



## **Analisis Adopsi Pupuk Orgaik Hayati (*Bio-Fertilizer*) oleh Petani: Kajian Biologi Terapan dan Persepsi Finansial**

**Uci Mahlisa<sup>\*1</sup>, Mayhilda NItami<sup>2</sup>, Nurita Puri<sup>3</sup> dan Uswatun Hasanah Nura<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Pendidikan Matematika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan,  
Universitas Cipta Mandiri

<sup>234</sup>Program Studi Agribisnis, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Cipta Mandiri

\* Corresponding Author: [ucimahlisa@uncm.ac.id](mailto:ucimahlisa@uncm.ac.id)

### **Abstrak**

Ketergantungan menahun terhadap pemupukan anorganik dosis tinggi berimplikasi pada degradasi kualitas biologis tanah dan lonjakan biaya produksi pertanian. Penggunaan Pupuk Organik Hayati (*bio-fertilizer*) hadir sebagai inovasi biologi terapan yang memanfaatkan konsorsium mikroorganisme fungsional guna memulihkan kesehatan ekosistem tanah dan mengoptimalkan efisiensi hara. Kendati demikian, laju adopsi teknologi ini di tingkat petani sangat ditentukan oleh pemahaman teknis ekologis dan kalkulasi rasionalitas ekonomi harian. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas biologis *bio-fertilizer* terhadap perbaikan hara tanah serta menganalisis pengaruh pengetahuan ekologis dan persepsi finansial terhadap keputusan adopsi petani. Penelitian memanfaatkan gabungan data sekunder terintegrasi dari mikrodta Sensus Pertanian/SOUT BPS serta publikasi laporan laboratorium kesuburan tanah. Hasil pengujian biologis mengonfirmasi bahwa perlakuan pupuk hayati secara konsisten meningkatkan populasi bakteri penambat N, pelarut P, serta kadar C-Organik tanah. Estimasi regresi logistik biner membuktikan bahwa persepsi efisiensi biaya dan pengetahuan biologi terapan berasosiasi positif dan signifikan terhadap keputusan adopsi. Pembahasan komparatif menunjukkan bahwa temuan ini sejajar dengan tren riset global lima tahun terakhir, di mana mitigasi risiko finansial jangka pendek dan literasi ekologi tanah menjadi faktor pemungkas akselerasi adopsi pemupukan hayati.

**Kata Kunci :** Adopsi Inovasi, Bio-Fertilizer, Biologi Terapan, Mikrobiologi Tanah, Persepsi Finansial

### **Abstract**

*Long-term reliance on high-dose synthetic fertilizers has triggered severe degradation of soil biological health while escalating overall agricultural production costs. The application of bio-fertilizers serves as an applied biological breakthrough, leveraging functional microorganism consortia to restore soil biodiversity and optimize nutrient absorption efficiency. Although its ecological benefits are well established, the adoption rate among farmers remains strongly driven by applied technical understanding and daily economic calculations. This study aims to evaluate the applied biological effectiveness of bio-fertilizers on soil nutrient improvement and analyze how ecological knowledge and financial perceptions shape farmers' adoption choices. The study relies on integrated secondary data retrieved from BPS Agricultural Census/SOUT microdata alongside soil fertility laboratory reports. Empirical findings confirm that bio-fertilizer application consistently enhances N-fixing and P-solubilizing bacterial populations as well as soil C-Organic levels. Binary logistic regression analysis further demonstrates that financial cost-efficiency perceptions and applied biological knowledge have a positive and significant association with farmers' adoption decisions. Comparative discussions reveal alignment with recent literature over the past five years, emphasizing that mitigating short-term financial risks alongside enhancing soil ecological literacy emerge as critical factors in accelerating bio-fertilizer adoption.*

**Keywords:** *Adoption of Innovation, Applied Biology, Bio-fertilizer, Financial Perception, Soil Microbiology.*

## PENDAHULUAN

Praktik budidaya pertanian konvensional yang bertumpu pada pupuk anorganik sintetis secara berlebihan dalam jangka panjang terbukti memicu kerusakan struktural dan biologis lahan. Penurunan keanekaragaman hayati tanah, erosi populasi mikroflora yang menguntungkan, serta pemadatan matriks tanah merupakan dampak nyata dari abainya pengelolaan ekosistem tanah (Alexander, 1997; Rao, 2018). Fenomena ini diperparah oleh dinamika harga input kimia yang terus melonjak di pasaran, sehingga memperbesar rasio biaya produksi dan menekan margin pendapatan petani kecil (Cramer & Jensen, 1994; Gujarati & Porter, 2009).

Sebagai terobosan Biologi Terapan, pemanfaatan Pupuk Organik Hayati (*bio-fertilizer*) menawarkan mekanisme pemulihan kesehatan tanah secara alami. *Bio-fertilizer* mengandung inokulan mikroorganisme hidup seperti *Azotobacter* sp., *Rhizobium* sp., *Bacillus* sp., dan jamur pelarut fosfat yang bekerja memfiksasi nitrogen bebas dari udara, melarutkan ikatan fosfat yang terikat pada mineral tanah, serta menstimulasi perkembangan jaringan akar (Subba Rao, 2000; Vessey, 2003).

Meskipun efektivitas biologis *bio-fertilizer* telah banyak dibuktikan dalam skala eksperimental laboratorium, tingkat adopsi masal pada skala usaha tani riil masih berjalan lambat. Terdapat jurang pemisah antara keunggulan teknis biologi (*applied biological knowledge*) dengan pertimbangan rasionalitas ekonomi di tingkat tapak (Rogers, 2003; Asmarantaka, 2014). Petani sering kali membandingkan sifat pemulihan lambat (*slow-release*) pupuk hayati dengan respon instan pupuk sintetis, yang memicu keraguan terhadap jaminan kepastian pendapatan jangka pendek.

Mengingat kompleksitas tersebut, penelitian ini memadukan pendekatan sains biologi terapan (kolonisasi mikroba dan ketersediaan hara) dengan ekonomika agribisnis (persepsi finansial dan adopsi inovasi) berbasis Data Sekunder terintegrasi. Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini dirinci sebagai berikut:

1. Bagaimana efektivitas aplikasi *bio-fertilizer* terhadap perbaikan populasi mikrobiologi dan ketersediaan hara tanah berdasarkan data sekunder pengujian laboratorium?
2. Bagaimana pengaruh pengetahuan biologi terapan dan persepsi efisiensi finansial terhadap keputusan adopsi *bio-fertilizer* oleh petani berdasarkan ekstraksi data sekunder BPS?
3. Bagaimana perbandingan temuan empiris penelitian ini dengan peta perkembangan riset adopsi teknologi hayati global dalam kurun waktu lima tahun terakhir?

## METODE PENELITIAN

### A. Sumber Data dan Kompilasi Data Sekunder

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis data sekunder terintegrasi (N = 100 observasi data sampel individu yang valid). Sumber data meliputi:

1. Data Mikro Sensus Pertanian dan Survei Struktur Ongkos Usaha Tani (SOUT) BPS: Digunakan untuk mengabstraksi karakteristik sosio-ekonomi petani, alokasi pengeluaran pupuk, pendapatan usaha tani, dan status adopsi (Badan Pusat Statistik,

2024).

2. Data Sekunder Uji Kesuburan Tanah (Balittanah / BPTP BPSIP): Data eksperimental laboratorium mengenai parameter biologis dan kimia tanah pada lahan perlakuan *bio-fertilizer* versus lahan konvensional (Balai Penelitian Tanah, 2023).

#### B. Persamaan Matematika dan Pengukuran Variabel

Seluruh permodelan statistik dan ekonometrika didasarkan pada formulasi baku dari referensi buku teks primer:

##### 1. Uji Komparasi Beda Rerata (Independent Sample t-test)

Sesuai dengan prinsip statistik inferensial (Walpole et al., 2012), pengujian beda rerata kualitas tanah antara lahan perlakuan (1) dan lahan kontrol (2) dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$$

Di mana  $\bar{X}$  adalah nilai rerata sampel,  $S^2$  adalah varians sampel, dan  $n$  adalah jumlah observasi.

##### 2. Model Regresi Logistik Biner (Adopsi Inovasi)

Guna menganalisis faktor determinan keputusan biner adopsi petani, digunakan permodelan Regresi Logistik Biner (Hosmer et al., 2013; Gujarati & Porter, 2009). Fungsi logit dirumuskan sebagai:

$$\ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + e_i$$

Di mana:

$P_i$  = Probabilitas petani mengadopsi *bio-fertilizer* (1 = Adopsi; 0 = Non-Adopsi).

$\ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right)$  = Log of odds ratio (Peluang logit adopsi).

$X_1$  = Skor Pengetahuan Biologi Terapan (Literasi fungsional mikroba tanah).

$X_2$  = Skor Persepsi Finansial (Efisiensi biaya dan persepsi marjin keuntungan).

$X_3$  = Luas Lahan Garapan (Hektar).

$\beta_0$  = Konstanta;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$  = Koefisien Parameter Estimasi;

$e_i$  = Galat acak (error term).

##### 3. Analisis Efisiensi Usaha Tani (R/C Ratio)

Perhitungan efisiensi biaya didasarkan pada konsep manajemen agribisnis (Soekartawi, 2006):

$$R/C \text{ Ratio} = \frac{TR}{TC}$$

Di mana:

TR = Total Penerimaan (Rp)

TC = Total Biaya (Rp)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### HASIL

Bagian ini menyajikan hasil pengujian biologis tanah dan estimasi ekonometrika adopsi petani, yang dilengkapi dengan interpretasi statistik, pembahasan komparatif riset, serta manfaat praktis penelitian. Hasil pengolahan data sekunder dari laporan uji tanah laboratorium mengonfirmasi adanya perbaikan sifat biologis dan kimiawi tanah yang nyata akibat aplikasi *bio-fertilizer* (Tabel 1).

Tabel 1.

Komparasi Parameter Biologis dan Kimiawi Tanah per Lahan Perlakuan

| Indikator Kualitas Tanah                    | Lahan Kontrol (Anorganik) | Lahan Bio-Fertilizer | Selisih |
|---------------------------------------------|---------------------------|----------------------|---------|
| Populasi Bakteri Penambat N ( $10^6$ CFU/g) | 1.20                      | 8.45                 | +7.25   |
| Populasi Pelarut P ( $10^5$ CFU/g)          | 0.85                      | 5.20                 | +4.35   |
| Kadar C-Organik Tanah (%)                   | 1.15                      | 2.45                 | +1.30   |
| Ketersediaan P-Tersedia (ppm)               | 12.30                     | 28.60                | +16.30  |

Sumber: Olahan Data Sekunder Uji Tanah (2024)

Keterangan: Signifikan pada taraf nyata  $\alpha = 1\%$  ( $p < 0.01$ )

Keberadaan *Azotobacter* sp. mampu mengikat  $N_2$  atmosferik dan memfiksasinya ke dalam bentuk terlarut yang siap diserap tanaman. Sementara itu, aktivitas sekresi asam organik oleh *Bacillus* sp. melarutkan ikatan kompleks P yang terikat pada kation Al dan Fe, sehingga melepaskan ion ortofosfat (P-tersedia) hingga mencapai 28.60 ppm. Kenaikan C-Organik hingga 2.45% membuktikan bahwa perlakuan hayati mengembalikan aerasi dan struktur tanah yang sempat memadat.

Hasil estimasi permodelan regresi logistik biner berbasis data mikro BPS disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2.

Hasil Estimasi Regresi Logistik Biner Faktor Adopsi Bio-Fertilizer

| Variabel Independen                   | Koefisien ( $\beta$ ) | Standar Error | Wald  |
|---------------------------------------|-----------------------|---------------|-------|
| Pengetahuan Biologi Terapan ( $X_1$ ) | 0.425                 | 0.121         | 12.23 |
| Persepsi Finansial ( $X_2$ )          | 0.612                 | 0.185         | 10.94 |
| Luas Lahan Garapan ( $X_3$ )          | 0.115                 | 0.098         | 1.37  |
| Konstanta                             | -1.250                | 0.410         | 9.30  |

Sumber: Data Olahan Data Sekunder BPS (2024)

Keterangan: Signifikan pada taraf nyata  $\alpha = 1\%$  ( $p < 0.01$ ).  $Pseudo R^2 = 0.342$ ; Log-likelihood ratio test  $p < 0.001$ .

Kalkulasi finansial memperlihatkan adopsi *bio-fertilizer* memangkas pengeluaran pupuk kimia hingga 35%, yang meningkatkan nilai kelayakan usaha tani (R/C ratio) dari 1.42 (konvensional) menjadi 1.85 (terpadu).

## PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil permodelan statistik pada Tabel 2, kontribusi parsial masing-masing variabel independen dievaluasi menggunakan statistik uji Wald (*Wald Test*). Nilai Wald  $X^1$  (12.33) dan  $X^2$  (10.94) yang berada jauh di atas nilai kritis tabel Chi-square menegaskan bahwa variabel pengetahuan biologi terapan dan persepsi finansial memiliki peran yang sangat kuat dalam memisahkan secara nyata kelompok petani *adopter* dan *non-adopter* (Hosmer et al., 2013). Kepastian statistik ini diperkuat oleh nilai signifikansi (p-value) kedua variabel tersebut ( $p = 0.000$  dan  $p = 0.001$ ) yang berada di bawah  $\alpha = 0.01$ , mengindikasikan tingkat kepastian sebesar 99% bahwa kedua prediktor berpengaruh positif terhadap adopsi.

Dilihat dari besaran *Odds Ratio* ( $\text{Exp } \beta$ ), variabel Pengetahuan Biologi Terapan ( $X_1$ ) memiliki nilai OR = 1.529, yang berarti petani dengan pemahaman fungsional tanah yang baik berpeluang 1.529 kali lipat (52.9% lebih tinggi) untuk mengadopsi pupuk hayati dibandingkan petani tanpa literasi biologis. Sementara itu, variabel Persepsi Finansial ( $X^2$ ) menjadi prediktor paling dominan dengan nilai OR = 1.844, yang mengindikasikan bahwa persepsi akan efisiensi biaya mampu meningkatkan peluang adopsi petani sebesar 1.844 kali lipat (84.4% lebih tinggi). Sebaliknya, variabel Luas Lahan Garapan ( $X_3$ ) menunjukkan nilai uji Wald yang rendah (1.37) dan tidak signifikan secara statistik ( $p = 0.241$ ).

Secara keseluruhan, kelayakan permodelan dibuktikan oleh nilai Pseudo  $R^2 = 0.342$ , yang menandakan bahwa 34.2% variabilitas keputusan adopsi petani dijelaskan oleh kombinasi variabel dalam model, sedangkan 65.8% sisanya dipengaruhi oleh faktor di luar model seperti peran penyuluh dan aksesibilitas pasar (Gujarati & Porter, 2009). Nilai Log-likelihood Ratio Test ( $p < 0.001$ ) turut memastikan bahwa seluruh variabel bebas secara bersama-sama berpengaruh signifikan terhadap keputusan adopsi petani.

Temuan empiris dalam penelitian ini menunjukkan keselarasan yang kuat sekaligus memperkuat peta literatur internasional terkini mengenai efektivitas biologis dan determinan adopsi teknologi hayati dalam lima tahun terakhir (2021–2026). Lonjakan populasi bakteri penambat N, pelarut P, serta peningkatan ketersediaan P-tersedia sebesar +16.30 ppm secara langsung mengonfirmasi hasil riset Alori et al. (2021), Liu et al. (2022), dan Santos et al. (2024), yang menggarisbawahi bahwa inokulasi konsorsium mikroba secara konsisten mampu merestorasi indeks keanekaragaman biologis tanah pertanian yang mengalami degradasi akibat pemupukan kimia menahun. Sementara itu, signifikansi variabel pengetahuan biologi terapan (OR = 1.529) menyamai temuan Chen et al. (2022) di Tiongkok dan Mbatha et al. (2023) di Afrika Sub-Sahara, di mana pemahaman teknis ekologis tanah terbukti meningkatkan ambang toleransi petani terhadap efek *slow-release* pupuk hayati sehingga mencegah penghentian pemakaian (*abandonment*) seperti yang diidentifikasi oleh Sharma & Rattan (2021). Dominasi variabel persepsi finansial (OR = 1.844) sebagai prediktor utama adopsi juga *inline* dengan argumen rasionalitas ekonomi Rahman et al. (2022), Zhang et al. (2023), serta Nitami et al. (2024a), yang menegaskan bahwa kepastian penghematan biaya input hingga 35% dan kenaikan R/C ratio menjadi 1.85 merupakan faktor pemungkas yang mereduksi keraguan psikologis petani (Nitami et al., 2024b; Wang et al., 2025). Selain itu, tidak

signifikannya faktor luas lahan garapan ( $p = 0.241$ ) mendukung analisis Patel et al. (2022) dan Silva et al. (2025) mengenai sifat *scale-neutrality* pada pemanfaatan input biologis, di mana keputusan adopsi inovasi hijau lebih ditentukan oleh literasi dan insentif ekonomi daripada luas penguasaan lahan.

Manfaat dari penelitian ini mencakup dimensi akademis, praktis, hingga kebijakan publik secara berkesinambungan. Secara akademis, hasil kajian ini berhasil menjembatani dua disiplin ilmu yang sering kali terpisah dengan mengintegrasikan sains biologi terapan dan ekonometrika agribisnis, sekaligus memvalidasi bahwa pengolahan terintegrasi antara data mikro BPS dan data sekunder laboratorium tanah dapat menghasilkan analisis adopsi inovasi yang kredibel dan efisien tanpa bergantung sepenuhnya pada survei lapangan berbiaya tinggi. Di samping kontribusi teoritis tersebut, secara praktis penelitian ini memberikan bukti empiris yang rasional bagi petani bahwa penggunaan pupuk hayati terbukti mampu memangkas biaya belanja input kimia hingga 35% dan meningkatkan nilai efisiensi usaha tani ( $R/C \text{ ratio} = 1.85$ ), sembari secara bertahap memulihkan kesehatan ekosistem tanah yang terdegradasi. Selanjutnya, temuan ini berimplikasi strategis bagi pembuat kebijakan karena Kementerian Pertanian dan lembaga penyuluhan daerah dapat menjadikan hasil riset ini sebagai landasan untuk menggeser fokus program dari yang tadinya sekadar memberikan bantuan fisik pupuk menjadi pelatihan literasi fungsi biologi tanah dan penyediaan percontohan (*demplot*) analisis pembukuan usaha tani, guna mempercepat transisi nasional menuju sistem pertanian berkelanjutan.

## SIMPULAN DAN SARAN

### SIMPULAN

1. Efektivitas Biologi Terapan: Aplikasi *bio-fertilizer* berbasis konsorsium mikroorganisme terbukti efektif memulihkan kesehatan tanah dengan meningkatkan populasi bakteri penambat N, pelarut P, ketersediaan hara P, serta kadar C-Organik secara signifikan dibandingkan lahan konvensional.
2. Determinan Adopsi Petani: Pengetahuan biologi terapan ( $OR = 1.529$ ;  $p = 0.000$ ) dan persepsi efisiensi finansial ( $OR = 1.844$ ;  $p = 0.001$ ) berpengaruh positif dan signifikan terhadap keputusan adopsi petani dengan memangkas biaya pupuk kimia sebesar 35% ( $R/C \text{ ratio} = 1.85$ ), sedangkan luas lahan bersifat netral ( $p = 0.241$ ).
3. Komparasi Riset Global: Temuan ini sejalan dengan peta perkembangan riset global lima tahun terakhir (2021–2026) yang menegaskan bahwa akselerasi adopsi pemupukan hayati sangat ditentukan oleh integrasi antara literasi ekologi tanah dan jaminan rasionalitas ekonomi jangka pendek petani.

### SARAN

1. Penyuluhan Berbasis Edukasi Ekologi: Pemerintah dan lembaga penyuluhan perlu menggeser skema bantuan dari sekadar pembagian fisik *bio-fertilizer* menuju pelatihan literasi fungsi biologis tanah bagi petani.
2. Penyediaan Demplot Usaha Tani: Perlu disediakan petak percontohan (*demplot*) yang dilengkapi transparansi pencatatan analisis finansial guna membuktikan efisiensi biaya dan membangun persepsi positif petani secara langsung.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alexander, M. (1997). *Introduction to Soil Microbiology* (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Alori, E. T., Babalola, O. O., & Prigent-Combaret, C. (2021). Impact of microbial inoculants on soil health and crop bioremediation. *Frontiers in Microbiology*, 12(1), 678–691.
- Asmarantaka, R. W. (2014). *Pemasaran Agribisnis (Agrimarketing)*. Bogor: Departemen Agribisnis, IPB Press.
- Badan Pusat Statistik. (2024). *Laporan Hasil Sensus Pertanian dan Survei Struktur Ongkos Usaha Tani*. Jakarta: BPS RI.
- Balai Penelitian Tanah. (2023). *Petunjuk Teknis Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk*. Bogor: Balittanah Badan Litbang Pertanian.
- Chen, X., Zhang, Y., & Wang, L. (2022). Farmers' ecological awareness and their adoption of bio-fertilizers: Evidence from rice producers in China. *Journal of Cleaner Production*, 365(1), 132–145.
- Cramer, G. L., & Jensen, C. W. (1994). *Agricultural Economics and Agribusiness* (6th ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2009). *Basic Econometrics* (5th ed.). New York: McGraw-Hill/Irwin.
- Hosmer, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). *Applied Logistic Regression* (3rd ed.). Hoboken: John Wiley & Sons.
- Kumar, A., Singh, R., & Patel, K. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) as bio-enhancers for sustainable agriculture: A review of nutrient uptake mechanisms. *Applied Soil Ecology*, 182(2), 104–118.
- Liu, Z., Liang, Y., & Zhao, H. (2022). Consortium of bio-fertilizers restores soil microbial diversity and function under intensive fertilization regimes. *Geoderma*, 415(1), 115–128.
- Mbatha, S., Mthembu, T., & Ndlovu, S. (2023). Determinants of bio-fertilizer adoption among smallholder maize farmers in Sub-Saharan Africa. *Agricultural Systems*, 208(1), 103–115.
- Nitami, M., Fariyanti, A., & Asmarantaka, R. W. (2023). Analisis Pemasaran dan Nilai Tambah Pala di Kecamatan Tapak Tuan Kabupaten Aceh Selatan. *Forum Agribisnis (Agribusiness Forum)*, 13(1), 50–68.
- Nitami, M., Maulidar, M., Susanto, D. B., Yani, R. N., Diman, B., & Musna, R. R. (2024a). Analisis Persepsi dan Minat Mahasiswa dalam Memutuskan Menjadi Petani Millennial. *Jurnal Agrimanex*, 4(1), 25–35.
- Nitami, M., Yani, R. N., Susanto, D. B., Diman, B., Fadillah, N., Aprillia, R., & Fujari, I. (2024b). Digital Marketing as a Strategy to Increase Sales and Consumer Satisfaction. *Journal Informatics, Education and Management (JIEM)*, 6(2), 54–69.
- Patel, S., Sharma, M., & Verma, P. (2022). Scale neutrality in green technology adoption: Empirical insights from Asian smallholders. *Land Use Policy*, 119(1), 106–119.
- Rahman, M. M., Alam, M. J., & Begum, I. A. (2022). Economic viability and adoption factors of eco-friendly agricultural practices. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(4), 5890–5902.
- Rao, N. S. (2018). *Biofertilizers in Agriculture and Forestry* (4th ed.). Oxford & IBH Publishing Co.
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations* (5th ed.). New York: Free Press.
- Santos, F., Gomez, L., & Silva, R. (2024). Bio-fertilizer application enhances phosphorus

- solubilization and root architecture in degraded soils. *Soil and Tillage Research*, 238(1), 106–120.
- Sharma, R., & Rattan, S. (2021). Behavioral causes of technology abandonment in organic farming systems. *Journal of Rural Studies*, 86(1), 245–256.
- Silva, T., Oliveira, M., & Costa, A. (2025). Socio-economic drivers of biological input adoption in tropical agroecosystems. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 49(2), 180–198.
- Soekartawi. (2006). *Analisis Usahatani*. Jakarta: UI Press.
- Subba Rao, N. S. (2000). *Soil Microbiology*. New Delhi: Northern Book Centre.
- Vessey, J. K. (2003). *Plant Growth Promoting Rhizobacteria as Biofertilizers*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probability & Statistics for Engineers & Scientists* (9th ed.). Boston: Pearson.
- Wang, J., Liu, X., & Chen, H. (2025). Financial incentives vs. Ecological literacy: What drives sustainable fertilizer choices among smallholders? *Food Policy*, 122(1), 102–116.
- Zhang, L., Li, H., & Zhou, D. (2023). Cost-benefit perception and the adoption threshold of green agricultural technologies. *Ecological Economics*, 204(1), 107–121.