



AGROPROSS
National Conference
Proceedings of Agriculture

Prosiding
Seminar dan Bimbingan Teknis Pertanian Politeknik Negeri Jember 2026
Pertanian Masa Depan Indonesia 2045 : Transformasi Teknologi, Ketahanan Pangan dan Adaptasi terhadap Tantangan Global
3 Juni 2026

Publisher:
Agropross, National Conference Proceedings of Agriculture
E-ISSN: 2964-0172
DOI:

Eco-Enzyme Berbasis Bahan Lokal untuk Pertanian Rawa Lebak Ramah Lingkungan

Eco-Enzyme Based on Local Ingredients for Environmentally Friendly Lowland Swamp Farming

Author(s): Deni Saputra*, Edward Saleh, Primayoga Harsana Setiyadji, Melly Kusuma Dewanti

Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya

*Corresponding author: deni.tep@fp.unsri.ac.id

ABSTRAK

Pertanian rawa lebak di Kecamatan Pemulutan masih menunjukkan ketergantungan yang tinggi terhadap pupuk kimia, dalam jangka panjang berpotensi menimbulkan tekanan terhadap kualitas lahan dan lingkungan pertanian. Salah satu alternatif yang dapat diarahkan untuk mendukung pertanian yang lebih ramah lingkungan adalah pemanfaatan Eco-enzyme berbasis bahan lokal sebagai pupuk organik. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan strategi pemanfaatan Eco-enzyme berbasis bahan lokal dalam mendukung pertanian rawa lebak yang lebih ramah lingkungan di Kecamatan Pemulutan. Penelitian dilaksanakan pada bulan Desember 2024 sampai Maret 2025 di Kecamatan Pemulutan, Kabupaten Ogan Ilir, Provinsi Sumatera Selatan. Metode yang digunakan meliputi gap analysis, analisis SWOT, studi pustaka, pengamatan lapangan, dan Analytical Hierarchy Process (AHP). Parameter yang diamati meliputi pengetahuan petani tentang pupuk organik, penggunaan pupuk oleh petani, potensi lahan pertanian, serta faktor pendukung dan penghambat pertanian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa strategi Strength-Opportunity (SO) merupakan alternatif strategi dengan bobot tertinggi. Hasil AHP menunjukkan bahwa skenario yang paling realistis adalah skenario optimis, dengan sasaran prioritas berupa petani membuat pupuk organik sendiri menggunakan bahan yang tersedia lokal. Strategi prioritas yang diperoleh adalah pendampingan kelompok tani untuk membuat pupuk organik yang dapat dijual kepada petani lain, diikuti oleh penyuluhan rutin tentang pupuk organik dan kesadaran petani mengenai manfaat pupuk organik untuk keberlanjutan pertanian. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Eco-enzyme berbasis bahan lokal dapat diarahkan sebagai alternatif pupuk organik untuk mendukung pengurangan bertahap ketergantungan terhadap pupuk kimia dan pengembangan pertanian rawa lebak yang lebih ramah lingkungan.

Kata Kunci:

Bahan lokal;
Eco-enzyme;
Pertanian
ramah
lingkungan;
Pupuk organik;
Rawa lebak

Keywords:

Eco-enzyme;
Environmentall
y friendly
agriculture;
Fertilizer;

ABSTRACT

Lowland swamp agriculture in Pemulutan District still shows a high dependence on chemical fertilizers, which in the long term may place pressure on land quality and the agricultural environment. One alternative that can be promoted to support more environmentally friendly agriculture is the use of Eco-enzyme made from local materials as an organic fertilizer. This study aims to determine strategies for utilizing local-material-based Eco-enzyme to support more environmentally friendly lowland swamp agriculture in Pemulutan District. The study was conducted from December 2024 to



AGROPROSS
National Conference
Proceedings of Agriculture

Prosiding

Seminar dan Bimbingan Teknis Pertanian Politeknik Negeri Jember 2026
Pertanian Masa Depan Indonesia 2045 : Transformasi Teknologi, Ketahanan Pangan dan Adaptasi terhadap Tantangan Global
3 Juni 2026

Publisher:

Agropross, National Conference Proceedings of Agriculture

E-ISSN: 2964-0172

DOI:

Local materials;

Organic lowland swamp

March 2025 in Pemulutan District, Ogan Ilir Regency, South Sumatra Province. The methods used included gap analysis, SWOT analysis, literature review, field observation, and the Analytical Hierarchy Process (AHP). The observed parameters included farmers' knowledge of organic fertilizers, farmers' fertilizer use, agricultural land potential, and supporting and inhibiting factors in agriculture. The results showed that the Strength–Opportunity (SO) strategy was the strategic alternative with the highest weight. The AHP results indicated that the most realistic scenario was the optimistic scenario, with the priority target being farmers producing their own organic fertilizer using locally available materials. The priority strategy identified was assisting farmer groups in producing organic fertilizer that could be sold to other farmers, followed by regular extension activities on organic fertilizers and raising farmers' awareness of the benefits of organic fertilizers for agricultural sustainability. The findings of this study indicate that local-material-based Eco-enzyme can be promoted as an alternative organic fertilizer to support the gradual reduction of dependence on chemical fertilizers and the development of more environmentally friendly lowland swamp agriculture.

PENDAHULUAN

Pertanian merupakan sektor strategis dalam penyediaan pangan, sehingga keberhasilan budidaya sangat dipengaruhi oleh ketersediaan input produksi, salah satunya pupuk. Dalam sistem padi dataran rendah, pemupukan berperan penting dalam menyediakan unsur hara untuk menunjang pertumbuhan dan peningkatan hasil tanaman. Namun, efektivitas pemupukan sangat ditentukan oleh kesesuaian pengelolaan hara dengan kondisi lahan, karakteristik ekosistem, dan sistem budidaya setempat (Becker et al., 2023; Beltran-Garcia et al., 2021). Oleh karena itu, penggunaan pupuk tidak hanya perlu dipahami sebagai upaya meningkatkan produksi, tetapi juga sebagai bagian dari pengelolaan lahan pertanian yang berkelanjutan.

Pada praktik pertanian modern, pupuk kimia masih menjadi pilihan utama petani karena dianggap praktis, mudah diaplikasikan, cepat tersedia bagi tanaman, dan mampu memberikan respons pertumbuhan yang relatif cepat. Dalam sistem pertanian intensif, termasuk padi dataran rendah, pupuk mineral tetap

menjadi input penting untuk mempertahankan produktivitas, terutama ketika petani mengejar peningkatan hasil pada kondisi keterbatasan pengetahuan, teknologi, atau input pendukung lainnya (Becker et al., 2023; Dincă et al., 2022; Ren et al., 2021). Meskipun demikian, penggunaan pupuk kimia secara terus-menerus, berlebihan, atau tidak berimbang dapat menimbulkan persoalan jangka panjang. Sejumlah kajian menunjukkan bahwa penggunaan pupuk mineral, terutama nitrogen, dapat menyebabkan pengasaman tanah, perubahan sifat biologis tanah, penurunan aktivitas enzimatis, gangguan komunitas mikroba, serta penurunan kualitas tanah. Selain itu, kehilangan nitrogen dari pupuk juga berpotensi mencemari air permukaan dan air tanah, sehingga persoalan pemupukan tidak hanya berkaitan dengan produktivitas, tetapi juga kualitas lingkungan pertanian (Bijay-Singh & Craswell, 2021; Dincă et al., 2022; Howe et al., 2024; Krasilnikov et al., 2022; Zhang et al., 2024).

Permasalahan tersebut menjadi semakin penting pada pertanian rawa lebak

karena karakteristik lahannya menuntut pengelolaan yang lebih hati-hati. Sistem padi dataran rendah tadah hujan di Asia, yang secara ekologis memiliki kedekatan dengan pertanian rawa lebak, dapat mengalami genangan berlebih pada sebagian musim dan defisit air pada periode lain. Kondisi ini menyebabkan produktivitas dan stabilitas hasil sangat dipengaruhi oleh pengelolaan air dan hara yang spesifik lokasi (Becker et al., 2023; Panda & Barik, 2021; Yuan et al., 2021).

Kondisi tersebut relevan dengan pertanian di Kecamatan Pemulutan, Kabupaten Ogan Ilir, yang didominasi oleh budidaya padi pada kawasan rawa lebak. Petani di wilayah ini masih menjadikan pupuk kimia sebagai input utama karena dianggap mampu memberikan hasil yang cepat dan instan. Ketergantungan tersebut diperkuat oleh keterbatasan pengetahuan petani mengenai dampak jangka panjang penggunaan pupuk kimia, belum optimalnya adopsi pengelolaan kesuburan tanah yang berimbang, serta adanya dukungan input seperti pupuk subsidi dalam berbagai konteks pertanian. Selain itu, peningkatan intensitas tanam dari satu kali menjadi dua hingga tiga kali dalam setahun berpotensi meningkatkan penggunaan pupuk kimia dan memperbesar tekanan terhadap kualitas lahan apabila tidak diimbangi dengan manajemen pemupukan yang adaptif (Becker et al., 2023; Fan & Yang, 2024; Yuan et al., 2021; Zheng et al., 2022).

Di tengah tingginya ketergantungan terhadap pupuk kimia, diperlukan alternatif pemupukan yang tidak hanya memenuhi kebutuhan hara tanaman, tetapi juga mendukung keberlanjutan lahan dan lingkungan. Salah satu alternatif yang dapat dikembangkan adalah Eco-enzyme berbasis bahan lokal. Eco-enzyme merupakan cairan hasil fermentasi bahan organik, terutama sisa buah dan sayuran, dengan gula atau molase dan air. Bahan bakunya yang mudah

dijumpai menjadikan Eco-enzyme relevan dikembangkan pada skala rumah tangga maupun komunitas tani (Benny et al., 2023; Pasalari et al., 2024). Pemanfaatan Eco-enzyme juga sejalan dengan gagasan pertanian sirkular, yaitu mengubah limbah organik rumah tangga, pasar, dan pertanian menjadi input bernilai bagi sistem budidaya. Literatur mutakhir menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah organik sebagai sumber pupuk atau bahan pembenah tanah semakin penting untuk mengurangi ketergantungan pada pupuk mineral, menekan jejak lingkungan input pertanian, serta mendukung sistem pertanian yang lebih tangguh (Hidalgo et al., 2025; Mandal et al., 2024).

Meskipun demikian, Eco-enzyme perlu ditempatkan sebagai alternatif strategis yang berpotensi dikembangkan, bukan sebagai teknologi yang efektivitas agronomisnya telah terbukti seragam pada semua kondisi. Hal ini karena bukti lapangan mengenai manfaat langsung Eco-enzyme masih perlu diperkuat, meskipun beberapa studi menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam pengomposan, pembenahan tanah, dan pengelolaan limbah organik (Benny et al., 2023; Pasalari et al., 2024).

Dalam konteks Kecamatan Pemulutan, pengembangan Eco-enzyme penting karena berorientasi pada pemanfaatan bahan lokal dan peningkatan kemandirian petani dalam membuat pupuk organik. Namun, penerapannya masih menghadapi kendala berupa keterbatasan pengetahuan petani mengenai manfaat, cara pembuatan, dan cara aplikasinya. Petani juga cenderung menilai pupuk kimia lebih unggul karena memberikan respons cepat, sedangkan pupuk organik dipersepsikan bekerja lebih lambat dan memiliki ketidakpastian hasil (Liao et al., 2025; Panday et al., 2024; Yang et al., 2024). Oleh karena itu, pengembangan Eco-enzyme tidak cukup dilakukan melalui pengenalan konsep, tetapi

memerlukan peningkatan literasi ekologis, pelatihan praktis, serta dukungan penyuluhan yang berkelanjutan. Dengan demikian, penelitian ini penting dilakukan untuk mendorong pemanfaatan Eco-enzyme berbasis bahan lokal sebagai alternatif pupuk organik yang lebih ramah lingkungan, adaptif terhadap kondisi rawa lebak, dan mendukung keberlanjutan pertanian padi di Kecamatan Pemulutan.

Berdasarkan kondisi pertanian rawa lebak di Kecamatan Pemulutan yang masih didominasi penggunaan pupuk kimia, serta adanya kebutuhan untuk mengembangkan sistem pemupukan yang lebih ramah lingkungan, penelitian ini diarahkan pada upaya perumusan strategi yang realistis dan sesuai dengan kondisi lapangan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan strategi pemanfaatan Eco-enzyme berbasis bahan lokal dalam mendukung pertanian rawa lebak yang lebih ramah lingkungan di Kecamatan Pemulutan. Secara khusus, penelitian ini diarahkan untuk mengidentifikasi kesenjangan antara kondisi aktual dan kondisi yang diharapkan, merumuskan faktor internal dan eksternal yang memengaruhi pemanfaatan Eco-enzyme, serta menetapkan prioritas strategi yang paling realistis untuk diterapkan di tingkat petani.

BAHAN DAN METODE

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Kecamatan Pemulutan, Kabupaten Ogan Ilir, Sumatera Selatan. Lokasi dipilih karena didominasi rawa lebak dan budidaya padi sawah, serta masih bergantung pada pupuk kimia, sehingga relevan untuk kajian Eco-enzyme berbasis bahan lokal. Lokasi penelitian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Kecamatan Pemulutan, Kabupaten Ogan Ilir.

Penelitian berlangsung pada Desember 2024 hingga Maret 2025, meliputi persiapan, pengumpulan data, identifikasi faktor internal-eksternal, serta analisis strategi melalui gap analysis, SWOT, dan AHP.

2.2 Pendekatan Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif-strategis untuk merumuskan strategi pemanfaatan Eco-enzyme berbasis bahan lokal bagi pertanian rawa lebak ramah lingkungan. Pendekatan deskriptif menggambarkan penggunaan pupuk, masalah petani, dan faktor penerapan pupuk organik, sedangkan pendekatan strategis menyusun arah tindakan berdasarkan kondisi internal-eksternal.

Penelitian ini bukan percobaan lapang untuk menguji pengaruh Eco-enzyme terhadap pertumbuhan tanaman, sifat tanah, atau hasil panen. Fokusnya ialah mengidentifikasi kesenjangan kondisi aktual dan harapan, faktor adopsi Eco-enzyme, serta prioritas strategi sesuai kondisi petani dan lingkungan rawa lebak.

Pelaksanaan penelitian memadukan gap analysis, SWOT, studi pustaka, pengamatan lapangan, dan AHP agar kajian tidak hanya menjelaskan masalah, tetapi juga menghasilkan rekomendasi terarah.

2.3 Sumber Data dan Teknik Pengumpulan Data

Data diperoleh melalui studi pustaka, survei dan pengamatan lapangan, wawancara, serta kuesioner. Kombinasi ini digunakan untuk memahami penggunaan pupuk, potensi Eco-enzyme berbasis bahan lokal, dan faktor penerapannya di tingkat petani.

Studi pustaka membangun landasan konseptual dan mendukung identifikasi masalah. Survei serta pengamatan lapangan digunakan untuk mengetahui kondisi aktual pertanian, terutama pola penggunaan pupuk, ketergantungan pada pupuk kimia, dan peluang pemanfaatan bahan organik lokal.

Wawancara menggali pengetahuan petani, kebiasaan pemupukan, dan hambatan adopsi pupuk organik. Kuesioner SWOT menjaring persepsi petani terhadap faktor internal-eksternal, sedangkan kuesioner AHP digunakan ahli untuk menilai prioritas strategi.

2.4 Parameter Penelitian

Parameter penelitian membatasi ruang lingkup pengamatan agar data sesuai dengan tujuan penelitian. Parameter tidak diarahkan pada pengujian langsung Eco-enzyme terhadap tanaman, tetapi pada aspek peluang penerapannya di tingkat petani.

Parameter meliputi pengetahuan petani tentang pupuk organik, penggunaan pupuk, potensi lahan, serta faktor pendukung dan penghambat pertanian.

2.5 Tahapan Analisis

Data dianalisis bertahap melalui gap analysis, SWOT, dan AHP. Tahapan ini digunakan untuk mengidentifikasi kesenjangan, merumuskan faktor strategis, menyusun alternatif, dan menetapkan prioritas strategi pemanfaatan Eco-enzyme.

2.5.1 Gap analysis

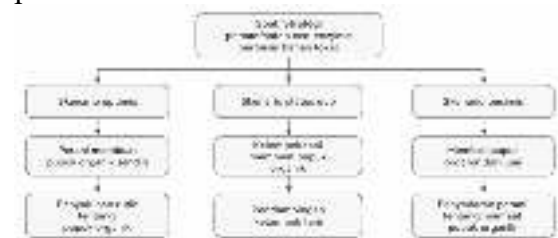
Gap analysis membandingkan kondisi aktual dan kondisi yang diharapkan terkait pemanfaatan Eco-enzyme. Aspek analisis mencakup pemanfaatan pupuk organik berbasis Eco-enzyme, tujuan penggunaan, pengetahuan dan keterampilan petani, penggunaan pupuk kimia, sumber daya, dukungan kebijakan, dan kesadaran lingkungan.

2.5.2 Analisis SWOT

Analisis SWOT mengidentifikasi faktor strategis pengembangan Eco-enzyme berbasis bahan lokal. Faktor dibedakan menjadi internal dan eksternal, kemudian dikombinasikan untuk menyusun alternatif strategi SO, WO, ST, dan WT.

2.5.3 Analytical Hierarchy Process (AHP)

AHP digunakan sebagai tahap akhir untuk menentukan prioritas strategi dari alternatif hasil SWOT. Strukturnya disusun dalam hierarki goal, skenario, sasaran, dan alternatif strategi, sebagaimana disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hirarki AHP strategi pemanfaatan Eco-enzyme.

2.6 Alur Penelitian

Alur penelitian memperlihatkan keterkaitan proses sejak identifikasi masalah hingga penetapan prioritas strategi. Penyajian alur diperlukan agar strategi dipahami sebagai hasil proses sistematis.

Tahapan penelitian meliputi survei awal, persiapan, pengambilan data, serta pengolahan dan analisis data. Alur lengkap disajikan pada Gambar 3, sedangkan tahapan dan keluaran disajikan pada Gambar 4.



Gambar 3. Alur penelitian

Tabel 4. Alur penelitian dan keluaran tiap tahap

Tahap penelitian	Kegiatan utama	Keluaran
Survei awal	Identifikasi kondisi wilayah, penggunaan pupuk, dan masalah lapangan	Gambaran awal kondisi penelitian
Persiapan penelitian	Penyusunan instrumen, parameter, dan kebutuhan pengumpulan data	Instrumen dan rancangan pengumpulan data
Pengambilan data	Studi pustaka, observasi, wawancara, dan kuesioner	Data primer dan sekunder penelitian
Pengolahan dan analisis data	Gap analysis, SWOT, dan AHP	Alternatif strategi dan prioritas strategi
Keluaran akhir	Sintesis hasil analisis	Rekomendasi strategi pemanfaatan eco-enzyme

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil

3.1.1 Kondisi pertanian rawa lebak dan penggunaan pupuk di Kecamatan Pemulutan

Kecamatan Pemulutan, Kabupaten Ogan Ilir, Provinsi Sumatera Selatan, merupakan wilayah pertanian rawa lebak yang terdiri atas 25 desa dengan luas sekitar 122,92 km² atau 12.292 ha. Secara fisik, wilayah ini berada pada ketinggian sekitar 3 meter di atas permukaan laut, dengan komposisi 30% daratan dan 70% perairan atau rawa. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kegiatan budidaya pertanian berlangsung pada lingkungan yang sangat dipengaruhi karakter rawa lebak.

Dari sisi sosial ekonomi, Kecamatan Pemulutan merupakan kawasan pertanian, khususnya budidaya padi sawah. Sebagian besar penduduk bekerja sebagai petani padi, dan hampir setiap rumah tangga memiliki lahan sawah sendiri yang umumnya diperoleh dari warisan keluarga.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa pupuk kimia masih menjadi input utama dalam budidaya pertanian di Kecamatan Pemulutan.

Petani umumnya mengandalkan pupuk kimia pada setiap musim tanam. Selain itu, sebagian petani mulai menambahkan bahan organik sebagai penetral lahan, seperti sisa padi kering yang dibiarkan membusuk menjadi kompos serta pupuk kandang.

Penelitian juga menunjukkan adanya peningkatan intensitas tanam untuk mendukung swasembada pangan. Jika sebelumnya padi umumnya ditanam satu kali dalam setahun, sebagian petani kini mulai menanam dua hingga tiga kali setahun. Peningkatan intensitas tanam tersebut diikuti kecenderungan meningkatnya penggunaan pupuk kimia. Kondisi pertanian rawa lebak dan penggunaan pupuk disajikan pada Tabel 5. Tabel 5. kondisi pertanian rawa lebak dan penggunaan pupuk di Kecamatan Pemulutan

Aspek	Kondisi di Kecamatan Pemulutan	Implikasi untuk artikel
Karakter wilayah	Wilayah rawa lebak, 70% berupa perairan/ rawa dan 30% daratan	Relevan untuk kajian pertanian rawa lebak
Mata pencaharian utama	Sebagian besar penduduk bekerja sebagai petani padi	Pertanian menjadi sektor utama wilayah
Kepemilikan lahan	Hampir setiap rumah tangga memiliki sawah sendiri	Pola budidaya sangat dekat dengan kehidupan rumah tangga petani
Pupuk utama	Pupuk kimia masih digunakan sebagai pupuk utama	Menunjukkan tingginya ketergantungan terhadap pupuk kimia
Pengetahuan petani	Pengetahuan tentang dampak jangka panjang pupuk kimia masih terbatas	Menjelaskan mengapa pupuk kimia tetap dominan
Bahan organik lokal	Sisa jerami dan pupuk kandang mulai digunakan sebagai penetral lahan	Menunjukkan adanya peluang pemanfaatan bahan organik

Intensitas tanam	Meningkat dari 1 kali menjadi 2-3 kali setahun	Penggunaan pupuk kimia cenderung meningkat
Pengelolaan lahan	Lahan diistirahatkan 3-4 bulan setelah intensifikasi	Menunjukkan adanya tekanan pada kondisi lahan

Tabel 5 memperlihatkan bahwa sistem pertanian di Kecamatan Pemulutan masih ditandai oleh dominasi pupuk kimia, intensifikasi budidaya padi, dan pemanfaatan bahan organik yang masih terbatas.

3.1.2 Hasil gap analysis penggunaan pupuk kimia dan Eco-enzyme

Hasil gap analysis menunjukkan adanya perbedaan antara kondisi aktual penggunaan pupuk di lapangan dan arah pemupukan yang diharapkan melalui pengembangan Eco-enzyme berbasis bahan lokal. Analisis ini membandingkan praktik pemupukan yang masih didominasi pupuk kimia dengan alternatif pemupukan organik berbasis Eco-enzyme.

Pada aspek pengetahuan, mayoritas petani masih kurang mengetahui penggunaan Eco-enzyme, sedangkan pengetahuan terhadap pupuk kimia relatif lebih tinggi. Dari aspek biaya, Eco-enzyme dipandang lebih murah dan terjangkau, sementara pupuk kimia dinilai lebih mahal. Dari aspek produktivitas, Eco-enzyme dipersepsikan memberi hasil lebih optimal dan ramah lingkungan, sedangkan pupuk kimia dianggap memberi reaksi lebih cepat dan instan.

Pada aspek lingkungan, Eco-enzyme diposisikan sebagai pupuk yang dapat memberi efek subur pada tanah dan tidak mencemari lingkungan. Sebaliknya, pupuk kimia dipandang dapat membawa dampak negatif terhadap lahan apabila digunakan dalam jangka panjang. Hasil gap analysis disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil gap analysis penggunaan pupuk kimia dan Eco-enzyme di Kecamatan Pemulutan

Aspek analisis	Pupuk organik berbasis Eco-enzyme	Pupuk kimia
Pengetahuan petani	Mayoritas petani masih kurang mengetahui penggunaan pupuk organik berbasis Eco-enzyme	Petani sudah banyak mengetahui pupuk kimia
Biaya yang dibutuhkan	Relatif lebih murah dan terjangkau	Harganya lebih mahal
Produktivitas tanaman	Dipandang memberikan hasil yang lebih optimal dan ramah lingkungan	Memberikan reaksi yang lebih cepat dan instan
Dampak terhadap lingkungan	Dapat memberikan efek subur pada tanah dan tidak mencemari lingkungan	Membawa dampak negatif pada lahan jika digunakan dalam jangka panjang

Tabel 6 menunjukkan bahwa kesenjangan utama terletak pada rendahnya pengetahuan petani mengenai Eco-enzyme, perbedaan persepsi biaya dan kecepatan hasil, serta perbedaan pandangan terhadap dampak lingkungan dari kedua jenis pupuk.

3.1.3 Hasil identifikasi faktor internal dan eksternal

Hasil identifikasi menunjukkan bahwa pemanfaatan Eco-enzyme berbasis bahan lokal dipengaruhi oleh kondisi internal usaha tani dan lingkungan eksternal pertanian. Faktor internal dan eksternal disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil identifikasi faktor internal dan eksternal pemanfaatan Eco-enzyme di Kecamatan Pemulutan

Kelompok faktor	Uraian faktor
Internal	Pengetahuan petani terhadap pupuk kimia
Internal	Pengetahuan petani tentang pentingnya mengurangi penggunaan pupuk kimia
Internal	Petani masih kurang kemauan dalam pembuatan pupuk organik
Internal	Petani ingin yang cepat dan instan
Internal	Petani masih bergantung dengan pupuk subsidi
Eksternal	BPP kurang dalam melakukan sosialisasi tentang pupuk organik
Eksternal	Petani mendapatkan pupuk hasil subsidi
Eksternal	Pupuk organik dapat dibuat sendiri untuk meminim biaya
Eksternal	Pupuk organik memberikan hasil yang optimal tetapi agak lambat

Eksternal	Pupuk kimia dapat memberikan hasil yang cepat tetapi memiliki dampak pada lingkungan
Eksternal	Dampak buruk pada lingkungan jika menggunakan pupuk kimia dalam jangka waktu panjang
Eksternal	Pupuk kimia didapat hasil subsidi

Tabel 7 menunjukkan bahwa faktor yang teridentifikasi tidak hanya berkaitan dengan aspek teknis pemupukan, tetapi juga pengetahuan petani, subsidi pupuk, peran kelembagaan, dan pertimbangan lingkungan. Hasil penilaian responden terhadap faktor internal disajikan pada Tabel 8, sedangkan faktor eksternal disajikan pada Tabel 9.

Tabel 8. Hasil penilaian responden atas faktor internal

No	Faktor internal	Bobot	Kategori
1	Pengetahuan petani terhadap pupuk kimia	2,9	W
2	Pengetahuan petani tentang pentingnya mengurangi penggunaan pupuk kimia	3,7	W
3	Petani masih kurang kemauan dalam pembuatan pupuk organik	4,8	S
4	Petani ingin yang cepat dan instan	6,9	S
5	Petani masih bergantung dengan pupuk subsidi	5,0	S
	Rata-rata	4,6	

Tabel 8 memperlihatkan bahwa pada faktor internal, tiga unsur berada pada kategori kekuatan dan dua unsur pada kategori kelemahan, dengan rata-rata bobot sebesar 4,6.

Tabel 9. Hasil penilaian responden atas faktor eksternal

No	Faktor eksternal	Bobot	Kategori
1	BPP kurang dalam melakukan sosialisasi tentang pupuk organik	3,0	T
2	Petani mendapatkan pupuk hasil subsidi	6,1	O
3	Pupuk organik dapat dibuat sendiri untuk meminim biaya	3,4	T
4	Pupuk organik memberikan hasil yang optimal tetapi agak lambat	3,2	T
5	Pupuk kimia dapat memberikan hasil yang cepat tetapi memiliki dampak pada lingkungan	4,9	O
6	Dampak buruk pada lingkungan jika menggunakan pupuk kimia dalam jangka waktu panjang	6,5	O
7	Pupuk kimia didapat hasil subsidi	5,0	O
	Rata-rata	4,6	

Tabel 9 menunjukkan bahwa pada faktor eksternal, empat unsur termasuk kategori peluang dan tiga unsur termasuk kategori ancaman, dengan rata-rata bobot sebesar 4,6.

3.1.4 Hasil analisis SWOT

Hasil analisis SWOT menunjukkan bahwa faktor internal dan eksternal yang telah diidentifikasi dapat digunakan untuk menyusun posisi strategis pengembangan Eco-enzyme berbasis bahan lokal. Pada tahap ini, setiap faktor diberi bobot melalui IFAS dan EFAS untuk menilai tingkat kepentingan relatifnya.

Berdasarkan pembobotan faktor internal, total bobot strength (S) adalah 1,43, sedangkan weakness (W) adalah 0,50. Pada faktor eksternal, total bobot opportunity (O) adalah 3,40, sedangkan threat (T) adalah 0,50. Hasil pembobotan IFAS–EFAS disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Hasil pembobotan IFAS–EFAS SWOT

Komponen SWOT	Bobot total
Strength (S)	1,43
Weakness (W)	0,50
Opportunity (O)	3,40
Threat (T)	0,50

Tabel 10 menunjukkan bahwa kekuatan memiliki bobot lebih besar daripada kelemahan, sedangkan peluang memiliki bobot lebih besar daripada ancaman. Berdasarkan pembobotan tersebut, tahap berikutnya adalah penyusunan matriks interaksi SWOT. Matriks interaksi SWOT dan alternatif strategi yang dihasilkan disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11. Matriks interaksi SWOT dan alternatif strategi

Kom binasi strategi	Bobot	Alternatif strategi utama
SO	4,83	Petani belajar membuat pupuk organik sendiri dengan bahan lokal; kelompok tani memproduksi pupuk organik untuk dijual ke petani lain; membeli pupuk organik dari luar
WO	3,90	Meningkatkan pengetahuan petani tentang pupuk organik; meningkatkan pengetahuan tentang dampak penggunaan pupuk kimia

ST	1,93	BPP melakukan penyuluhan khusus tentang pentingnya mengganti pupuk kimia dengan pupuk organik; penyuluhan kepada petani tentang pembuatan pupuk organik
WT	1,00	BPP melakukan penyuluhan rutin tentang pupuk organik; pembuatan pupuk organik sendiri untuk meminimalkan biaya; penyuluhan untuk mengajak petani beralih dari pupuk kimia ke pupuk organik

Tabel 11 memperlihatkan bahwa strategi SO memiliki bobot tertinggi dibandingkan kombinasi strategi lainnya, sehingga menjadi alternatif dominan. Urutan alternatif strategi hasil analisis SWOT disajikan pada Tabel 12.

Tabel 12. Urutan alternatif strategi hasil analisis SWOT

Prioritas	Strategi	Bobot
I	Strength–Opportunity (SO)	4,83
II	Weakness–Opportunity (WO)	3,90
III	Strength–Threat (ST)	1,93
IV	Weakness–Threat (WT)	1,00

Tabel 12 menunjukkan bahwa strategi SO menempati peringkat pertama, diikuti oleh WO, ST, dan WT.

3.1.5 Hasil analisis AHP dan prioritas strategi

Setelah alternatif strategi diperoleh melalui SWOT, tahap berikutnya menggunakan Analytical Hierarchy Process (AHP) untuk menentukan prioritas strategi yang paling realistis diterapkan di Kecamatan Pemulutan. Struktur hirarki AHP untuk menentukan prioritas strategi ditunjukkan pada Gambar 2.

Pada tingkat skenario, skenario optimis memperoleh bobot tertinggi, yaitu 0,4538. Pada tingkat sasaran, bobot tertinggi terdapat pada sasaran petani membuat pupuk organik sendiri dengan bahan lokal, yaitu 0,54033. Pada tingkat alternatif strategi, bobot tertinggi diperoleh strategi pendampingan kelompok tani untuk membuat pupuk organik untuk dijual ke petani lain, yaitu 0,55883. Hasil pembobotan AHP disajikan pada Tabel 13.

Tabel 13. Hasil pembobotan AHP pada tingkat skenario, sasaran, dan alternatif strategi

Skenario	Sasaran	Bobot
Skenario optimis	Petani membuat pupuk organik sendiri	0,4538
Skenario optimis	Petani membuat pupuk organik untuk dijual ke petani lain	0,3122
Skenario optimis	Petani membuat pupuk organik untuk digunakan sendiri	0,2400
Skenario optimis	Petani membuat pupuk organik untuk digunakan sendiri	0,2400
Skenario optimis	Petani membuat pupuk organik untuk digunakan sendiri	0,2400
Skenario optimis	Petani membuat pupuk organik untuk digunakan sendiri	0,2400
Skenario optimis	Petani membuat pupuk organik untuk digunakan sendiri	0,2400
Skenario optimis	Petani membuat pupuk organik untuk digunakan sendiri	0,2400
Skenario optimis	Petani membuat pupuk organik untuk digunakan sendiri	0,2400
Skenario optimis	Petani membuat pupuk organik untuk digunakan sendiri	0,2400

Tabel 13 memperlihatkan bahwa skenario optimis, sasaran petani membuat pupuk organik sendiri, dan strategi pendampingan kelompok tani masing-masing memperoleh bobot tertinggi pada tingkat penilaian AHP. Urutan prioritas strategi hasil analisis AHP disajikan pada Tabel 14. Tabel 14. Urutan prioritas strategi hasil AHP

Prioritas	Strategi	Bobot
I	Strategi pendampingan kelompok tani untuk membuat pupuk organik untuk dijual ke petani lain	0,55883
II	Strategi pendampingan kelompok tani untuk membuat pupuk organik untuk digunakan sendiri	0,54033
III	Strategi pendampingan kelompok tani untuk membuat pupuk organik untuk digunakan sendiri	0,4538

Tabel 14 menunjukkan bahwa strategi pendampingan kelompok tani menempati urutan pertama, diikuti oleh penyuluhan rutin dan penyadaran petani.

3.2 Pembahasan

3.2.1 Ketergantungan petani terhadap pupuk kimia pada pertanian rawa lebak

Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketergantungan petani terhadap pupuk kimia di Kecamatan Pemulutan masih tinggi. Pupuk kimia tetap menjadi input utama dalam budidaya padi sawah, sedangkan bahan organik masih digunakan terbatas sebagai pelengkap. Kondisi ini sejalan dengan sistem padi dataran rendah di Asia Tenggara yang masih bertumpu pada pupuk mineral, sementara peralihan menuju pengelolaan hara berimbang dipengaruhi kemampuan petani mengadopsi inovasi (Becker et al., 2023).

Ketergantungan tersebut dapat dipahami dari sisi praktis dan perilaku petani. Petani cenderung memilih input yang memberi hasil cepat, mudah diaplikasikan, dan telah lama dikenal. Temuan ini sejalan dengan Zheng et al. (2022), bahwa pengurangan pupuk kimia

dipengaruhi karakteristik petani, kognisi teknologi, dan modal sosial; ketika dukungan perubahan terbatas, petani cenderung mempertahankan praktik yang dianggap aman.

Selain faktor perilaku, aspek ekonomi dan kelembagaan turut memperkuat ketergantungan. Pupuk subsidi membuat pupuk kimia tetap menarik karena menekan biaya input musim tanam. Pada sistem padi intensif, subsidi, akses harga tetap pemerintah, penyuluh, dan pelaku pasar memengaruhi kesenjangan penggunaan pupuk terhadap rekomendasi berimbang (Islam et al., 2024).

Dalam konteks rawa lebak, ketergantungan pada pupuk kimia menjadi lebih sensitif karena intensifikasi budidaya dapat meningkatkan tekanan terhadap kualitas lahan. Input kimia masih diperlukan untuk produktivitas, tetapi manfaatnya bergantung pada ketepatan dosis; penggunaan berlebih atau tidak berimbang dapat menurunkan kualitas tanah dan meningkatkan risiko pencemaran (Howe et al., 2024). Pemupukan nitrogen jangka panjang juga dapat mendorong pengasaman tanah dan perubahan sifat biologis tanah (Zhang et al., 2024).

Peningkatan intensitas tanam memperkuat persoalan tersebut. Pada sistem padi Asia Selatan dan Asia Tenggara, peningkatan produksi banyak ditopang nitrogen, tetapi kelebihan aplikasi nitrogen menurunkan efisiensi hara serta menekan kualitas air, udara, dan keanekaragaman hayati (Coggins et al., 2025). Karena itu, peningkatan frekuensi tanam di Pemulutan dari satu kali menjadi dua sampai tiga kali per tahun perlu diimbangi pengelolaan hara yang lebih efisien dan spesifik lokasi (Becker et al., 2023). Faktor pembentuk ketergantungan disajikan pada Tabel 15.

Tabel 15. Faktor pembentuk ketergantungan petani terhadap pupuk

kimia pada pertanian rawa lebak di Kecamatan Pemulutan

Aspek	Temuan hasil penelitian	Makna dalam pembahasan
Teknis budidaya	Pupuk kimia masih menjadi pupuk utama	Pupuk kimia telah menjadi input dominan dalam sistem budidaya petani
Perilaku petani	Petani cenderung memilih hasil yang cepat dan instan	Preferensi jangka pendek memperkuat pemakaian pupuk kimia
Ekonomi	Pupuk kimia didukung subsidi	Subsidi memperkuat daya tarik pupuk kimia di tingkat petani
Pengetahuan	Pengetahuan petani tentang dampak jangka panjang pupuk kimia masih terbatas	Kesadaran untuk beralih ke alternatif organik belum kuat
Intensifikasi budidaya	Frekuensi tanam meningkat dari 1 kali menjadi 2–3 kali per tahun	Kebutuhan input kimia cenderung meningkat seiring intensifikasi
Pengelolaan lahan	Petani mengistirahatkan lahan dan memakai jerami/pupuk kandang sebagai penetral	Ada indikasi tekanan pada lahan meskipun belum diukur langsung

Tabel 15 memperlihatkan bahwa ketergantungan petani terhadap pupuk kimia di Kecamatan Pemulutan dibentuk oleh kombinasi faktor teknis, perilaku, ekonomi, pengetahuan, dan pola intensifikasi budidaya.

Dengan demikian, dominasi pupuk kimia bukan hanya disebabkan efektivitas teknis, tetapi juga dibentuk oleh kebiasaan, insentif subsidi, keterbatasan pengetahuan, dan cara petani memaknai risiko produksi. Hubungan antarfaktor tersebut digambarkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema pembentuk ketergantungan petani terhadap pupuk kimia.

3.2.2 Eco-enzyme berbasis bahan lokal sebagai alternatif pertanian ramah lingkungan

Berdasarkan hasil penelitian, Eco-enzyme berbasis bahan lokal merupakan alternatif relevan untuk mendukung pertanian rawa lebak yang lebih ramah lingkungan di Kecamatan Pemulutan. Gap analysis menunjukkan bahwa pupuk organik berbasis Eco-enzyme dipandang lebih terjangkau, lebih ramah lingkungan, dan berpotensi menjadi pilihan alternatif dibandingkan pupuk kimia. Pemanfaatan limbah organik sebagai input pertanian juga penting dalam pengurangan ketergantungan pada pupuk mineral, ekonomi sirkular, dan sistem budidaya berkelanjutan (Hidalgo et al., 2025; Mandal et al., 2024).

Kekuatan utama Eco-enzyme terletak pada keterkaitannya dengan bahan lokal. Eco-enzyme umumnya berupa larutan hasil fermentasi limbah organik segar, terutama sisa buah dan sayuran, dengan gula atau molase dan air, sering pada rasio 1:3:10. Bahan baku tersebut membuat Eco-enzyme relevan dikembangkan pada skala rumah tangga maupun komunitas tani karena memanfaatkan limbah organik yang mudah ditemukan (Benny et al., 2023; Pasalari et al., 2024).

Dari perspektif pertanian ramah lingkungan, Eco-enzyme menghubungkan dua kebutuhan, yaitu pengurangan ketergantungan pupuk kimia dan pemanfaatan limbah organik. Pemulihan unsur hara dari residu organik berpotensi mengurangi tekanan lingkungan dari pemupukan konvensional sekaligus mengembalikan bahan organik dan hara ke sistem produksi. Karena itu, Eco-enzyme bernilai strategis dalam membangun sistem pemupukan yang lebih sirkular, hemat

sumber daya, dan berbasis lokal (Hidalgo et al., 2025; Mandal et al., 2024).

Namun, makna ramah lingkungan dalam penelitian ini berada pada tingkat arah strategi dan persepsi lapangan, bukan hasil uji eksperimental terhadap tanah atau air. Literatur menunjukkan bahwa pembahasan Eco-enzyme masih banyak berfokus pada pengelolaan limbah, pengomposan, dan aplikasi lingkungan, sedangkan bukti agronomis lapangan masih perlu diperkuat. Prospeknya tetap menjanjikan, tetapi implementasi membutuhkan standarisasi dan pengujian lanjut pada kondisi budidaya berbeda (Pasalari et al., 2024; Hidalgo et al., 2025).

Nilai strategis Eco-enzyme juga tampak dari aspek ekonomi dan kemandirian petani. Eco-enzyme dipandang lebih murah dibandingkan pupuk kimia karena bahan bakunya bersumber lokal. Pandangan ini sejalan dengan literatur yang menempatkan limbah organik sebagai sumber daya bernilai untuk menekan biaya dan memperkuat kemandirian input di tingkat lokal (Mandal et al., 2024; Hidalgo et al., 2025). Posisi Eco-enzyme disajikan pada Tabel 16.

Tabel 16. Posisi Eco-enzyme berbasis bahan lokal sebagai alternatif pertanian ramah lingkungan

Aspek	Temuan hasil penelitian	Makna dalam pembahasan
Bahan baku	<i>Eco-enzyme</i> dapat dikaitkan dengan bahan lokal/limbah organik	Membuka peluang kemandirian input di tingkat petani
Biaya	<i>Eco-enzyme</i> dipandang lebih murah dan terjangkau	Berpotensi menekan biaya pemupukan
Lingkungan	<i>Eco-enzyme</i> dipersepsikan lebih ramah lingkungan	Mendukung arah pertanian rawa lebak yang lebih ramah lingkungan
Ketergantungan pupuk	Sasaran prioritas adalah petani membuat pupuk organik sendiri	Mengarah pada pengurangan ketergantungan terhadap pupuk kimia
Kelembagaan	Strategi prioritas adalah pendampingan kelompok tani	Adopsi <i>Eco-enzyme</i> memerlukan proses pembelajaran dan pendampingan
Kendala adopsi	Pengetahuan petani masih terbatas,	<i>Eco-enzyme</i> belum menjadi praktik

	preferensi hasil cepat masih kuat	mapan dan perlu introduksi bertahap
--	--------------------------------------	--

Tabel 16 memperlihatkan bahwa nilai strategis Eco-enzyme tidak hanya terletak pada bahan dan biaya, tetapi juga pada kemampuannya mendukung pengurangan ketergantungan terhadap pupuk kimia melalui pendampingan yang sesuai.

Dengan demikian, Eco-enzyme berbasis bahan lokal lebih tepat dipahami sebagai alternatif strategis menuju pertanian rawa lebak ramah lingkungan, bukan pengganti instan pupuk kimia pada semua kondisi. Posisinya berada pada persimpangan pengelolaan limbah organik, pengurangan input eksternal, dan pembelajaran bertahap menuju sistem budidaya berkelanjutan. Hubungan konseptualnya digambarkan pada Gambar 5 (Benny et al., 2023; Pasalari et al., 2024; Hidalgo et al., 2025).



Gambar 5. Posisi Eco-enzyme berbasis bahan lokal dalam mendukung pertanian rawa lebak yang lebih ramah lingkungan.

3.2.3 Makna faktor internal dan eksternal dalam adopsi Eco-enzyme

Hasil penelitian menunjukkan bahwa adopsi Eco-enzyme di Kecamatan Pemulutan tidak hanya ditentukan oleh keberadaan alternatif pupuk organik, tetapi juga oleh interaksi faktor internal dan eksternal. Faktor internal mencakup pengetahuan, kemauan, preferensi, dan persepsi risiko petani, sedangkan faktor eksternal mencakup subsidi, penyuluhan, akses informasi, serta persepsi manfaat ekonomi dan lingkungan. Dalam adopsi teknologi ramah lingkungan, keputusan petani umumnya dibentuk oleh kombinasi karakteristik individu, kognisi teknologi,

modal sosial, insentif kebijakan, dan dukungan kelembagaan (Zheng et al., 2022; Xie & Huang, 2021).

Dari sisi internal, persoalan utama ialah terbatasnya pengetahuan petani mengenai pupuk organik dan pentingnya pengurangan pupuk kimia. Zheng et al. (2022) menunjukkan bahwa karakteristik petani, kognisi teknologi, dan modal sosial berpengaruh terhadap perilaku pengurangan pupuk kimia. Dalam adopsi pupuk organik, perluasan akses informasi dan literasi ekologis dapat memperkuat kecenderungan petani menggunakan pupuk organik (Li et al., 2024). Dengan demikian, keterbatasan pengetahuan di Pemulutan menunjukkan rendahnya kesiapan kognitif untuk beralih dari praktik lama.

Faktor internal lain yang menonjol adalah preferensi petani terhadap hasil cepat dan instan. Pupuk kimia dipersepsikan memberi respons lebih cepat, sedangkan Eco-enzyme dinilai bekerja bertahap. Karena perceived benefit merupakan pendorong kuat aplikasi pupuk organik (Yang et al., 2024), serta pendapatan, perilaku belajar, imitasi, dan kesadaran ekologis memengaruhi preferensi petani (Liao et al., 2025), introduksi Eco-enzyme harus menjawab orientasi praktis petani.

Ketergantungan pada pupuk subsidi juga memiliki makna internal yang kuat. Ketergantungan ini tidak hanya terkait akses ekonomi, tetapi juga rasa aman terhadap input yang sudah dikenal dan dianggap pasti hasilnya. Liao et al. (2025) menunjukkan bahwa subsidi dapat meningkatkan adopsi pupuk organik jangka pendek, tetapi ketergantungan besar pada insentif fiskal dapat menimbulkan persoalan keberlanjutan. Di Pemulutan, pupuk subsidi memperkuat loyalitas petani terhadap pupuk kimia dan melemahkan dorongan mencoba Eco-enzyme.

Dari sisi eksternal, keterbatasan sosialisasi atau penyuluhan tentang pupuk

organik oleh BPP menunjukkan belum kuatnya dukungan kelembagaan. Li et al. (2024) menunjukkan bahwa penyuluhan pertanian digital dapat meningkatkan kecenderungan petani membeli pupuk organik melalui literasi ekologis dan perluasan informasi. Rahman dan Connor (2022) juga menegaskan bahwa akses, frekuensi, dan tipe layanan penyuluhan berkaitan dengan penggunaan pupuk dan kesejahteraan petani. Karena itu, lemahnya sosialisasi menunjukkan belum optimalnya pendampingan yang menjadikan alternatif organik sebagai praktik yang dipahami petani.

Faktor eksternal lain adalah keberadaan pupuk subsidi dan persepsi bahwa pupuk kimia memberi hasil cepat. Lingkungan seperti ini lebih mendukung pupuk kimia daripada pupuk organik. Yang et al. (2024) menunjukkan bahwa subsidi dan propaganda kebijakan dapat mendorong aplikasi pupuk organik, tetapi pengaruhnya terkait manfaat yang dirasakan dan kesadaran ekologis. Tanpa intervensi kebijakan dan dukungan teknologi yang memadai, adopsi pupuk organik cenderung rendah (Liao et al., 2025).

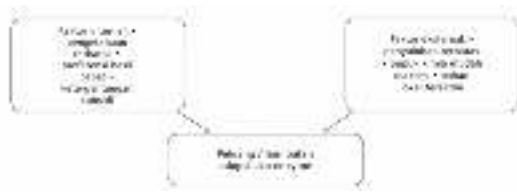
Di sisi lain, terdapat peluang eksternal berupa bahan lokal dan meningkatnya perhatian terhadap dampak lingkungan pupuk kimia. Eco-enzyme dapat dikembangkan dari limbah organik di sekitar rumah tangga dan lingkungan pertanian. Hidalgo et al. (2025) menegaskan bahwa limbah organik dapat dikonversi menjadi pupuk efektif untuk mengurangi ketergantungan pada pupuk mineral dan mendukung sistem sirkular. Makna internal dan eksternal disajikan pada Tabel 17.

Tabel 17. Makna faktor internal dan eksternal dalam adopsi Eco-enzyme di Kecamatan Pemulutan

Kelompok faktor	Temuan hasil penelitian	Makna dalam pembahasan
Internal	Pengetahuan petani tentang pupuk organik masih terbatas	Adopsi <i>Eco-enzyme</i> terhambat oleh rendahnya kesiapan pengetahuan
Internal	Petani cenderung menginginkan hasil cepat dan instan	Strategi introduksi harus menyesuaikan preferensi petani yang berorientasi jangka pendek
Internal	Petani masih bergantung pada pupuk subsidi	<i>Eco-enzyme</i> harus bersaing dengan kebiasaan dan rasa aman terhadap input yang sudah dikenal
Eksternal 1	Sosialisasi pupuk organik oleh BPP masih terbatas	Dukungan kelembagaan belum cukup kuat untuk mendorong perubahan pola pemupukan
Eksternal 1	Pupuk kimia tersedia melalui subsidi dan dianggap cepat	Lingkungan eksternal masih lebih mendukung penggunaan pupuk kimia
Eksternal 1	Pupuk organik dapat dibuat sendiri dari bahan lokal	Terdapat peluang membangun kemandirian input di tingkat petani
Eksternal 1	Dampak lingkungan pupuk kimia mulai menjadi perhatian	Ada dasar normatif untuk mengembangkan <i>Eco-enzyme</i> sebagai alternatif

Tabel 17 menunjukkan bahwa adopsi Eco-enzyme di Kecamatan Pemulutan dipengaruhi oleh kesiapan internal petani sekaligus oleh lingkungan eksternal yang dapat berfungsi sebagai hambatan maupun peluang.

Dengan demikian, faktor internal menjelaskan mengapa petani belum sepenuhnya siap beralih, sedangkan faktor eksternal menjelaskan mengapa ruang perubahan belum kuat terbentuk. Adopsi Eco-enzyme tidak cukup melalui informasi semata, tetapi memerlukan penguatan pengetahuan, perubahan persepsi manfaat, pendampingan kelembagaan, dan lingkungan kebijakan yang mendukung. Hubungan tersebut digambarkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Skema hubungan faktor internal dan eksternal dalam adopsi Eco-enzyme.

3.2.4 Implikasi strategi prioritas: pendampingan kelompok tani sebagai pilihan utama

Hasil AHP menunjukkan bahwa pendampingan kelompok tani untuk membuat pupuk organik yang dijual kepada petani lain menjadi strategi prioritas tertinggi. Strategi ini paling operasional karena menjawab kendala lapangan, yaitu rendahnya pengetahuan, kuatnya preferensi hasil cepat, ketergantungan pada pupuk subsidi, dan terbatasnya penyuluhan berkelanjutan. Adopsi pupuk organik lebih kuat ketika petani memperoleh dukungan teknis, saluran belajar, dan insentif yang mengurangi ketidakpastian perubahan praktik budidaya (Li, Han, & Zhu, 2024; Liao et al., 2025).

Pendampingan kelompok tani penting karena tidak berhenti pada penyampaian informasi, tetapi masuk pada pembelajaran praktis. Melalui praktik langsung, uji coba bersama, dan pembelajaran bertahap, petani lebih mudah memahami Eco-enzyme sesuai kondisi lapangan. Pelatihan teknis koperasi dapat meningkatkan adopsi pupuk organik melalui kemampuan petani dan persepsi nilai ekonomi-ekologis (Liu et al., 2022), sedangkan layanan penyuluhan memperkuat adopsi teknologi pemupukan melalui persepsi nilai dan dukungan teknis (Wang et al., 2025).

Strategi ini juga penting dari sisi kelembagaan. Ketika Eco-enzyme dikembangkan melalui kelompok tani, beban adopsi tidak ditanggung secara individual, tetapi dibagi melalui koordinasi, pembagian peran, dan

pembelajaran kolektif. Keterlibatan dalam koperasi dapat meningkatkan penggunaan pupuk organik dan menurunkan pupuk kimia (Wei et al., 2022), sementara organisasi koperasi membantu petani bertindak kolektif melalui pengambilan keputusan bersama, integrasi sumber daya, serta pembagian risiko dan manfaat (Zhu & Wang, 2024).

Selain itu, strategi ini memiliki implikasi ekonomi karena pupuk organik dapat dijual kepada petani lain. Nilai ekonomi pupuk organik cenderung lebih kuat ketika didukung layanan pendamping, organisasi produksi, dan koordinasi yang menekan biaya. Li, Zhang, dan Qian (2024) menunjukkan bahwa aplikasi pupuk organik dapat meningkatkan pendapatan jika didukung layanan memadai, sedangkan Zhu dan Wang (2024) menegaskan peran organisasi kolektif dalam integrasi sumber daya dan posisi ekonomi petani. Implikasi strategi disajikan pada Tabel 18.

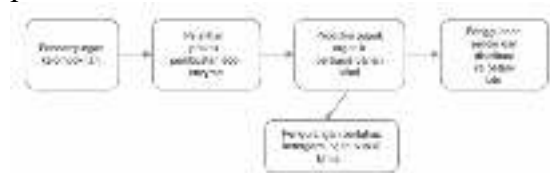
Tabel 18. Implikasi strategi prioritas pendampingan kelompok tani dalam pengembangan Eco-enzyme

Aspek	Temuan hasil penelitian	Implikasi dalam pembahasan
Prioritas strategi	Pendampingan kelompok tani memperoleh bobot tertinggi	Menjadi strategi paling operasional dalam hasil AHP
Pembelajaran petani	Adopsi <i>Eco-enzyme</i> terkendala pengetahuan dan keterampilan	Pendampingan diperlukan untuk praktik langsung dan belajar bersama
Kelembagaan	Kelompok tani menjadi sasaran penting dalam strategi	Kelompok tani dapat menjadi basis adopsi kolektif
Ekonomi lokal	Pupuk organik dapat dibuat untuk dijual ke petani lain	Membuka peluang penguatan ekonomi di tingkat kelompok
Pemanfaatan bahan lokal	Sasaran prioritas adalah petani membuat pupuk organik sendiri	Mendukung kemandirian input berbasis bahan lokal
Posisi terhadap strategi lain	Penyuluhan dan penyadaran tetap dibutuhkan	Pendampingan menjadi inti operasional, strategi lain menjadi pendukung

Tabel 18 memperlihatkan bahwa pendampingan kelompok tani memiliki implikasi teknis, kelembagaan, ekonomi,

dan edukatif dalam pengembangan Eco-enzyme berbasis bahan lokal.

Pada saat yang sama, pendampingan kelompok tani tidak berdiri sendiri. Strategi ini tetap memerlukan penyuluhan rutin dan penyadaran manfaat pupuk organik untuk keberlanjutan pertanian. Pendampingan menjadi inti operasional yang menjembatani pengetahuan dengan praktik, sedangkan penyuluhan dan penyadaran memperkuat persepsi dan keberlanjutan adopsi (Li, Han, & Zhu, 2024; Liao et al., 2025; Wang et al., 2025). Alur implikasinya digambarkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Skema implikasi strategi pendampingan kelompok tani dalam adopsi Eco-enzyme.

3.2.5 Implikasi bagi pengembangan pertanian rawa lebak ramah lingkungan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengembangan Eco-enzyme berbasis bahan lokal memiliki implikasi lebih luas daripada penyediaan alternatif pupuk organik. Dalam pertanian rawa lebak, hasil ini mengarah pada kebutuhan membangun sistem budidaya yang lebih berhati-hati terhadap input, lebih memanfaatkan sumber daya lokal, dan lebih bertumpu pada pengelolaan lahan berkelanjutan. Arah ini sejalan dengan literatur bahwa peningkatan produksi padi lahan rendah tidak dapat terus bertumpu pada penambahan input, tetapi perlu efisiensi sumber daya, pengelolaan hara spesifik lokasi, dan pendekatan berkelanjutan (Becker et al., 2023; Yuan et al., 2021).

Implikasi pertama ialah pengurangan bertahap ketergantungan terhadap pupuk kimia. Eco-enzyme tidak diposisikan sebagai pengganti instan, tetapi

sebagai bagian dari transisi menuju pemupukan berimbang. Sistem padi produktif tetap membutuhkan input hara, namun keberlanjutan hasil lebih bergantung pada efisiensi pemanfaatan hara daripada penambahan dosis. Penggunaan pupuk kimia yang tidak tepat dapat memperbesar risiko lingkungan dan menurunkan efisiensi produksi (Becker et al., 2023; Coggins et al., 2025).

Implikasi kedua berkaitan dengan pengelolaan lahan rawa lebak yang adaptif dan berkelanjutan. Karakter lahan yang dipengaruhi dinamika air, intensifikasi, dan tekanan input menuntut kehati-hatian dalam pengelolaan tanah dan hara. Eco-enzyme berbasis bahan lokal perlu dipahami sebagai bagian dari strategi pengelolaan lahan, bukan sekadar inovasi input. Pengaruh pupuk kimia dan bahan organik terhadap kesehatan tanah sangat bergantung pada dosis, keseimbangan aplikasi, dan konteks pengelolaan (Howe et al., 2024).

Implikasi ketiga adalah pemanfaatan bahan lokal dan limbah organik sebagai sumber daya pertanian. Sasaran prioritas berupa pembuatan pupuk organik dari bahan lokal membuka peluang kemandirian input. Dalam perspektif ekonomi sirkular, limbah organik sebagai bahan pupuk atau pembenah tanah dapat mengurangi ketergantungan pada pupuk mineral, menekan beban limbah, dan mengembalikan hara ke sistem produksi. Karena itu, Eco-enzyme menjadi pintu masuk pengelolaan pertanian yang ramah lingkungan dan berbasis sumber daya sekitar petani (Hidalgo et al., 2025).

Implikasi keempat berkaitan dengan penguatan kelembagaan petani. Strategi pendampingan kelompok tani menunjukkan bahwa perubahan menuju pertanian ramah lingkungan memerlukan wadah yang menopang pembelajaran kolektif, praktik bersama, dan koordinasi lokal. Kelembagaan petani atau koperasi dapat meningkatkan penggunaan pupuk

organik, mengurangi pupuk kimia, dan memperkuat kapasitas kolektif. Dukungan penyuluhan, termasuk digital, juga memperluas informasi dan meningkatkan keputusan penggunaan pupuk organik (Wei et al., 2022; Li, Han, & Zhu, 2024).

Implikasi kelima adalah peluang kemandirian input dan ekonomi lokal. Jika pupuk organik diproduksi dari bahan lokal dan dikelola melalui kelompok tani, manfaatnya mencakup perbaikan arah pemupukan sekaligus penciptaan nilai ekonomi lokal. Aplikasi pupuk organik dapat berkaitan dengan peningkatan pendapatan petani apabila didukung layanan yang memadai (Li, Zhang, & Qian, 2024). Dengan insentif yang tepat, pilihan antara pupuk organik dan kimia juga dapat membawa implikasi ekonomi dan lingkungan yang berbeda (Deng & Zhao, 2025). Implikasi disajikan pada Tabel 19. Tabel 19. Implikasi hasil penelitian bagi pengembangan pertanian rawa lebak ramah lingkungan

Dimensi implikasi	Temuan hasil penelitian	Implikasi dalam pembahasan
Pola pemupukan	Pupuk kimia masih dominan, <i>Eco-enzyme</i> menjadi alternatif	Mengarah pada pengurangan bertahap ketergantungan terhadap pupuk kimia
Pengelolaan lahan	Intensifikasi budidaya meningkatkan tekanan penggunaan input	Mendorong kebutuhan pengelolaan lahan rawa lebak yang lebih hati-hati
Bahan lokal	Sasaran prioritas adalah pembuatan pupuk organik dari bahan lokal	Memperkuat pemanfaatan limbah organik dan sumber daya sekitar petani
Kelembagaan petani	Strategi prioritas adalah pendampingan kelompok tani	Kelompok tani menjadi basis perubahan praktik budidaya
Ekonomi lokal	Pupuk organik dapat diproduksi dan dijual ke petani lain	Membuka peluang kemandirian input dan ekonomi lokal
Dukungan kelembagaan	Penyuluhan dan pendampingan masih diperlukan	Arah kebijakan perlu mendukung pembelajaran inovasi berbasis bahan lokal

Tabel 19 memperlihatkan bahwa implikasi hasil penelitian tidak hanya terkait penggantian pupuk, tetapi juga pola pemupukan, pengelolaan lahan, bahan lokal, kelembagaan, dan kemandirian ekonomi petani.

Secara keseluruhan, pengembangan pertanian rawa lebak ramah lingkungan tidak cukup dipahami sebagai penggantian pupuk kimia dengan pupuk organik. Transformasi yang diperlukan mencakup pengurangan bertahap input kimia, pengelolaan lahan adaptif, pemanfaatan bahan lokal, penguatan kelembagaan, dan penciptaan peluang ekonomi lokal. *Eco-enzyme* berbasis bahan lokal diposisikan sebagai strategi transisional menuju sistem pertanian rawa lebak yang lebih mandiri, efisien, dan ramah lingkungan. Arah hubungan tersebut digambarkan pada Gambar 8 (Becker et al., 2023; Hidalgo et al., 2025; Li, Han, & Zhu, 2024).



Gambar 8. Skema arah pengembangan pertanian rawa lebak ramah lingkungan berdasarkan hasil penelitian.

3.2.6 Keterbatasan penelitian

Meskipun penelitian ini berhasil merumuskan strategi prioritas pemanfaatan *Eco-enzyme* berbasis bahan lokal pada pertanian rawa lebak di Kecamatan Pemulutan, hasilnya perlu dibaca dengan memperhatikan keterbatasan. Pendekatan gabungan SWOT–AHP berguna untuk mengidentifikasi faktor strategis, menyusun alternatif tindakan, dan memprioritaskan pengembangan, tetapi keluarannya berupa prioritas strategi berbasis penilaian dan pembobotan, bukan pembuktian teknis efektivitas teknologi di lapangan.

Keterbatasan pertama berkaitan dengan pendekatan penelitian. Penelitian ini menggunakan gap analysis, SWOT, dan AHP, sehingga fokusnya adalah penyusunan strategi pemanfaatan Eco-enzyme berbasis bahan lokal. Penelitian tidak dirancang untuk menguji secara eksperimental pengaruh Eco-enzyme terhadap pertumbuhan tanaman, hasil panen, sifat tanah, atau kualitas air. Padahal, pembuktian manfaat agronomis membutuhkan pengukuran langsung pelepasan hara, fungsi tanah, respons tanaman, keamanan, dan standardisasi produk.

Keterbatasan kedua berkaitan dengan cakupan wilayah. Penelitian hanya dilakukan di Kecamatan Pemulutan, sehingga generalisasi ke wilayah lain perlu hati-hati. Indikator, prioritas, dan interpretasi keberlanjutan pertanian dapat berbeda menurut wilayah dan tahap pengembangan. Karena itu, strategi yang diperoleh paling tepat dipahami sebagai strategi kontekstual bagi kondisi Pemulutan, dan masih membutuhkan uji multi-lokasi serta jangka panjang.

Keterbatasan ketiga berkaitan dengan sumber dan karakter responden. Analisis SWOT bertumpu pada persepsi petani, sedangkan AHP bertumpu pada penilaian responden ahli. Dalam AHP, kualitas hasil sangat dipengaruhi mutu pairwise comparison dan konsistensi penilaian. Dengan demikian, urutan prioritas strategi tetap dipengaruhi komposisi responden, pengalaman, dan cara mereka menilai kepentingan tiap unsur dalam hirarki keputusan.

Keterbatasan keempat berkaitan dengan variabel yang belum diukur langsung. Penelitian belum mencakup pengukuran perubahan sifat tanah, kualitas air, pertumbuhan, maupun hasil tanaman setelah penggunaan Eco-enzyme. Penilaian pupuk berbasis limbah atau bahan organik alternatif idealnya mencakup respons tanah-tanaman,

kualitas lingkungan, keamanan, dan standardisasi. Karena itu, klaim agronomis dan lingkungan dalam penelitian ini tidak dapat ditegaskan secara eksperimental.

Keterbatasan kelima berkaitan dengan belum adanya analisis ekonomi rinci. Penelitian belum menilai biaya produksi Eco-enzyme, efisiensi penggunaan, keuntungan petani, maupun kelayakan usaha jika pupuk organik diproduksi dan dipasarkan kelompok tani. Literatur tentang pupuk turunan limbah menekankan bahwa kinerja agronomis, kelayakan ekonomi, standardisasi, dan tantangan komersialisasi penting untuk menilai prospek penerapan. Implikasi ekonomi penelitian ini masih bersifat awal dan perlu pengujian lanjutan. Keterbatasan disajikan pada Tabel 20.

Tabel 20. Keterbatasan penelitian dan implikasinya

Aspek keterbatasan	Kondisi dalam penelitian	Implikasi terhadap pembacaan hasil
Pendekatan penelitian	Fokus pada <i>gap analysis</i> , SWOT, dan AHP	Hasil lebih kuat sebagai strategi pengembangan daripada pembuktian teknis
Cakupan wilayah	Penelitian hanya dilakukan di Kecamatan Pemulutan	Generalisasi ke wilayah lain perlu dilakukan secara hati-hati
Responden	SWOT berbasis petani, AHP berbasis 5 responden ahli	Prioritas strategi bergantung pada konteks dan persepsi responden
Variabel teknis	Tidak ada uji langsung terhadap tanah, air, dan hasil tanaman	Klaim agronomis dan lingkungan tidak dapat ditegaskan secara eksperimental
Variabel ekonomi	Tidak ada analisis rinci biaya, efisiensi, dan keuntungan produksi <i>Eco-enzyme</i>	Implikasi ekonomi masih perlu diuji lebih lanjut
Tahap inovasi	Masih pada tahap strategi introduksi	Penelitian menjadi dasar awal bagi

		pengujian lanjutan yang lebih mendalam
--	--	--

Tabel 20 menunjukkan bahwa keterbatasan penelitian terutama terletak pada pendekatan, wilayah, responden, serta belum adanya pengukuran teknis dan ekonomi secara langsung.

Secara keseluruhan, penelitian ini lebih tepat diposisikan sebagai dasar awal untuk merumuskan strategi introduksi Eco-enzyme berbasis bahan lokal di Kecamatan Pemulutan. Tahap berikutnya perlu dilengkapi uji lapangan yang lebih panjang, cakupan lokasi lebih luas, pengukuran sifat tanah dan kualitas lingkungan, serta analisis ekonomi yang lebih rinci agar pengembangan Eco-enzyme didukung bukti yang lebih komprehensif.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pertanian rawa lebak di Kecamatan Pemulutan masih bergantung tinggi pada pupuk kimia. Kondisi tersebut dipengaruhi dominasi pupuk kimia dalam budidaya, preferensi petani terhadap hasil cepat dan instan, ketergantungan pada pupuk subsidi, serta terbatasnya pengetahuan mengenai alternatif pupuk organik berbasis bahan lokal. Karena itu, Eco-enzyme berbasis bahan lokal relevan dikembangkan sebagai alternatif untuk mengurangi ketergantungan pupuk kimia secara bertahap dan mendukung pertanian rawa lebak yang lebih ramah lingkungan.

Hasil SWOT menempatkan strategi Strength–Opportunity (SO) sebagai alternatif tertinggi, menunjukkan pengembangan Eco-enzyme lebih didukung kekuatan internal dan peluang eksternal daripada kelemahan dan ancaman. Hasil AHP menunjukkan skenario optimis paling realistis, dengan sasaran prioritas petani membuat pupuk organik sendiri dari bahan lokal. Strategi utama ialah pendampingan kelompok tani untuk memproduksi pupuk organik yang

dapat dijual, diikuti penyuluhan rutin dan penyadaran manfaat pupuk organik bagi keberlanjutan pertanian. Keberhasilannya membutuhkan penguatan kapasitas petani, pemanfaatan bahan lokal, dan dukungan penyuluhan berkelanjutan secara konsisten.

DAFTAR PUSTAKA

- Becker, M., Clavero, R., Maung, Z. N., Khin, O. M., Kong, S., Men, P., Regalado, M. J. C., Ro, S., Win, K. K., & Pariyar, S. (2023). Pathways and determinants of changing nutrient management in lowland rice-based systems of Southeast Asia. *Agronomy for Sustainable Development*, 43, Article 79. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00932-6>
- Beltran-Garcia, M. J., Martínez-Rodríguez, A., Olmos-Arriaga, I., Valdes-Salas, B., Di Mascio, P., & White, J. F. (2021). Nitrogen fertilization and stress factors drive shifts in microbial diversity in soils and plants. *Symbiosis*, 84, 379–390. <https://doi.org/10.1007/s13199-021-00787-z>
- Benny, N., Shams, R., Dash, K. K., Pandey, V. K., & Bashir, O. (2023). Recent trends in utilization of citrus fruits in production of eco-enzyme. *Journal of Agriculture and Food Research*, 13, Article 100657. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100657>
- Bijay-Singh, & Craswell, E. (2021). Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: An increasingly pervasive global problem. *SN Applied Sciences*, 3, Article 518.

- <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04521-8>
- Coggins, S., McDonald, A. J., Silva, J. V., Urfels, A., Nayak, H. S., Sherpa, S. R., Jat, M. L., Jat, H. S., Krupnik, T., Kumar, V., Sapkota, T. B., Nayak, A. K., Craufurd, P., & Malik, R. K. (2025). Data-driven strategies to improve nitrogen use efficiency of rice farming in South Asia. *Nature Sustainability*, 8, 22–33. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01496-3>
- Deng, L., Wan, P., Ye, F., & Zhao, J. (2025). Impact of agricultural subsidy on chemical fertilizer use: Empirical evidence of China's Organic-Substitute-Chemical-Fertilizer policy based on double machine learning. *PLOS ONE*, 20(11), Article e0334751. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0334751>
- Dincă, L. C., Grenni, P., Onet, C., & Onet, A. (2022). Fertilization and soil microbial community: A review. *Applied Sciences*, 12(3), Article 1198. <https://doi.org/10.3390/app12031198>
- Fan, D., & Yang, F. (2024). Assessing the impact of China's agricultural subsidy reform on fertilizer management: A county-level empirical analysis based on difference-in-difference model. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, Article 1298425. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1298425>
- Hidalgo, D., Martín-Marroquín, J. M., Corona, F., & Verdugo, F. (2025). Waste-derived fertilizers: Conversion technologies, circular bioeconomy perspectives and agronomic value. *Agronomy*, 15(9), Article 2167. <https://doi.org/10.3390/agronomy15092167>
- Howe, J. A., McDonald, M. D., Burke, J., Robertson, I., Coker, H., Gentry, T. J., & Lewis, K. L. (2024). Influence of fertilizer and manure inputs on soil health: A review. *Soil Security*, 16, Article 100155. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2024.100155>
- Islam, M. S., Bell, R. W., Miah, M. A. M., & Alam, M. J. (2024). Determinants of farmers' fertilizer use gaps under rice-based cropping systems: Empirical evidence from Eastern Gangetic Plain. *Journal of Agriculture and Food Research*, 17, Article 101228. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101228>
- Krasilnikov, P., Taboada, M. A., & Amanullah. (2022). Fertilizer use, soil health and agricultural sustainability. *Agriculture*, 12(4), Article 462. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040462>
- Li, B., Zhang, C., & Qian, Y. (2024). The application of organic fertilizers and farmers' income increase. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 39, Article e22. <https://doi.org/10.1017/S1742170524000176>
- Li, L., Han, J., & Zhu, Y. (2024). Empowering sustainability: How digital agricultural extensions

- influence organic fertilizer choices among Chinese farmers. *Journal of Environmental Management*, 371, Article 123340. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123340>
- Liao, F., Zheng, Y., & Wang, X. (2025). Promoting the replacement of chemical fertilizer with organic fertilizer: The role of policy incentives and digital technology. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, Article 1527913. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1527913>
- Liu, Y., Shi, K., Liu, Z., Qiu, L., Wang, Y., Liu, H., & Fu, X. (2022). The effect of technical training provided by agricultural cooperatives on farmers' adoption of organic fertilizers in China: Based on the mediation role of ability and perception. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(21), Article 14277. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114277>
- Mandal, M., Roy, A., Das, S., Rakwal, R., Agrawal, G. K., Singh, P., Awasthi, A., & Sarkar, A. (2024). Food waste-based bio-fertilizers production by bio-based fermenters and their potential impact on the environment. *Chemosphere*, 353, Article 141539. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141539>
- Panda, D., & Barik, J. (2021). Flooding tolerance in rice: Focus on mechanisms and approaches. *Rice Science*, 28(1), 43–57. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2020.11.006>
- Panday, D., Bhusal, N., Das, S., & Ghalehgolabbehbahani, A. (2024). Rooted in nature: The rise, challenges, and potential of organic farming and fertilizers in agroecosystems. *Sustainability*, 16(4), Article 1530. <https://doi.org/10.3390/su16041530>
- Pasalari, H., Moosavi, A., Kermani, M., Sharifi, R., & Farzadkia, M. (2024). A systematic review on garbage enzymes and their applications in environmental processes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 277, Article 116369. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116369>
- Rahman, M. M., & Connor, J. D. (2022). Impact of agricultural extension services on fertilizer use and farmers' welfare: Evidence from Bangladesh. *Sustainability*, 14(15), Article 9385. <https://doi.org/10.3390/su14159385>
- Ren, Y., Peng, Y., Castro Campos, B., & Li, H. (2021). The effect of contract farming on the environmentally sustainable production of rice in China. *Sustainable Production and Consumption*, 28, 1381–1395. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.08.011>
- Wang, P., Li, H., Huang, Y., Qu, Z., & Liu, D. (2025). From technology adoption to scientific application: Impact mechanism analysis of private agricultural extension services promoting scientific fertilization of farmers. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9,

- Article 1628258.
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1628258>
- Wei, G., Kong, X., & Wang, Y. (2022). Will joining cooperative promote farmers to replace chemical fertilizers with organic fertilizers? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(24), Article 16647. <https://doi.org/10.3390/ijerph192416647>
- Xie, H., & Huang, Y. (2021). Influencing factors of farmers' adoption of pro-environmental agricultural technologies in China: Meta-analysis. *Land Use Policy*, 109, Article 105622. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105622>
- Yang, J., Su, K., Zhang, Z., Guo, S., Hou, Y., & Wen, Y. (2024). Perceived benefit, policy incentive and farmers' organic fertilizer application in protected areas. *Agriculture*, 14(6), Article 810. <https://doi.org/10.3390/agriculture14060810>
- Yuan, S., Linguist, B. A., Wilson, L. T., Cassman, K. G., Stuart, A. M., Pede, V., Miro, B., Saito, K., Agustiani, N., Aristya, V. E., Krisnadi, L. Y., Zanon, A. J., Heinemann, A. B., Carracelas, G., Subash, N., Brahmanand, P. S., Li, T., Peng, S., & Grassini, P. (2021). Sustainable intensification for a larger global rice bowl. *Nature Communications*, 12, Article 7163. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27424-z>
- Zhang, L., Zhao, Z., Jiang, B., Baoyin, B., Cui, Z., Wang, H., Li, Q., & Cui, J. (2024). Effects of long-term application of nitrogen fertilizer on soil acidification and biological properties in China: A meta-analysis. *Microorganisms*, 12(8), Article 1683. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12081683>
- Zheng, S., Yin, K., & Yu, L. (2022). Factors influencing the farmer's chemical fertilizer reduction behavior from the perspective of farmer differentiation. *Heliyon*, 8(12), Article e11918. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11918>
- Zhu, X., & Wang, G. (2024). Impact of agricultural cooperatives on farmers' collective action: A study based on the socio-ecological system framework. *Agriculture*, 14(1), Article 96. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010096>

