



**SAKALIMA**  
**PILAR PEMBERDAYAAN MASYARAKAT PENDIDIKAN**  
**VOL 2. NO. 2 (2025)**

ISSN: 3064-2361

## **Pemanfaatan Sabun Eco-Enzyme sebagai Media Pemberdayaan dan Edukasi Lingkungan Berkelanjutan**

**Ernilawati✉, dan Siti Munawarah Panggabean✉**

**To cite this article** Erlinawati, dan S. M. Panggabean. “Pemanfaatan Sabun Eco-Enzyme sebagai Media Pemberdayaan dan Edukasi Lingkungan Berkelanjutan” *SAKALIMA: Pilar Pemberdaya. Masy. Pendidik.*, vol. 2, no. 2, pp. 36–46, 2025.  
<https://doi.org/10.70211/sakalima.v2i1.293>

### **To link to this article:**



Published online: Oct. 10, 2025



Submit your article to this journal



View crossmark data



# Pemanfaatan Sabun *Eco-Enzyme* sebagai Media Pemberdayaan dan Edukasi Lingkungan Berkelanjutan

Ernilawati<sup>1\*</sup>; Siti Munawarah Panggabean<sup>2</sup>

Received : July 23, 2025

Revised : August 29, 2025

Accepted : October 02, 2025

Online : October 10, 2025

## Abstract

This study investigates the utilization of eco-enzyme soap as a medium for empowerment and sustainable environmental education, addressing the growing need for community-based approaches to environmental awareness and waste management in developing regions. Grounded in the principles of Education for Sustainable Development (ESD), the research aimed to explore how eco-enzyme soap production can function as both an educational innovation and a tool for socio-environmental empowerment. A participatory action research (PAR) design was employed, involving 25 purposively selected participants consisting of postgraduate students, teachers, and local community members in Palembang, Indonesia. Data were collected through observation, semi-structured interviews, and participatory workshops, then analyzed thematically using Braun and Clarke's six-phase framework. The results reveal that the eco-enzyme initiative enhanced environmental literacy, strengthened community collaboration, and generated economic value through small-scale entrepreneurship while simultaneously reducing household waste. Participants demonstrated improved understanding of scientific concepts such as fermentation and enzyme activity, along with increased awareness of sustainable living and collective responsibility. The findings confirm that eco-enzyme projects not only serve as effective pedagogical models integrating theory and practice but also promote empowerment through active engagement, leadership, and gender-inclusive participation. This study concludes that the integration of eco-enzyme production into educational and community programs provides a transformative framework for linking environmental science, social innovation, and sustainability. The implications emphasize that eco-enzyme initiatives can be institutionalized as scalable models for green education and local empowerment, informing policy development, curriculum innovation, and future research on community-based sustainability practices across diverse socio-educational contexts.

**Keywords:** Child Nutrition, Collaborative Efforts, Participatory Action, Stunting Prevention

## Publisher's Note:

WISE Pendidikan Indonesia stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright:

©

2025 by the author(s).

License WISE Pendidikan Indonesia, Bandar Lampung, Indonesia. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-ShareAlike (CC BY 4.0) license.

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

VOL. 2 NO. 2 2025

P-ISSN: 2656-4735



**SAKALIMA**  
PILAR PEMBERDAYAAN MASYARAKAT PENDIDIKAN



## PENDAHULUAN

Degradasi lingkungan yang semakin cepat akibat limbah plastik, polutan kimia, dan praktik produksi yang tidak berkelanjutan telah menimbulkan kekhawatiran besar terhadap keseimbangan ekologi dan kesehatan masyarakat di seluruh dunia. Data global terkini memperkirakan bahwa lebih dari 300 juta ton limbah plastik diproduksi setiap tahun, dengan kurang dari 10% yang berhasil didaur ulang secara efektif [1]–[3]. Di Indonesia, pengelolaan limbah organik dan non-biodegradable yang tidak tepat masih menjadi salah satu penyebab utama pencemaran air dan tanah, yang mengancam ekosistem serta kesejahteraan masyarakat [4]–[6]. Tantangan-tantangan ini menegaskan urgensi inovasi berkelanjutan yang mampu menjembatani kesadaran lingkungan, pendidikan, dan pemberdayaan masyarakat. Dalam kerangka tersebut, produk berbasis *eco-enzyme* khususnya sabun *eco-enzyme* muncul sebagai alternatif ramah lingkungan yang mampu mengurangi limbah kimia rumah tangga sekaligus mendorong praktik keberlanjutan berbasis komunitas [7], [8].

Eco-enzyme adalah larutan bio katalitik yang dihasilkan melalui proses fermentasi limbah organik seperti kulit buah dan sayuran, gula, serta air, yang menghasilkan agen pembersih alami mengandung asam asetat dan enzim bermanfaat. Penelitian terkini menunjukkan bahwa sabun eco-enzyme memiliki sifat antimikroba yang kuat, biaya produksi yang rendah, serta jejak ekologis yang minimal, sehingga menjadikannya sarana potensial untuk mendorong pendidikan lingkungan dan gaya hidup berkelanjutan [9]–[11]. Dari perspektif pendidikan, produksi dan pemanfaatan *eco-enzyme* mendorong pembelajaran berbasis pengalaman (*experiential learning*), memungkinkan mahasiswa dan masyarakat terlibat secara langsung dalam praktik keberlanjutan sekaligus menginternalisasi nilai-nilai ekologis [12]. Integrasi proyek eco-enzyme ke dalam program pendidikan sejalan dengan gerakan global *Education for Sustainable Development* (ESD), yang menekankan pembelajaran berbasis praktik langsung, tanggung jawab etis, dan inovasi sosial-lingkungan [13], [14].

Pada tingkat komunitas, produksi sabun eco-enzyme berfungsi sebagai media pendidikan lingkungan berbasis pemberdayaan, di mana transfer pengetahuan dan kewirausahaan saling beririsan untuk menciptakan mata pencaharian yang berkelanjutan. Inisiatif semacam ini tidak hanya berkontribusi terhadap pengurangan limbah, tetapi juga merangsang perekonomian lokal melalui model usaha mikro [15]–[17]. Selain itu, dengan melibatkan kelompok-kelompok marjinal terutama perempuan dan pelajar dalam produksi eco-enzyme, masyarakat dapat menumbuhkan inklusi sosial serta tanggung jawab kolektif terhadap pelestarian lingkungan [2], [18]. Pendekatan partisipatif ini mencerminkan paradigma *Action Research* dan *Community Based Learning* (CBL), yang menekankan pemberdayaan melalui partisipasi aktif, refleksi, serta pemecahan masalah lokal [19]–[21].

Meskipun praktik eco-enzyme semakin banyak diterapkan dalam konteks pendidikan dan komunitas, sebagian besar penelitian yang ada masih bersifat terfragmentasi terfokus pada aspek kimia-biologis produk eco-enzyme atau potensi ekonominya dalam pengelolaan limbah. Hanya sedikit penelitian yang menyoroti peran integratif sabun *eco-enzyme* sebagai alat pedagogis untuk pendidikan keberlanjutan sekaligus sebagai media pemberdayaan masyarakat. Selain itu, riset empiris mengenai bagaimana inisiatif *eco-enzyme* dapat mentransformasi perilaku masyarakat, hasil belajar, dan kesadaran sosial-lingkungan terutama di wilayah berkembang seperti Indonesia masih sangat terbatas [22]–[24].

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan mengkaji pemanfaatan sabun eco-enzyme sebagai media pemberdayaan dan pendidikan lingkungan berkelanjutan. Secara khusus, penelitian ini berupaya menganalisis bagaimana produksi sabun eco-enzyme dapat berfungsi ganda: pertama, sebagai inovasi praktis dalam mengurangi limbah organik dan kimia; kedua, sebagai platform edukatif dan sosial yang menumbuhkan literasi lingkungan, ketahanan ekonomi, serta keterlibatan kolaboratif masyarakat. Melalui perspektif integratif ini, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi konseptual dan empiris terhadap diskursus pendidikan berkelanjutan dan pengelolaan lingkungan berbasis komunitas, sekaligus menyelaraskan praktik pemberdayaan lokal dengan agenda keberlanjutan global seperti *Sustainable Development Goals* (SDGs) khususnya Tujuan 4 (Pendidikan Berkualitas), 6 (Air Bersih dan Sanitasi Layak), 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab), dan 13 (Penanganan Perubahan Iklim).

## METODOLOGI

### *Desain Penelitian*

Penelitian ini menggunakan desain Participatory Action Research (PAR) untuk meneliti pemanfaatan sabun eco-enzyme sebagai media pemberdayaan dan pendidikan lingkungan berkelanjutan. Pendekatan PAR dipilih karena mengintegrasikan penelitian, refleksi, dan aksi dalam kerangka kolaboratif yang memberdayakan partisipan untuk ikut menciptakan pengetahuan sekaligus menanggapi tantangan lingkungan nyata [25]–[27]. Penelitian ini dilaksanakan dalam konteks pendidikan komunitas di Palembang, Indonesia, dengan melibatkan kolaborasi antara mahasiswa pascasarjana, pendidik lokal, dan anggota masyarakat yang aktif dalam inisiatif lingkungan. Partisipan dipilih secara *purposive* berdasarkan keterlibatan aktif mereka dalam kegiatan pengelolaan limbah dan pemberdayaan pendidikan, sehingga sampel mencerminkan beragam perspektif mengenai penerapan eco-enzyme dan pembelajaran keberlanjutan.

Pengumpulan data dilakukan melalui tiga teknik yang saling melengkapi observasi, wawancara semi-terstruktur, dan lokakarya partisipatif untuk menangkap dimensi pengalaman dan refleksi dalam pembelajaran komunitas. Selama tahap intervensi, para partisipan dilatih untuk memproduksi sabun *eco-enzyme* menggunakan limbah buah dan sayur, tetes tebu (molasses), serta air dengan prosedur ramah lingkungan. Proses ini tidak hanya menghasilkan produk pembersih ramah lingkungan, tetapi juga berfungsi sebagai model pedagogis yang menghubungkan konsep-konsep ilmiah seperti fermentasi dan biokimia dengan tanggung jawab terhadap lingkungan. Data observasi mendokumentasikan keterlibatan, perubahan perilaku, dan pemecahan masalah kolaboratif partisipan sepanjang proyek berlangsung.

Wawancara digunakan untuk menggali persepsi partisipan mengenai pemberdayaan, kesadaran lingkungan, serta dampak sosial-ekonomi dari pemanfaatan *eco-enzyme*. Seluruh data ditranskrip secara verbatim dan dianalisis secara tematik menggunakan kerangka enam tahap Braun dan Clarke [28]: familiarization, coding, theme development, review, definition, dan reporting untuk mengidentifikasi pola berulang dalam dimensi pendidikan, lingkungan, dan sosial-ekonomi. Untuk meningkatkan kredibilitas dan keandalan penelitian, dilakukan triangulasi dengan memverifikasi silang data dari berbagai sumber, sedangkan member checking digunakan untuk memastikan ketepatan interpretasi [29], [30]. Prinsip-prinsip etika

dijaga selama penelitian, dengan memperoleh informed consent dari semua partisipan serta menjamin kerahasiaan dan partisipasi sukarela sesuai dengan standar etika penelitian sosial. Secara keseluruhan, kerangka metodologis ini memungkinkan eksplorasi yang ketat dan kontekstual tentang bagaimana produksi sabun *eco-enzyme* berfungsi tidak hanya sebagai inovasi berkelanjutan secara lingkungan, tetapi juga sebagai alat pendidikan transformatif yang mendorong pemberdayaan, literasi ilmiah, dan pengelolaan lingkungan berbasis komunitas.

### **Populasi dan Sampel Penelitian**

Populasi penelitian ini terdiri atas anggota masyarakat dan pendidik yang terlibat dalam kegiatan pendidikan dan pemberdayaan lingkungan di Bandar Lampung, Indonesia. Secara khusus, penelitian ini menargetkan individu yang secara aktif berpartisipasi dalam pengelolaan limbah berbasis komunitas, program pembelajaran lingkungan, serta proyek-proyek berorientasi keberlanjutan di lembaga pendidikan lokal dan kelompok masyarakat sekitar. Dari populasi tersebut, dipilih sampel purposive sebanyak 25 partisipan, yang terdiri atas 10 mahasiswa, 5 guru sekolah yang terlibat dalam kegiatan pendidikan lingkungan, serta 10 perwakilan masyarakat termasuk ibu rumah tangga, relawan muda, dan tokoh lokal.

Pemilihan sampel didasarkan pada prinsip information-rich sampling [31]–[33], yang memastikan bahwa partisipan memiliki pengalaman langsung serta wawasan reflektif mengenai pemanfaatan *eco-enzyme* baik sebagai alat edukatif maupun sarana pemberdayaan. Komposisi ini memungkinkan pemahaman yang multidimensional tentang bagaimana proyek sabun *eco-enzyme* dapat menjembatani pendidikan formal dengan aksi komunitas. Ukuran sampel ditentukan berdasarkan prinsip saturasi data, yaitu pengumpulan data dilakukan hingga tidak muncul tema baru selama proses analisis [31], [33], [34]. Strategi pengambilan sampel yang purposive namun beragam ini menjamin keterwakilan dari berbagai perspektif pendidikan, sosial, dan gender, sehingga mampu menangkap dinamika pembelajaran, partisipasi, dan pemberdayaan yang tertanam dalam inisiatif *eco-enzyme*.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Hasil**

#### **1. Pemberdayaan melalui Inisiatif Eco-Enzyme Berbasis Komunitas**

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengenalan produksi sabun *eco-enzyme* secara signifikan meningkatkan pemberdayaan masyarakat melalui partisipasi aktif, pemecahan masalah kolaboratif, dan tumbuhnya rasa tanggung jawab bersama terhadap lingkungan. Para partisipan melaporkan meningkatnya kesadaran akan pengelolaan limbah serta motivasi yang lebih tinggi untuk menerapkan praktik ramah lingkungan di rumah dan lingkungan sekitar. Melalui lokakarya partisipatif, anggota masyarakat terutama perempuan dan pemuda memperoleh keterampilan praktis dalam memproduksi sabun *eco-enzyme* menggunakan bahan limbah organik. Temuan ini sejalan dengan prinsip *Education for Sustainable Development* (ESD) yang menekankan pembelajaran berbasis pengalaman dan partisipasi transformatif [35]–[37].



**Gambar 1.** Produk Sabun *Eco Enzyme*

Selain itu, proses pemberdayaan mencerminkan siklus Action Research refleksi, aksi, dan evaluasi yang menunjukkan bahwa ketika komunitas ikut menciptakan pengetahuan, mereka lebih mungkin mempertahankan perubahan perilaku dan sikap menuju keberlanjutan. Studi serupa juga menegaskan bahwa proyek lingkungan partisipatif berkontribusi terhadap pemberdayaan kognitif dan sosial-ekonomi, sebagaimana terlihat dalam program waste-to-product di Indonesia dan Asia Tenggara [1], [38], [39].

## **2. Transformasi Pendidikan melalui Pembelajaran Berbasis Pengalaman**

Inisiatif sabun eco-enzyme terbukti menjadi alat pendidikan yang efektif karena mengintegrasikan konsep ilmiah, etika lingkungan, dan pembelajaran berbasis praktik langsung. Selama implementasi, peserta tidak hanya mempelajari proses biokimia fermentasi dan aktivitas enzim, tetapi juga mengembangkan keterampilan berpikir kritis, kolaborasi, dan pemecahan masalah. Guru dan siswa merefleksikan bahwa produksi eco-enzyme menjembatani kesenjangan antara pembelajaran sains teoretis dan tantangan keberlanjutan nyata. Temuan ini sejalan dengan penelitian global yang menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis pengalaman dan inkuiri meningkatkan pemahaman konseptual serta keterlibatan sipil dalam pendidikan lingkungan [40]–[42]. Sejalan dengan visi UNESCO tentang pendidikan

berorientasi keberlanjutan, penelitian ini menunjukkan bahwa proyek *eco-enzyme* berfungsi sebagai laboratorium hidup yang mengintegrasikan literasi lingkungan, pembelajaran berbasis nilai, dan penyelidikan ilmiah. Pendekatan ini juga menumbuhkan keterampilan abad ke-21 seperti inovasi, kerja sama tim, dan etika lingkungan kompetensi penting untuk mencapai *Sustainable Development Goals* (SDGs) [43], [44].

### 3. Dampak Sosial Ekonomi dan Kesadaran Lingkungan

Salah satu hasil paling signifikan dari program *eco-enzyme* adalah kontribusinya yang ganda terhadap konservasi lingkungan dan penghidupan masyarakat. Para peserta melaporkan bahwa dengan mengolah limbah organik menjadi sabun *eco-enzyme*, mereka mampu mengurangi volume limbah rumah tangga sekitar 25-30% per bulan. Lebih lanjut, beberapa peserta memulai usaha kecil sabun *eco-enzyme* yang menghasilkan pendapatan tambahan bagi keluarga. Hasil ini menunjukkan potensi pendidikan berbasis *eco-enzyme* dalam mengaitkan keberlanjutan dengan kewirausahaan, sejalan dengan konsep *ecopreneurship* sebagai penggerak inovasi hijau dan pemberdayaan ekonomi [40], [41], [45]. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Flippas et al., [46], yang mencatat bahwa usaha mikro ramah lingkungan berkontribusi terhadap pengentasan kemiskinan dan ketahanan lokal. Selain itu, refleksi peserta menunjukkan peningkatan literasi lingkungan dan komitmen lebih kuat terhadap upaya pengelolaan limbah kolektif indikasi bahwa transformasi pengetahuan telah mengarah pada transformasi perilaku. Konvergensi antara kesadaran ekologis dan produktivitas ekonomi ini menegaskan potensi integratif proyek *eco-enzyme* sebagai model pembangunan berkelanjutan berbasis komunitas.

#### Pembahasan

Integrasi sabun *eco-enzyme* sebagai media edukasi dan pemberdayaan merepresentasikan model transformatif untuk keterlibatan komunitas berkelanjutan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa inisiatif *eco-enzyme* berfungsi pada tiga tingkat yang saling berhubungan: kognitif (pembelajaran berbasis sains), perilaku (praktik ramah lingkungan), dan sosial ekonomi (penciptaan pendapatan). Model triadik ini mencerminkan visi holistik pendidikan berkelanjutan, di mana pengetahuan dan tindakan berpadu untuk menghasilkan perubahan sosial yang bermakna. Temuan ini memperkuat hasil penelitian sebelumnya yang menekankan pentingnya integrasi proyek keberlanjutan dalam kerangka pendidikan komunitas sebagai sarana untuk meningkatkan inovasi lokal dan ketahanan masyarakat [47]–[49].

Kebaruan penelitian ini terletak pada fungsi ganda produksi *eco-enzyme* sebagai alat pedagogis sekaligus sarana pemberdayaan, yang mengintegrasikan pembelajaran lingkungan berbasis biokimia dengan inovasi sosial partisipatif. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang lebih berfokus pada aspek kimia lingkungan atau efisiensi pengelolaan limbah, penelitian ini menunjukkan bahwa produksi sabun *eco-enzyme* mampu menjadi katalis bagi pemberdayaan melalui pendidikan dan kolaborasi. Selain itu, desain partisipatif memastikan bahwa pendidikan lingkungan bukan sekadar proses *top down*, melainkan upaya bersama yang digerakkan oleh masyarakat. Dari perspektif teoretis, penelitian ini memperluas paradigma *Education for Sustainable Development* (ESD) dengan menempatkan inisiatif *eco-enzyme* sebagai platform untuk pembelajaran berbasis nilai, praktik reflektif, dan transformasi sosial. Secara praktis, penelitian ini memberikan kerangka kerja aplikatif bagi pembuat kebijakan,

pendidik, dan lembaga swadaya masyarakat (LSM) dalam mengembangkan program keberlanjutan berbasis komunitas yang mengintegrasikan pengetahuan ilmiah, pemberdayaan, dan kewirausahaan.

Namun demikian, penelitian ini juga mengakui beberapa keterbatasan. Penelitian dilakukan dalam konteks lokal sehingga mungkin belum sepenuhnya mewakili keberagaman kondisi sosial-ekonomi di seluruh wilayah Indonesia. Selain itu, perubahan perilaku jangka panjang dan dampak lingkungan belum diukur secara kuantitatif, yang membatasi generalisasi temuan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan desain longitudinal dan mixed-method guna mengevaluasi keberlanjutan hasil pemberdayaan serta potensi replikasi pendidikan berbasis *eco-enzyme* di berbagai daerah.

## KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa pemanfaatan sabun *eco-enzyme* sebagai media pemberdayaan dan pendidikan lingkungan berkelanjutan memberikan model transformatif untuk mengintegrasikan kesadaran lingkungan, literasi sains, dan pengembangan komunitas. Pendekatan *Participatory Action Research* (PAR) menunjukkan bahwa inisiatif *eco-enzyme* secara efektif meningkatkan tanggung jawab lingkungan, mendorong kolaborasi yang inklusif gender, serta menumbuhkan potensi kewirausahaan di kalangan anggota masyarakat. Di luar manfaat ekologisnya, proyek *eco-enzyme* berfungsi sebagai alat pendidikan yang dinamis, menjembatani pengetahuan teoretis dalam sains dengan praktik keberlanjutan nyata, selaras dengan agenda global *Education for Sustainable Development* (ESD) dan *Sustainable Development Goals*.

Temuan penelitian ini menegaskan peran penting pembelajaran berbasis pengalaman dan partisipasi masyarakat dalam menumbuhkan perubahan perilaku dan sikap terhadap pengurangan limbah, efisiensi sumber daya, serta kepedulian terhadap lingkungan. Secara teoretis, penelitian ini memperluas pemahaman tentang pemanfaatan *eco-enzyme* sebagai mekanisme ganda sekaligus sarana pemberdayaan dan pendidikan dengan menawarkan kerangka interdisipliner yang menghubungkan sains lingkungan, inovasi sosial, dan pedagogi berbasis nilai. Secara praktis, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan kebijakan dan pendidikan dengan menyoroti pentingnya integrasi program *eco-enzyme* ke dalam kurikulum, pelatihan guru, serta inisiatif pemberdayaan lokal. Meskipun penelitian ini terbatas pada satu konteks komunitas, hasilnya memberikan model yang dapat direplikasi dan disesuaikan untuk mempromosikan pembelajaran berorientasi keberlanjutan dan ketangguhan sosial lingkungan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas cakupan melalui analisis longitudinal dan komparatif guna menilai dampak jangka panjang, potensi skalabilitas, serta relevansi lintas budaya dari program pemberdayaan berbasis *eco-enzyme* di berbagai konteks pendidikan dan komunitas.

## INFORMASI PENULIS

### *Penulis Koresponden*

**Ernilawati** – Program Pasca Sarjana Pendidikan Biologi, Universitas Muhammadiyah Palembang (Indonesia);

Email: [watiernila392@gmail.com](mailto:watiernila392@gmail.com)

### Penulis

**Ernilawati** – Program Pasca Sarjana Pendidikan Biologi, Universitas Muhammadiyah Palembang (Indonesia);

Email: [watiernila392@gmail.com](mailto:watiernila392@gmail.com)

**Siti Munawarah Panggabean** – Program Studi Agrikultur, Universitas Negeri Manado (Indonesia)

Email: [sitipanggabean@unima.ac.id](mailto:sitipanggabean@unima.ac.id)

## KONFLIK KEPENTINGAN

"Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan."

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] F.-C. Mihai et al., "Plastic Pollution, Waste Management Issues, and Circular Economy Opportunities in Rural Communities," *Sustainability*, vol. 14, no. 1, p. 20, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su14010020>
- [2] R. Kumar et al., "Impacts of Plastic Pollution on Ecosystem Services, Sustainable Development Goals, and Need to Focus on Circular Economy and Policy Interventions," *Sustainability*, vol. 13, no. 17, p. 9963, Sep. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su13179963>
- [3] H. Jiao et al., "A critical review on plastic waste life cycle assessment and management: Challenges, research gaps, and future perspectives," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 271, p. 115942, Feb. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.115942>
- [4] M. A. Fayshal, "Current practices of plastic waste management, environmental impacts, and potential alternatives for reducing pollution and improving management," *Heliyon*, vol. 10, no. 23, p. e40838, Dec. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40838>
- [5] M. Nuruzzaman, M. M. Bahar, and R. Naidu, "Diffuse soil pollution from agriculture: Impacts and remediation," *Sci. Total Environ.*, vol. 962, p. 178398, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178398>
- [6] A. Correia and M. Rasteiro, "A Review of Persistent Soil Contaminants: Assessment and Remediation Strategies," *Environments*, vol. 12, no. 7, p. 229, Jul. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/environments12070229>
- [7] M. Gundlapalli and S. Ganesan, "Polyhydroxyalkanoates (PHAs): Key Challenges in production and sustainable strategies for cost reduction within a circular economy framework," *Results Eng.*, vol. 26, p. 105345, Jun. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105345>
- [8] N. K. Sarker and P. Kaparaju, "Microalgal Bioeconomy: A Green Economy Approach Towards Achieving Sustainable Development Goals," *Sustainability*, vol. 16, no. 24, p. 11218, Dec. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su162411218>
- [9] A. M. Martins and J. M. Marto, "A sustainable life cycle for cosmetics: From design and development to post-use phase," *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 35, p. 101178, Oct. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101178>
- [10] V.-M.-L. Nguyen, A. Ndao, E. C. Peterson, J.-F. Blais, and K. Adjallé, "Bacillus Species: Evolving Roles in Bio-Based Detergents," *Processes*, vol. 13, no. 6, p. 1885, Jun. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/pr13061885>
- [11] F. Sultana et al., "Seaweed farming for food and nutritional security, climate change

- mitigation and adaptation, and women empowerment: A review," *Aquac. Fish.*, vol. 8, no. 5, pp. 463–480, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2022.09.001>
- [12] K. Fiel'ardh, I. Fardhani, and H. Fujii, "Integrating Perspectives from Education for Sustainable Development to Foster Plant Awareness among Trainee Science Teachers: A Mixed Methods Study," *Sustainability*, vol. 15, no. 9, p. 7395, Apr. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su15097395>
- [13] L.-C. Hung and H.-J. Pan, "Innovative Approach to ESD Integration into School-Based Curriculum Development Modules for Elementary Schools," *Sustainability*, vol. 17, no. 4, p. 1427, Feb. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su17041427>
- [14] M. Perello-Marín, G. Ribes-Giner, and O. P. Díaz, "Enhancing Education for Sustainable Development in Environmental University Programmes: A Co-Creation Approach," *Sustainability*, vol. 10, no. 1, p. 158, Jan. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su10010158>
- [15] R. Raman, T. A. Alka, M. Suresh, and P. Nedungadi, "Social entrepreneurship and sustainable technologies: Impact on communities, social innovation, and inclusive development," *Sustain. Technol. Entrep.*, vol. 4, no. 3, p. 100110, Sep. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.stae.2025.100110>
- [16] S. Purnomo and S. Purwandari, "A Comprehensive Micro, Small, and Medium Enterprise Empowerment Model for Developing Sustainable Tourism Villages in Rural Communities: A Perspective," *Sustainability*, vol. 17, no. 4, p. 1368, Feb. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su17041368>
- [17] P. A. Kusumawardhany, I. Baihaqi, and P. D. Karningsih, "Frugal innovation framework for micro-entrepreneurs' sustainable performance: From design thinking approach," *J. Open Innov. Technol. Mark. Complex.*, vol. 11, no. 3, p. 100616, Sep. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2025.100616>
- [18] R. K. Adom, G. A. Afuye, A. M. Kalumba, and M. D. Simatele, "Integrating the Perspectives of Youth, Women, and Marginalised Communities in Addressing Global Environmental Management Challenges," *Environ. Manage.*, Aug. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00267-025-02254-7>
- [19] S. Chowdhury and A. Alzarrad, "Advancing Community-Based Education: Strategies, Challenges, and Future Directions for Scaling Impact in Higher Education," *Trends High. Educ.*, vol. 4, no. 2, p. 21, May 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/higheredu4020021>
- [20] C. Castaño et al., "Developing Sustainability Competencies Through Active Learning Strategies Across School and University Settings," *Sustainability*, vol. 17, no. 19, p. 8886, Oct. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su17198886>
- [21] L. J. Livingston, "Partnerships in pandemics: tracing power relations in community engaged scholarship in food systems during COVID-19," *Agric. Human Values*, vol. 40, no. 1, pp. 217–229, Mar. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10460-022-10349-8>
- [22] T. Rahman et al., "Navigating the contemporary landscape of food waste management in developing countries: A comprehensive overview and prospective analysis," *Heliyon*, vol. 10, no. 12, p. e33218, Jun. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33218>
- [23] A. Rahman et al., "Current scenario and potential of waste cooking oil as a feedstock for biodiesel production in Indonesia: Life cycle sustainability assessment (LCSA) review," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 11, p. 101067, Jun. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.101067>
- [24] M. Alaghemandi, "Sustainable Solutions Through Innovative Plastic Waste Recycling Technologies," *Sustainability*, vol. 16, no. 23, p. 10401, Nov. 2024. [Online]. Available:

- <https://doi.org/10.3390/su162310401>
- [25] M. P. Poto, P. Urteaga-Crovetto, and J. Hayden-Nygren, "Effective participation in a sustainability transition that leaves no one behind," *Environ. Sci. Policy*, vol. 165, p. 104001, Mar. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2025.104001>
  - [26] C. McGrath et al., "Enacting the Principles of Participatory Action Research (PAR): Reflections From the Initial Stages of a Project With Older Adults With Vision Loss," *Int. J. Qual. Methods*, vol. 24, Mar. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/16094069251330143>
  - [27] M.-D. Podar, "Attempting a participatory action research (PAR) dissertation with refugee women during the COVID-19 pandemic or: How I learned to embrace messiness and failure," *SSM - Qual. Res. Heal.*, vol. 5, p. 100389, Jun. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ssmqr.2023.100389>
  - [28] J. A. Canibel, A. A. Gelbolingo, and M. C. A. Montañez, "Narratives of Male Struggle Against Patriarchy in Select Filipino Literary Works," *k@ta*, vol. 26, no. 2, pp. 161–176, Dec. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.9744/kata.26.2.161-176>
  - [29] S. K. Ahmed, "The pillars of trustworthiness in qualitative research," *J. Med. Surgery, Public Heal.*, vol. 2, p. 100051, Apr. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.glmedi.2024.100051>
  - [30] J. Hanson-DeFusco, "What data counts in policymaking and programming evaluation - Relevant data sources for triangulation according to main epistemologies and philosophies within social science," *Eval. Program Plann.*, vol. 97, p. 102238, Apr. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2023.102238>
  - [31] S. K. Ahmed, "Sample size for saturation in qualitative research: Debates, definitions, and strategies," *J. Med. Surgery, Public Heal.*, vol. 5, p. 100171, Apr. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.glmedi.2024.100171>
  - [32] R. B. Bouncken, W. Czakon, and F. Schmitt, "Purposeful sampling and saturation in qualitative research methodologies: recommendations and review," *Rev. Manag. Sci.*, Mar. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11846-025-00881-2>
  - [33] S. Rahimi and M. Khatooni, "Saturation in qualitative research: An evolutionary concept analysis," *Int. J. Nurs. Stud. Adv.*, vol. 6, p. 100174, Jun. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijnsa.2024.100174>
  - [34] W. Daher, "Saturation in Qualitative Educational Technology Research," *Educ. Sci.*, vol. 13, no. 2, p. 98, Jan. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/educsci13020098>
  - [35] A. R. R. Fernando and G. P. Tajan, "Education for sustainable development (ESD) through participatory research (PR): A systematic review," *J. Clean. Prod.*, vol. 482, p. 144237, Dec. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144237>
  - [36] R. Hu and S. Mou, "Outdoor Education for Sustainable Development: A Systematic Literature Review," *Sustainability*, vol. 17, no. 8, p. 3338, Apr. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su17083338>
  - [37] M. O'Grady, "Transformative education for sustainable development: A faculty perspective," *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 27, no. 9, pp. 20745–20761, Jul. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03609-y>
  - [38] M. R. Ferdoush et al., "Unraveling the challenges of waste-to-energy transition in emerging economies: Implications for sustainability," *Innov. Green Dev.*, vol. 3, no. 2, p. 100121, Jun. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.igd.2023.100121>
  - [39] A. N. Dang, B. M. Jackson, R. Benavidez, and S. A. Tomscha, "Review of ecosystem service assessments: Pathways for policy integration in Southeast Asia," *Ecosyst. Serv.*, vol. 49, p. 101266, Jun. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101266>
  - [40] M. B. Thomas, A. Muscat, A. Zuccolo, C. N. Luguetti, and A. Watt, "Navigating

- Pedagogical Innovation in Higher Education: Education Academics' Experiences with Active and Inquiry-Based Learning in Intensive Teaching," *Innov. High. Educ.*, May 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10755-025-09807-y>
- [41] M. Baptista, A. S. Pinho, and A. R. Alves, "Students' Learning for Action Through Inquiry-Based Science Education on a Local Environmental Problem," *Sustainability*, vol. 17, no. 9, p. 3907, Apr. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su17093907>
- [42] D. L. Morris, "Rethinking Science Education Practices: Shifting from Investigation-Centric to Comprehensive Inquiry-Based Instruction," *Educ. Sci.*, vol. 15, no. 1, p. 73, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/educsci15010073>
- [43] F. Muñoz-La Rivera et al., "The Sustainable Development Goals (SDGs) as a Basis for Innovation Skills for Engineers in the Industry 4.0 Context," *Sustainability*, vol. 12, no. 16, p. 6622, Aug. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su12166622>
- [44] D. T. K. Ng et al., "Teachers' AI digital competencies and twenty-first century skills in the post-pandemic world," *Educ. Technol. Res. Dev.*, vol. 71, no. 1, pp. 137–161, Feb. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11423-023-10203-6>
- [45] J. Teshera-Levy, I. Alam, L. Corwin, and J. M. Dauer, "Developing a conceptual model for students' scientific civic engagement self-concept," *Int. J. Sci. Educ.*, pp. 1–22, Feb. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/09500693.2024.2449220>
- [46] F. K. Zisopoulos et al., "Informal recyclers as stakeholders in a circular economy," *J. Clean. Prod.*, vol. 415, p. 137894, Aug. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137894>
- [47] S. Ankareddy, G. Dorfleitner, L. Zhang, and Y. S. Ok, "Embedding sustainability in higher education institutions: A review of practices and challenges," *Clean. Environ. Syst.*, vol. 17, p. 100279, Jun. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2025.100>
- [48] A. G. Abo-Khalil, "Integrating sustainability into higher education: Challenges and opportunities for universities worldwide," *Heliyon*, vol. 10, no. 9, p. e29946, May 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29946>
- [49] A. Uzorka, O. Akiyode, and S. M. Isa, "Strategies for engaging students in sustainability initiatives and fostering a sense of ownership and responsibility towards sustainable development," *Discov. Sustain.*, vol. 5, no. 1, p. 320, Oct. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00505-x>