



Life Cycle Assessment Aplikasi Pupuk dalam Sistem Pertanian Indonesia: Tinjauan Naratif

Abdul Aziz Setiadi Haryanto¹, Habil Dwi Atmika², Branden Axton Aurelius³, Nirwasita Padmarini Putri Rustadi⁴, Nurhayati^{5*}

^{1,2,3,4} Program Rekayasa Perangkat Lunak, Universitas Prasetiya Mulya, Tangerang, Banten 15339, Indonesia

⁵ Program Teknologi Pangan, Universitas Prasetiya Mulya, Tangerang, Banten 15339, Indonesia

Abstrak: Tinjauan naratif ini bertujuan memberikan gambaran dampak lingkungan penggunaan pupuk dalam sistem pertanian Indonesia melalui studi *life cycle assessment* (LCA) dari segi dampak terhadap iklim dan manusia, serta merekomendasikan agenda penelitian masa depan. Metode penelitian dilakukan secara deskriptif dengan pendekatan tinjauan naratif terhadap 11 studi LCA aplikasi pupuk dalam sistem pertanian meliputi komoditas kelapa sawit, kopi, jagung, rumput laut, sayuran, beras, kakao, dan pisang. Hasil sintesis menunjukkan ketiadaan standar metodologi LCA lokal menyebabkan inkonsistensi hasil dengan ruang lingkup bervariasi (*cradle-to-grave*, *cradle-to-gate*, *gate-to-gate*). Temuan kontradiktif emisi pupuk organik versus sintetis mengindikasikan keberlanjutan sangat bergantung pada konteks agroekologi spesifik seperti topografi. Hanya 4 dari 11 studi yang mengukur dampak kesehatan manusia. Transformasi pertanian berkelanjutan memerlukan pendekatan holistik meliputi pengembangan protokol LCA standar nasional, investasi modal manusia petani, reformulasi subsidi berbasis kinerja, penguatan infrastruktur, penelitian integratif, dan kerangka kebijakan multisektoral sebagai fondasi pertanian Indonesia yang produktif, berkelanjutan, dan berkeadilan.

Kata Kunci: Keberlanjutan, *Life Cycle Assessment*, Pupuk, Pertanian Indonesia

DOI:

<https://doi.org/10.47134/jees.v3i2.1050>

*Correspondence: Nurhayati

Email:

nurhayati@prasetiyamulya.ac.id

Received: 22-12-2025

Accepted: 18-01-2026

Published: 17-02-2026



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: This narrative review aims to provide an overview of the environmental impact of fertilizer use in Indonesian agricultural systems through a life cycle assessment (LCA) study in terms of its impact on the climate and humans, as well as to recommend a future research agenda. The research method was descriptive, using a narrative review approach to 11 LCA studies on fertilizer application in agricultural systems covering palm oil, coffee, corn, seaweed, vegetables, rice, cocoa, and banana commodities. The synthesis results show that the absence of local LCA methodology standards causes inconsistencies in results with varying scopes (*cradle-to-grave*, *cradle-to-gate*, *gate-to-gate*). Contradictory findings on organic versus synthetic fertilizer emissions indicate that sustainability is highly dependent on specific agroecological contexts such as topography. Only 4 of the 11 studies measured human health impacts. The transformation to sustainable agriculture requires a holistic approach that includes the development of national standard LCA protocols, investment in farmer human capital, reformulation of performance-based subsidies, infrastructure strengthening, integrative research, and a multisectoral policy framework as the foundation for productive, sustainable, and equitable Indonesian agriculture

Keywords: Sustainability, Life Cycle Assessment, Fertilizer, Indonesian Agriculture

Pendahuluan

Sebagai sebuah negara agraris, pertanian memegang peranan sentral dalam ketahanan pangan dan pembangunan ekonomi nasional Indonesia. Sektor ini tidak hanya menyediakan pangan pokok bagi sekitar 280 juta penduduk, tetapi juga menyerap tenaga kerja yang tinggi, total 87,31% tenaga kerja informal sektor pertanian pada tahun 2024 (Badan Pusat Statistik, 2025). Upaya peningkatan produktivitas sektor pertanian Indonesia seperti penggunaan pupuk dan insentif lahan yang berdampak positif terhadap sektor tersebut dioptimalkan guna mencapai swasembada pangan serta meningkatkan kesejahteraan petani (Anwar, 2022). Dalam upaya untuk mencapai produktivitas yang lebih tinggi, penggunaan pupuk, baik pupuk sintetik dan pupuk organik, serta menjadi perhatian pemerintah. Sebagai contoh, reportase pada tahun 2021 menyebutkan bahwa alokasi pupuk bersubsidi di Indonesia mencapai 7,76 juta ton (ANTARA News, 2021). Lebih lanjut, pada 2024 pemerintah melalui Pupuk Indonesia (Persero) mencatat penyaluran pupuk bersubsidi hingga 6,6 juta ton hingga akhir November, sekitar 87,7% dari kontrak 7,54 juta ton yang ditargetkan pada tahun tersebut (Pupuk Indonesia, 2024). Subsidi pupuk ini mencerminkan orientasi yang kuat dari pemerintah terhadap insentif budidaya dalam menghadapi keterbatasan lahan serta kebutuhan pangan nasional, sekaligus menunjukkan pentingnya pupuk dalam sistem pertanian Indonesia.

Meski mendorong percepatan produktivitas pertanian, aplikasi pupuk tidak lepas dari berbagai tantangan lingkungan dan sosial. Pengaplikasian pupuk secara berlebihan atau tidak tepat guna terbukti berdampak negatif terhadap kualitas tanah, air, dan atmosfer. Studi menyebutkan bahwa penggunaan pupuk secara intensif oleh petani menyebabkan degradasi kualitas air di wilayah hulu daerah aliran sungai dan merusak lingkungan hidup sungai (Alfarisy et al., 2020). Studi juga menemukan bahwa penggunaan pupuk berpengaruh signifikan terhadap emisi N₂O di sektor pertanian, menunjukkan bahwa peningkatan penggunaan pupuk berkorelasi dengan peningkatan emisi gas rumah kaca (Putri et al., 2025).

Potensi dampak pupuk perlu dinilai dengan metode analisis lingkungan komprehensif seperti *life cycle assessment* (LCA) yang sangat relevan untuk menilai dampak lingkungan pupuk dari seluruh siklus hidup produk pertanian mulai dari pembibitan, persiapan lahan, pertumbuhan, panen, hingga distribusi pasca panen. Studi di Indonesia telah menerapkan LCA untuk menganalisis dampak lingkungan aplikasi pupuk di industri pertanian. Contohnya adalah studi budidaya tanaman yang menghasilkan emisi rumah kaca sebesar 14,1 ton CO₂-ekuivalen/hektar per tahun (Kashyap et al., 2023). Namun, berbagai studi saat ini tersebar pada berbagai ruang lingkup yang cenderung parsial (Adiwinata et al., 2021; Darmawan et al., 2021; Harimurti et al., 2021), dan belum ada tinjauan naratif yang menganalisis fokus studi LCA pada industri pangan. Oleh karena itu, tinjauan naratif ini bertujuan untuk memberikan gambaran mengenai dampak lingkungan penggunaan pupuk dalam sistem pertanian di Indonesia melalui studi LCA dari segi dampak terhadap iklim (emisi gas rumah kaca/*green house gasses emission*, GHG) dan manusia, serta merekomendasikan agenda penelitian untuk studi komprehensif di masa depan. Berbagai Dengan demikian, tinjauan ini diharapkan dapat menjadi landasan bagi

pengembangan studi LCA yang lebih holistik serta mendukung pengambilan kebijakan dan praktek agronomi yang berkelanjutan di sektor pertanian Indonesia.

Metodologi

Metode penelitian ini dilakukan secara deskriptif dengan pendekatan tinjauan naratif, dimana literatur ilmiah yang relevan tentang studi LCA penggunaan pupuk kimia dalam sistem pertanian Indonesia dikumpulkan, dianalisis secara tematik; pencarian dilakukan melalui basis data *Google Scholar* untuk rentang waktu 2020-2025 menggunakan kata kunci "*life cycle assessment*", "*Indonesia*", "*pupuk*", "*fertilizer*", "*agricultural system*", dan "*environmental impact*". Setiap literatur dikumpulkan dan diseleksi untuk memilih artikel yang relevan, yakni melakukan analisis daur hidup terhadap aplikasi pupuk di industri pertanian pada berbagai tahap, sejak kultivasi hingga analisis kontribusi pupuk pada produk pertanian. Diperoleh 11 setiap literatur relevan yang kemudian dianalisis berdasarkan jenis pupuk, ruang lingkup, dampak lingkungan dan manusia, kemudian disintesis secara naratif untuk memetakan pemahaman dan kesenjangan penelitian serta merumuskan rekomendasi agenda penelitian masa depan.

Hasil dan Pembahasan

Tinjauan naratif menghasilkan 11 literatur ilmiah untuk dianalisis lebih lanjut. Aplikasi pupuk dalam sistem pertanian meliputi pupuk sintesis seperti NPK, NPK Phonska, Urea, ZA, SP-36, dan KCl, juga pupuk organik seperti kompos, kotoran unggas, dan pupuk organik cair. Adapun jenis komoditas pertanian yang dibahas pada kesebelas literatur tersebut meliputi kelapa sawit (Harimurti et al., 2021; Rinaldo et al., 2022; Sukmawan et al., 2024), kopi (Adiwinata et al., 2021; Rahmah et al., 2022), jagung (Darmawan et al., 2021), tepung agar dari rumput laut *Gracilaria sp.* (Zuhria et al., 2021), sayuran (Kashyap et al., 2023), beras (Pharmawati et al., 2023), produk turunan kakao (Idawati et al., 2024), dan pisang (Rozaki et al., 2025). Adapun sintesis kesebelas literatur ilmiah disajikan pada tabel 1 berikut.

Tabel 1. Sintesis Temuan LCA Aplikasi Pupuk dalam Sistem Pertanian Indonesia

Jenis Pupuk	Ruang Lingkup	Dampak Terhadap Iklim	Dampak Terhadap Manusia	Referensi
-	<i>Gate-to-gate</i>	113,13 ekuivalen kopi yang diproses	kg-CO ₂ -(eq)/ton -	(Adiwinata et al., 2021)
Urea	<i>Cradle-to-gate</i>	42.787,287 kg CO ₂ -eq/ton	Jagung Pipil -	(Darmawan et al., 2021)
NPK		9.269,7 kg CO ₂ -eq/ton	Jagung Pipil	
Multi-Pupuk	<i>Cradle-to-gate</i>	0,07 Tandan Buah Segar (TBS)/Tahun	TCO ₂ -eq/ton -	(Harimurti et al., 2021)
Urea	<i>Cradle-to-gate</i>	0,0232 tepung agar per tahun	kg-CO ₂ -eq/kg -	(Zuhria et al., 2021)

Jenis Pupuk	Ruang Lingkup	Dampak Terhadap Iklim	Dampak Terhadap Manusia	Referensi
		0,00000450 kg-CH ₄ -eq/kg tepung agar per tahun		
		0,265 kg-N ₂ O-eq/kg tepung agar		
Sistem pupuk organik (tanpa NPK)		0,068 kg CO ₂ -eq/kg kopi	-	
Sistem pupuk organik-sintetik	<i>Cradle-to-gate</i>	0,182 kg CO ₂ -eq/kg kopi	-	(Rahmah et al., 2022)
Sistem pupuk sintetik (tanpa kotoran unggas)		0,496 kg CO ₂ -eq/kg kopi	-	
NPK12:12:17	<i>Cradle-to-gate</i>	63,2 kg CO ₂ -eq/ton <i>Crude Palm Oil</i> (CPO)	-	(Rinaldo et al., 2022)
Multi-Pupuk (Organik & Sintetik)	<i>Cradle-to-gate</i>	14,1 ton CO ₂ -eq/hektar per tahun. 55,3% disumbang oleh pupuk organik dan 28,5% pupuk sintetik.	-	(Kashyap et al., 2023)
Konvensional (675 kg Urea/ZA; 375 kg NPK Phonska)/hektar tahun		4.266,38 kg CO ₂ -eq, kontribusi pupuk 0,06%.	7.345,76 kg 1,4-diklorobenzena (DCB)-eq	
Organik (1.800 kg kompos; 15 liter pupuk organik cair; 1,53 kg pupuk P)/hektar tahun		3.309,94 kg CO ₂ -eq, kontribusi pupuk 0%.	5.693,99 kg 1,4-DCB-eq	
Sistem pengelolaan tanaman terpadu (225 kg Urea; 225 kg SP-36; 300 kg KCl)/hektar tahun	<i>Cradle-to-gate</i>	3.107,90 kg CO ₂ -eq, kontribusi pupuk 0,1%.	5.332,27 kg 1,4-DCB-eq	(Pharmawati et al., 2023)
Sistem intensifikasi padi (30.000 kg kompos; 600 kg Urea, 150 kg SP-36; 300 kg NPK Phonska)/ hektar tahun		2.807,30 kg CO ₂ -eq, kontribusi pupuk 0,06%.	4.785,42 kg 1,4-DCB-eq	

Jenis Pupuk	Ruang Lingkup	Dampak Terhadap Iklim	Dampak Terhadap Manusia	Referensi
NPK	<i>Cradle-to-grave</i>	Total emisi gas rumah kaca sebesar 2,092 kg CO ₂ -eq/kg <i>chocodate cashew</i> . Penggunaan NPK berkontribusi sebesar 0,215 kg CO ₂ -eq atau 10,27%	<i>Human-carcinogenic toxicity: 0,086 kg 1.4-DCB/kg chocodate cashew</i> <i>Human-non-carcinogenic toxicity: 2,084 kg 1.4-DCB/kg chocodate cashew</i>	(Idawati et al., 2024)
NPK 16:16:16	<i>Gate-to-gate</i>	0,054066 kg CO ₂ -eq/bibit kelapa sawit	0,02057 kg 1,4-DCB-eq/bibit kelapa sawit	(Sukmawan et al., 2024)
NPK	<i>Cradle-to-gate</i>	Total emisi gas rumah kaca produksi pisang sebesar 44.800 kg CO ₂ -eq. NPK berkontribusi sebesar 92,3% terhadap total emisi tersebut.	0,0374 <i>disability-adjusted life years</i> (DALY)	(Rozaki et al., 2025)

Berdasarkan tabel 1, dapat diketahui bahwa ruang lingkup studi LCA masing-masing literatur terbagi menjadi *cradle-to-grave*, *cradle-to-gate*, dan *gate-to-gate*. Ruang lingkup dalam studi LCA merupakan batasan analisis yang disebabkan oleh adanya keterbatasan analisis sejak awal hingga akhir siklus hidup. Analisis siklus hidup dalam LCA meliputi analisis sumber daya hingga akhir (*cradle-to-grave*), analisis bahan baku hingga siap distribusi (*cradle-to-gate*), dan analisis selama proses (*gate-to-gate*) (Abraham, 2017). Selain itu, faktor konversi dampak pada setiap studi berasal dari sumber sekunder yang berbeda. Hal ini menyebabkan hasil analisis pada komoditas pertanian yang sama tidak bisa dibandingkan secara langsung, karena menerapkan standar atau acuan yang berbeda-beda. Dibutuhkan standar lokal yang mengakomodir kondisi sebenarnya sistem pertanian Indonesia untuk memberikan pemahaman komprehensif mengenai dampak lingkungan dari aplikasi pupuk pada sistem pertanian, sehingga pengambilan keputusan lebih tepat guna.

Sintesis literatur menunjukkan temuan kontradiktif penggunaan pupuk organik dan sintetis. Studi oleh Rahmah et al. (2022) menunjukkan bahwa aplikasi pupuk organik menghasilkan emisi lebih rendah dibandingkan sistem organik-sintetis dan sintetis, masing-masing 0,068 kg CO₂-eq, 0,182 kg CO₂-eq, dan 0,496 kg CO₂-eq. Hal ini juga didukung oleh studi Pharmawati et al., 2023 yang menemukan bahwa dalam berbagai sistem, budidaya padi secara organik menghasilkan total emisi yang lebih rendah dibanding budidaya konvensional. Namun, studi Kashyap et al. (2025) justru menunjukkan sebaliknya; pupuk organik menyumbang 55,3% total emisi, sementara pupuk sintetis menyumbang 28,5%. Selain dipengaruhi oleh faktor konversi, Kashyap et al. (2023) menjelaskan bahwa topografi miring area pertanian dengan laju erosi yang tinggi menyebabkan tanah tidak mampu menahan nutrisi, menyebabkan

penurunan efektivitas pupuk sehingga dibutuhkan aplikasi pupuk organik dalam jumlah besar oleh para petani sayur. Hal ini didukung oleh studi yang menyebutkan bahwa area miring seperti lereng rentan kehilangan unsur hara (Wang et al., 2019). Kondisi tersebut menunjukkan efek buruk dari rendahnya efektivitas penggunaan pupuk, bahkan pupuk organik yang dikenal lebih ramah lingkungan dibandingkan pupuk sintetik. Dibutuhkan manajemen area pertanian lahan miring yang memadai, seperti jenis tanaman yang layak ditanam di lokasi tersebut, kombinasi dengan tanaman berakar kuat, atau penerapan sistem terasering (Chen et al., 2024), mengingat sayuran memiliki akar dangkal yang tidak memiliki kemampuan baik dalam menahan unsur hara dari erosi.

Dampak aplikasi pupuk dalam berbagai sistem pertanian Indonesia pada tabel 1 menunjukkan minimnya perhatian dampak terhadap kesehatan manusia, terutama petani. Hanya 4 dari 11 literatur yang mengukur dampak terhadap manusia. (Pharmawait et al., 2023; Idawati et al., 2024; Sukmawan et al., 2024) mengukur toksisitas terhadap manusia dalam metrik 1,4-diklorobenzena ekuivalen. 1,4-diklorobenzena merupakan senyawa organik aromatik terklorinasi yang berbahaya bagi manusia. Paparan senyawa ini menyebabkan iritasi, kerusakan sistem saraf, hingga kanker (Hsiao et al., 2009). Namun, nilai yang dilaporkan cenderung sulit dijadikan acuan implementasi di lapangan karena tidak ada parameter yang menunjukkan level bahaya pada angka tertentu. Selain itu, metrik *disability-adjusted life years* yang dianalisis pada produksi pisang oleh Rozaki et al. (2025) menunjukkan nilai 0,0374 DALY. Apabila dikonversi, dapat diketahui bahwa pada setiap ton produksi pisang, pekerja kehilangan 14 hari hidup sehat. Hal ini menunjukkan bahwa tidak hanya emisi gas rumah kaca, aplikasi pupuk yang tidak efektif juga menyebabkan pekerja di sektor pertanian rentan terhadap berbagai masalah kesehatan. Metrik DALY ini cenderung lebih tegas dalam menekankan efek buruk terhadap manusia, sehingga penyesuaian metrik dan parameter juga perlu menjadi perhatian dalam studi sejenis.

Simpulan

Tinjauan naratif terhadap 11 studi LCA aplikasi pupuk dalam sistem pertanian Indonesia menunjukkan bahwa peningkatan produktivitas tidak dapat dicapai hanya melalui insentif pupuk saja. Ketiadaan standar metodologi LCA local menyebabkan inkonsistensi hasil dengan ruang lingkup yang variatif, mempersulit pengambilan keputusan. Temuan kontradiktif emisi pupuk organik dan sintetik mengindikasikan bahwa keberlanjutan sangat bergantung pada konteks agroekologi spesifik seperti topografi, tidak hanya jenis pupuk yang digunakan. Minimnya perhatian terhadap dampak kesehatan bagi manusia dengan metrik yang tegas mencerminkan bias penelitian yang mengabaikan kesejahteraan pekerja sektor pertanian. Diperlukan transformasi yang tidak hanya terbatas pada subsidi pupuk, tetapi juga investasi terhadap pekerja di sektor pertanian. Selain itu, diperlukan pengembangan protocol LCA standar nasional dengan basis data faktor emisi spesifik yang memperhatikan dampak kesehatan manusia. Penelitian di masa depan disarankan melakukan analisis berdasarkan daur hidup aplikasi pupuk pada sistem pertanian seperti pendekatan integratif melalui studi longitudinal, *integrated assessment* dimensi lingkungan-ekonomi-sosial, *participatory action research* yang melibatkan petani,

eksplorasi teknologi digital untuk monitoring *real-time*, dan *true cost accounting* untuk menghitung eksternalitas sistem pertanian intensif terhadap kesehatan dan lingkungan sebagai fondasi pertanian Indonesia yang produktif, berkelanjutan, dan berkeadilan.

Referensi

- Abraham, M. A. (Ed.). (2017). *Encyclopedia of sustainable technologies*. Elsevier.
- Adiwinata, F., Suprihatin, S., & Rahayuningsih, M. (2021). Analisis daur hidup (life cycle assessment) pengolahan kopi bubuk robusta secara basah di industri kecil menengah (IKM) Beloe Klasiik Lampung. *Agrointek : Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 15(4), 1175–1182. <https://doi.org/10.21107/agrointek.v15i4>
- Alfarisy, F., Kustiawan, Andriyani, I., & Bowo, C. (2020). Evaluation of water quality due to the use of intensive fertilizer on farmer level in the upstream of Bedadung Jember Watershed, East Java, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 7(4), 2301–2312. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2020.074.2301>
- ANTARA News. (2021). *7.76 million tons subsidized fertilizers distributed in 2021: Ministry*. https://en.antaranews.com/amp/news/213145/776-million-tons-subsidized-fertilizers-distributed-in-2021-ministry?utm_source=chatgpt.com
- Anwar, A. (2022). The determinant of agriculture development in Indonesia. *Jurnal Kebijakan Ekonomi Dan Keuangan*, 153–164. <https://doi.org/10.20885/JKEK.vol1.iss2.art2>
- Badan Pusat Statistik. (2025). *Persentase tenaga kerja informal sektor pertanian (persen), 2024*. <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/MTE3MSMy/persentase-tenaga-kerja-informal-sektor-pertanian--persen-.html>
- Chen, D., Wei, W., Chen, L., Ma, B., & Li, H. (2024). Response of soil nutrients to terracing and environmental factors in the Loess Plateau of China. *Geography and Sustainability*, 5(2), 230–240. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2024.01.006>
- Darmawan, M. I., Ilmannafian, A. G., & Kiptiah, M. (2021). Kajian life cycle assessment (LCA): Cradle to gate pertanian jagung pakan di kelompok tani desa bajuin, Kabupaten Tanah Laut. *EnviroScientiae*, 17(3), 178–185. <http://dx.doi.org/10.20527/es.v17i3.11889>
- Harimurti, D., Hariyadi, H., & Noor, E. (2021). Pengurangan emisi gas rumah kaca pada perkebunan kelapa sawit dengan pendekatan life cycle assessment. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*, 11(1), 1–9. <https://doi.org/10.29244/jpsl.11.1.1-9>
- Hsiao, P.-K., Lin, Y.-C., Shih, T.-S., & Chiung, Y.-M. (2009). Effects of occupational exposure to 1,4-dichlorobenzene on hematologic, kidney, and liver functions. *International*

Archives of Occupational and Environmental Health, 82(9), 1077–1085.
<https://doi.org/10.1007/s00420-009-0398-5>

Idawati, I., Sasongko, N. A., Santoso, A. D., Sani, A. W., Apriyanto, H., & Boceng, A. (2024). Life cycle assessment of cocoa farming sustainability by implementing compound fertilizer. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 10(2), 837–856.
<https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.02.26>

Kashyap, D., De Vries, M., Pronk, A., & Adiyoga, W. (2023). Environmental impact assessment of vegetable production in West Java, Indonesia. *Science of The Total Environment*, 864, 160999. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160999>

Pharmawati, K., Wahyuningsih, S., & Cahyaningrum, H. (2023). Life cycle assessment of rice farming practices in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1275(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1275/1/012019>

Pupuk Indonesia. (2024). *Entering the planting season, Pupuk Indonesia distributes 6,6 million tons of subsidized fertilizer*. https://www.pupuk-indonesia.org/media-info/detail/632/masuk-musim-tanam-pupuk-indonesia-sudah-salurkan-66-juta-ton-pupuk-bersubsidi.html?utm_source=chatgpt.com

Putri, M. A., Karimi, S., Ridwan, E., & Muharja, F. (2025). Fertilizer use, deforestation, and energy consumption: Key drivers of nitrous oxide emissions in Indonesia. *Discover Sustainability*, 6(1), 411. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01290-x>

Rahmah, D. M., Putra, A. S., Ishizaki, R., Noguchi, R., & Ahamed, T. (2022). A life cycle assessment of organic and chemical fertilizers for coffee production to evaluate sustainability toward the energy–environment–economic Nexus in Indonesia. *Sustainability*, 14(7), 3912. <https://doi.org/10.3390/su14073912>

Rinaldo, R., Suprihatin, S., & Yani, M. (2022). Life cycle assessment produksi crude palm oil (CPO) (studi kasus: PT X Provinsi Bengkulu). *Agrointek : Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 17(3), 651–659. <https://doi.org/10.21107/agrointek.v17i3.17131>

Rozaki, Z., Hartanto, M. I. R., Triyono, Rahmawati, N., Man, N., Ardila, R. A., Ariffin, A. S., Raml, M. F., & Santoso, W. I. (2025). Assessing the environmental impacts of banana farming in Yogyakarta special region using life cycle assessment (LCA). *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 20(1), 159–167.
<https://doi.org/10.18280/ijdne.200117>

Sukmawan, Y., Dewi, R., Riniarti, D., Agusta, H., & Sudradjat, S. (2024). Evaluasi dampak lingkungan pada pembibitan kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) dengan pendekatan penilaian daur hidup. *Jurnal Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 11(2), 64–72. <https://doi.org/10.21776/ub.jsal.2024.011.02.2>

-
- Wang, W., Wu, X., Yin, C., & Xie, X. (2019). Nutrition loss through surface runoff from slope lands and its implications for agricultural management. *Agricultural Water Management*, 212, 226–231. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.007>
- Zuhria, S., Aminatu, Indrasti, N., Siswi, & Yani, M. (2021). Kajian dampak lingkungan produk tepung agar menggunakan metode life cycle assessment (LCA). *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 31(3), 343–355. <https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2021.31.3.343>