, yaitu persiapan bahan baku, fermentasi, dan *refinery*. Diantara ketiga tahapan tersebut, tahapan-tahapan yang menghasilkan emisi paling besar yaitu pada proses *refinery* akibat dari penggunaan *steam* pada evaporasi. Hasil presentase analisis LCIA disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Presentase Hasil Analisis LCIA

Proses	GWP (%)	Eutrofikasi (%)	Photochemical Oxidation (%)
Persiapan Bahan Baku	0,02	0,06	0,06
Fermentasi	1,51	4,36	4,03
Refinery	89,77	51,89	78,10
Utilitas	8,71	43,68	17,82

Sumber : Perhitungan *software openLCA*

Global Warming Potential (GWP) membahas mengenai efek pada suhu di atmosfer yang mulai meningkat [12]. Terdapat beberapa gas yang menjadi pemicu pemanasan global seperti, Karbon dioksida (CO_2), Metana (CH_4), Nitrogen Oksida (NO_x), dan chlorofluorocarbon (CFC). Penyebab dari global warming sendiri yaitu berasal dari gas CO_2 yang dihasilkan gas rumah kaca terhadap pembakaran bahan bakar dalam penyediaan listrik dan *steam*. Pada potensi pemanasan global tertinggi terjadi pada proses *refinery* akibat penggunaan *steam* yang tinggi pada evaporasi dan *dryer*.

Eutrophication adalah konsentrasi dari nutrient kimia yang berada di dalam ekosistem sehingga dapat memicu perkembangan alga secara berlebihan [13]. Dampak lingkungan *eutrophication* terjadi karena disebabkan oleh bahan kimia seperti fosfor, amonia, nitrogen oksida, dan nitrat yang berada di air [12]. Pada potensi eutrofikasi tertinggi terjadi pada proses *refinery* akibat penambahan bahan kimia Ammonia pada tahapan *ion exchanger*. Ammonia ini berperan menggantikan posisi *Lysine* di dalam alat agar *Lysine* dapat keluar menjadi produk yang lebih murni.

Photochemical oxidation disebabkan karena senyawa CO, VOC, dan Nox [14]. Satuan yang digunakan pada dampak ini adalah kg C_2H_4 -eq, satuan tersebut dapat mempresentasikan jumlah dari C_2H_4 yang terbentuk. Metana diproduksi ketika mikroorganisme tertentu memecah bahan organik tanpa adanya udara (anaerobik). Metana mudah terbakar dan menghasilkan karbon dioksida sebagai produk samping [15].

3.4 Interpretasi

Interpretasi merupakan langkah terakhir dalam tahapan LCA. Rencana tindakan yang dihasilkan didasarkan pada hasil interpretasi. Metode analisis untuk mengidentifikasi permasalahan lingkungan adalah analisis kontribusi dan kemudian analisis perbaikan. Tujuan dari analisis kontribusi adalah untuk mengetahui tahapan dalam proses produksi *Lysine* yang memiliki kontribusi paling dominan sehingga pengambilan keputusan dalam menentukan langkah perbaikan menjadi tepat dan efektif. Tabel 2 menjadi dasar pertimbangan untuk menentukan alternatif perbaikan lingkungan. Berdasarkan Tabel 2 terlihat bahwa proses *refinery* memberikan kontribusi terhadap semua dampak lingkungan.

Analisis perbaikan dilakukan berdasarkan hasil analisis kontribusi. Permasalahan utama yang direkomendasikan untuk dilakukan prioritas perbaikan lingkungan adalah optimasi penggunaan *steam* pada evaporator dan *dryer*. Selain itu, konsep *Co-Firing* dengan mencampur biomassa sebagai bahan bakar untuk produksi *steam* juga dapat dilakukan sehingga dapat meminimalisir penggunaan bahan bakar batubara.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian LCA ini meliputi proses persiapan raw material, fermentasi serta *refinery* sampai dihasilkannya produk *Lysine*. Dampak terbesar ada di proses *refinery* dengan jenis dampak *climate change*, *eutrofication*, dan *photochemical oxidation*. Dampak terbesar adalah *Climate Change (Global Warming Potential)* dengan kontribusi 89%. Hal ini dapat terjadi karena dalam prosesnya dibutuhkan *steam* yang dihasilkan dari pembakaran batu bara, sehingga dihasilkan gas rumah kaca yang dilepas ke atmosfer. Dalam upaya penurunan dampak lingkungan yang disebabkan pada proses *refinery*, perusahaan dapat mengevaluasi

dan mengoptimalkan penggunaan *steam* untuk proses *refinery* khususnya pada unit evaporasi dan *dryer*. Penerapan *co-firing* pada proses pembuatan *steam* juga diharapkan dapat menurunkan dampak yang disebabkan penggunaan *steam* pada proses produksi *refinery*.

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah melakukan perhitungan dampak lingkungan pada proses produksi mulai dari hilir ke hulu (*cradle to grave*) sehingga dapat mengetahui dampak lingkungan dari siklus hidup produk secara lengkap.

REFERENSI

- [1] L. Handayani dan E. Hanaseti, "Peranan Penilaian Daur Hidup (Life Cycle Assessment) Dalam Menunjang Perolehan Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan (Proper) Pada Industri Mineral Timah," *Media Ilmu Teknik Lingkungan*, vol. 7, no. 1, hal. 24–31, 2022.
- [2] P. P. Parameswari, M. Yani, dan A. Ismayana, "Penilaian Daur Hidup (Life Cycle Assessment) Produk Kina Di PT Sinkona Indonesia Lestari," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 17, no. 2, hal. 351, 2019.
- [3] A. Brilliantina, A. Adhamatika, E. K. N. Sari, R. Wijaya, D. Triardianto, dan A. Sucipto, "Penerapan Life Cycle Assessment (LCA) Untuk Mengurangi Dampak Lingkungan Pada Proses Produksi Gula Kristal Putih Di Bondowoso," *JUSTER Jurnal Sains dan Terapan*, vol. 2, no. 1, hal. 85–96, 2023.
- [4] Saffira Arlisa Devi dan Mohammad Mirwan, "Analisis Life Cycle Assessment (LCA) pada Proses Produksi Pupuk ZA II Menggunakan Metode Recipe 2016," *INSOLOGI Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 2, no. 3, hal. 620–632, 2023.
- [5] A. Foni, C. V. Lisnahan, dan O. R. Nahak, "the Effect of L-Lysine Hcl Supplementation on the Body Weight Gain, Feed Consumption and Feed Efficiency of Broilers," *Journal of Tropical Animal Science and Technology*, vol. 2, no. 2, hal. 8–16, 2020.
- [6] M. Anusree dan K. M. Nampoothiri, "Biosynthesis, recovery and purification of l-lysine from jackfruit seed (JFS) hydrolysate by *Corynebacterium glutamicum* DM 1729," *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, vol. 4, no. 4, hal. 506–513, 2015.
- [7] M. Chaerul dan V. Allia, "Tinjauan Kritis Studi Life Cycle Assessment (LCA) di Indonesia," *Jurnal Serambi Engineering*, vol. 5, no. 1, hal. 816–823, 2019.
- [8] Y. Arba dan S. Thamrin, "Journal Review: Perbandingan Pemodelan Perangkat Lunak Life Cycle Assessment (LCA) untuk Teknologi Energi," *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 3, no. 2, hal. 142–153, 2022.
- [9] A. Al Afghani, "Environmental Impacts Potential of Natural Gas Production Through Life Cycle Assessment," *Journal of Materials Exploration and Findings*, vol. 3, no. 2, 2024.
- [10] N. J. Tonukari, E. O. Egbune, A. A. Anigboro, dan A. Daniel, "Scientific Research and Essays Production of feed grade L-lysine using solid state fermentation for the Nigerian market," *Academic Journals*, vol. 19, no. 1, hal. 1–6, 2024.
- [11] M. R. Ar-Rasyid, Z. M. Wafa, M. A. Rusedo, dan Z. Raihan, "Perancangan Alat Filter Udara pada Cerobong Asap Boiler Bahan Bakar Batubara," *Jurnal Inovasi Mesin*, vol. 5, no. 2, hal. 1–10, 2023.
- [12] M. Yani, "Kajian Dampak Lingkungan Produk Tepung Agar Menggunakan Metode Life Cycle Assessment (Lca)," *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, vol. 31, no. 3, hal. 343–

- 355, 2021.
- [13] S. R. Adawiah, V. Amalia, dan S. E. Purnamaningtyas, "Analisis Kesuburan Perairan di Daerah Keramba Jaring Apung Berdasarkan Kandungan Unsur Hara (Nitrat dan Fosfat) di Waduk Ir . H . Djuanda Jatiluhur Purwakarta Analysis of Aquatic Fertility in Floating Nets Based on Nutrient (Nitrate and Phosphate) in," *Jurnal Kartika Kimia*, vol. 4, no. 2, hal. 96–105, 2021.
- [14] D. I. luqmana Budiono dan N. Ratni JAR, "Life Cycle Assessment (Lca) Pengolahan Sampah Proses Termal Pada Tempat Pemrosesan Akhir (Tpa) Supit Urang Kota Malang," *EnviroUS*, vol. 1, no. 2, hal. 59–66, 2021.
- [15] R. Pratama dan L. Parinduri, "Penganggulangan Pemanasan Global," *Buletin Utama Teknik.*, vol. 15, no. 1, hal. 91–95, 2019.