

Transformasi Budidaya Cabai Melalui Teknologi Ramah Lingkungan: Upaya Mewujudkan Ketahanan Pangan Berkelanjutan di Indonesia

Didin Purniawan*, Uci Musdalifah, Annisa, Endah Nurmasita, Ayu Andira, Aisyah, Wahyuni, Magfirah, Nurhafida, Firdayanti, Nurpadillah, Bahtiar, Dea Oktaviani, Aminah
Universitas Islam Negeri Palopo, Indonesia
2204040047@uinpalopo.ac.id*

Abstrak

Kegiatan pengabdian masyarakat ini dilaksanakan di Desa Lamunre Tengah, Kecamatan Belopa Utara, Kabupaten Luwu, sebagai upaya mengatasi rendahnya produktivitas cabai yang disebabkan oleh serangan hama, ketergantungan pada pupuk kimia, serta keterbatasan pengetahuan petani terhadap penerapan teknologi ramah lingkungan. Tujuan utama kegiatan ini adalah meningkatkan kapasitas, pengetahuan, dan keterampilan petani dalam praktik pertanian berkelanjutan melalui pelatihan pembuatan pupuk organik cair, biopestisida alami, dan sistem irigasi presisi sederhana berbasis sensor kelembapan tanah. Metode pelaksanaan meliputi observasi lapangan, penyuluhan interaktif, demonstrasi praktik, serta evaluasi pembelajaran menggunakan *pre-test* dan *post-test* terhadap 15 peserta. Hasil kegiatan menunjukkan peningkatan signifikan dalam tiga aspek utama, yaitu pemahaman terhadap konsep teknologi ramah lingkungan meningkat dari 33% menjadi 47%, praktik budidaya berkelanjutan naik dari 20% menjadi 67%, dan pemanfaatan teknologi pertanian cerdas meningkat dari 40% menjadi 47%, dengan rata-rata peningkatan keseluruhan sebesar 34%. Selain itu, petani menunjukkan perubahan sikap positif terhadap inovasi pertanian berbasis ekologi. Temuan ini menegaskan bahwa pendekatan partisipatif berbasis *learning by doing* efektif memperkuat kemandirian petani serta mendukung transformasi sistem pertanian menuju praktik yang efisien, adaptif terhadap perubahan iklim, dan berkelanjutan untuk memperkuat ketahanan pangan nasional.

Kata Kunci: Cabai; Ketahanan Pangan; Pelatihan Petani; Pertanian Berkelanjutan; Teknologi Ramah Lingkungan.

Abstract

*This community service program was conducted in Lamunre Tengah Village, Belopa Utara District, Luwu Regency, to address the low productivity of chili (*Capsicum annum L.*) caused by pest infestations, excessive reliance on chemical fertilizers, and farmers' limited knowledge of eco-friendly agricultural technologies. The program aimed to enhance farmers' knowledge, skills, and independence in sustainable agriculture practices through training on liquid organic fertilizer formulation, natural biopesticide production, and simple precision irrigation systems using soil moisture sensors. The methods included field observation, interactive counseling, hands-on demonstrations, and learning evaluation through pre-tests and post-tests administered to 15 participants. The results showed significant improvement across three main dimensions: understanding of eco-friendly technology increased from 33% to 47%, sustainable cultivation practices rose from 20% to 67%, and adoption of smart farming applications improved from 40% to 47%, with an overall average increase of 34%. In addition, participants demonstrated positive behavioral changes toward environmentally responsible innovation. These findings confirm that a participatory, learning-by-doing approach effectively strengthens farmers' capacity and self-reliance while fostering the transformation of the local agricultural system toward efficiency, climate adaptability, and sustainability in support of national food security.*

Keywords: Chili; Food Security; Farmer Training; Sustainable Agriculture; Eco-Friendly Technology.

1. Pendahuluan

Budidaya cabai merupakan sektor hortikultura strategis yang berkontribusi besar pada ketahanan pangan dan pendapatan rumah tangga di Indonesia. Namun, produktivitas komoditas ini rentan terhadap fluktuasi iklim, serangan hama, dan praktik pemupukan serta pengendalian hama yang masih konvensional. Ketergantungan pada pupuk dan pestisida kimia berdampak pada degradasi

kesuburan tanah dan meningkatnya biaya produksi. Oleh karena itu diperlukan adopsi teknologi ramah lingkungan yang efisien dan adaptif.

Penerapan teknologi ramah lingkungan menjadi salah satu pendekatan menjanjikan dalam menjawab tantangan tersebut. Teknologi seperti pengendalian hama terpadu (IPM), pupuk organik, sistem irigasi presisi, serta penerapan *Internet of Things* (IoT) terbukti mampu meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga keseimbangan ekosistem pertanian (Lamasigi *et al.*, 2024). Melalui pendekatan ini, diharapkan praktik budidaya dapat mengurangi ketergantungan pada bahan kimia dan memperkuat ketahanan pangan nasional.

Kegiatan pengabdian ini dilaksanakan di Desa Lamunre Tengah, Kecamatan Belopa Utara, Kabupaten Luwu, Provinsi Sulawesi Selatan, dengan jumlah penduduk lebih dari 3.000 jiwa. Mayoritas masyarakat bekerja sebagai Aparatur Sipil Negara (ASN) dan pedagang, sementara sebagian kecil berprofesi sebagai petani. Namun, praktik pertanian di wilayah ini masih bersifat konvensional. Petani menghadapi masalah serius seperti serangan hama thrips, kutu daun, dan antraknosa, serta dampak perubahan iklim yang memperburuk kondisi tanaman. Selain itu, penggunaan benih tidak unggul, pemupukan tidak seimbang, dan minimnya pendampingan teknis menyebabkan produktivitas rendah dan biaya produksi meningkat (Poudyal *et al.*, 2023).

Solusi yang diterapkan mencakup penerapan teknologi berkelanjutan dan peningkatan kapasitas petani. Upaya ini meliputi pengembangan varietas cabai tahan penyakit melalui teknologi *marker-assisted selection* (MAS) dan *CRISPR-Cas9* untuk meningkatkan ketahanan terhadap patogen seperti *Colletotrichum spp.* dan *Phytophthora capsici* (Kumar *et al.*, 2024; Lee *et al.*, 2022). Selain itu, diterapkan pengendalian hama terpadu (IPM) dengan pemanfaatan biopestisida alami seperti *Bacillus thuringiensis* (Bt), *Beauveria bassiana*, dan predator alami *Trichogramma spp.* serta *Coccinellidae* (Bayu dkk., 2021; Wiji Astuti & Hala, 2024). Sistem ini diperkuat dengan teknologi drone dan sensor multispektral untuk mendeteksi gejala penyakit sejak dini (Soussi *et al.*, 2024).

Selain itu, penggunaan biopestisida berbahan alami seperti neem oil dan *Trichoderma spp.* diterapkan untuk menekan penyakit jamur tanpa menimbulkan residu berbahaya (Ruangwong *et al.*, 2021). Penerapan pertanian pintar (*smart agriculture*) melalui sistem irigasi presisi berbasis sensor dan tenaga surya membantu efisiensi penggunaan air dan tenaga kerja. Inovasi lain seperti robot panen berbasis visi komputer meningkatkan efisiensi dan mengurangi kerusakan tanaman (Han *et al.*, 2025). Melalui penerapan teknologi tersebut, kegiatan ini diharapkan mampu mendorong transformasi pertanian di Desa Lamunre Tengah menuju sistem berkelanjutan, adaptif terhadap iklim, dan berorientasi pada ketahanan pangan nasional.

2. Latar Belakang

Ketahanan pangan merupakan isu global yang semakin penting di tengah perubahan iklim, pertumbuhan penduduk, dan degradasi lingkungan. Menurut FAO (2023), lebih dari 280 juta penduduk dunia mengalami kerawanan pangan sedang hingga parah, terutama di negara berkembang. Ketahanan pangan tidak hanya berarti ketersediaan pangan, tetapi juga mencakup aksesibilitas, kualitas gizi, serta stabilitas pasokan dalam jangka panjang. Di Indonesia, sektor pertanian memiliki peran vital dalam menjaga ketahanan pangan nasional, namun menghadapi tantangan serius seperti penurunan kesuburan tanah, alih fungsi lahan, dan rendahnya adopsi teknologi berkelanjutan. Penerapan teknologi ramah lingkungan menjadi strategi penting untuk mewujudkan sistem pangan yang tangguh, efisien, dan inklusif.

Salah satu komoditas hortikultura strategis yang paling terdampak oleh perubahan lingkungan adalah cabai (*Capsicum annuum L.*). Tanaman ini termasuk genus *Capsicum*, dan di Asia Tenggara lebih dikenal sebagai bumbu utama daripada sayuran, menjadikannya komoditas bernilai ekonomi tinggi. Cabai mengandung antioksidan dan vitamin C tinggi yang bermanfaat bagi kesehatan, namun penggunaannya berlebihan dapat mempengaruhi kesehatan lambung (Azlan *et al.*, 2022). Di dunia terdapat lebih dari 20 varietas cabai, termasuk cabai merah besar, keriting, rawit, jalapeno, hingga cayenne. Dalam budidayanya, cabai di dataran rendah dapat dipanen pertama kali pada umur 70–75 hari, sementara di dataran tinggi sekitar empat hingga lima bulan (Nisa & Ambarwati, 2022). Di Desa Lamunre Tengah, panen pertama dilakukan pada umur dua bulan dan panen puncak pada bulan keempat hingga kelima, menandakan potensi agronomis yang menjanjikan untuk pengembangan cabai skala lokal.

Menurut BPS (2024), konsumsi cabai merah nasional mencapai lebih dari 3,1 juta ton per tahun, namun produksi masih fluktuatif dan menurun sekitar 5,6% pada tahun 2023 akibat cuaca ekstrem dan serangan penyakit. Penyakit seperti antraknosa (*Colletotrichum spp.*) dan infeksi bakteri menyebabkan kehilangan hasil signifikan. Oleh karena itu, inovasi teknologi menjadi kunci utama untuk menekan risiko produksi dan meningkatkan efisiensi. Pendekatan pemuliaan tanaman berbasis bioteknologi seperti *marker-assisted selection (MAS)* dan *CRISPR-Cas9* memungkinkan pengembangan varietas cabai tahan penyakit dan stres lingkungan (Kumar *et al.*, 2024; Lee *et al.*, 2022). Varietas hasil rekayasa ini mampu mengurangi ketergantungan terhadap fungisida dan pestisida, menekan biaya produksi, serta memperkuat ketahanan tanaman terhadap kondisi ekstrem (Poudyal *et al.*, 2023).

Selain bioteknologi, pendekatan pengendalian hama terpadu (*integrated pest management/IPM*) menjadi strategi penting dalam menciptakan sistem budidaya yang berkelanjutan. IPM mengkombinasikan teknik mekanis, biologis, dan kimiawi secara selektif untuk menekan populasi hama tanpa merusak ekosistem (Awad Fahad, 2023). Penerapan biopestisida alami seperti *Bacillus thuringiensis (Bt)*, *Beauveria bassiana*, dan *Trichoderma spp.* telah terbukti efektif mengendalikan hama tanpa menimbulkan residu berbahaya (Ruangwong *et al.*, 2021). Penggunaan neem oil dengan kandungan azadirachtin juga membantu menekan populasi serangga dan penyakit jamur. Teknologi *modern* mendukung IPM melalui drone multispektral dan sensor tanah untuk mendeteksi gejala penyakit atau kekurangan hara secara dini (Soussi *et al.*, 2024), sehingga pengendalian dapat dilakukan secara presisi dan efisien.

Inovasi lain yang berkembang pesat adalah penerapan pertanian pintar (*smart agriculture*) berbasis *Internet of Things (IoT)*. Sistem ini mencakup sensor kelembapan tanah, pH, dan nutrisi yang terhubung dengan sistem irigasi presisi tenaga surya untuk memastikan air dan pupuk diberikan sesuai kebutuhan tanaman (Lamasigi *et al.*, 2024). Penerapan robot panen dengan teknologi visi komputer juga mulai dikembangkan untuk mengurangi ketergantungan terhadap tenaga kerja musiman. Robot ini mampu mengenali cabai matang berdasarkan warna dan ukuran buah dengan akurasi tinggi, sehingga menekan kerusakan hasil (Han *et al.*, 2025). Sementara itu, nanoteknologi mulai dimanfaatkan dalam pengendalian hama dan pemupukan. Penggunaan nanopestisida berbasis perak dan nanopupuk pelepas lambat mampu meningkatkan efisiensi nutrisi sekaligus menurunkan pencemaran lingkungan (Nizamani *et al.*, 2024).

Pengabdian ini berlandaskan pada teori ketahanan pangan dari FAO (1996) dan Gliessman (2014) yang menekankan pentingnya keberlanjutan dalam produksi pangan, teori difusi inovasi oleh Rogers (2003) yang menjelaskan pentingnya dukungan sosial dalam adopsi teknologi, serta teori

agroekologi yang menekankan keseimbangan ekologis dalam sistem pertanian (Imran *et al.*, 2022). Penerapan irigasi presisi dan pupuk organik meningkatkan produktivitas dan pendapatan petani di Sumatera Utara (Novita *et al.*, 2024), sementara integrasi sistem pertanian pintar di Jepang dan Amerika Serikat menurunkan emisi karbon serta memperkuat ketahanan pangan lokal (Brunori *et al.*, 2019; Hou *et al.*, 2021). Namun, di tingkat petani kecil Indonesia, adopsi masih terbatas akibat kendala modal, literasi digital, dan kelembagaan pertanian yang lemah (Madik Linda *et al.*, 2025).

Kegiatan pengabdian ini diarahkan untuk mengimplementasikan pendekatan teknologi ramah lingkungan pada sistem budidaya cabai di Desa Lamunre Tengah, dengan fokus pada peningkatan kapasitas petani, efisiensi produksi, dan keberlanjutan lingkungan. Integrasi inovasi bioteknologi, IPM, biopestisida, IoT, dan nanoteknologi diharapkan dapat menjadi model adaptasi pertanian yang produktif sekaligus berwawasan ekologis.

3. Metode

3.1 Target Capaian

Kegiatan pengabdian ini bertujuan untuk meningkatkan pengetahuan dan keterampilan petani di Desa Lamunre Tengah, Kecamatan Belopa Utara, Kabupaten Luwu, dalam penerapan teknologi pertanian ramah lingkungan untuk budidaya cabai. Target capaian meliputi:

- 1) Meningkatnya pemahaman petani mengenai teknik budidaya cabai yang efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.
- 2) Terbentuknya kemampuan petani dalam mengidentifikasi serta mengatasi serangan hama, penyakit, dan ketidakseimbangan nutrisi melalui metode nonkimia berbasis biopestisida dan pengendalian hama terpadu (IPM).
- 3) Tersusunnya rencana tindak lanjut berupa penerapan praktik budidaya cabai berkelanjutan berbasis teknologi sederhana di tingkat kelompok tani.

Permasalahan yang melatarbelakangi kegiatan ini mencakup rendahnya produktivitas akibat serangan hama (kutu daun, thrips, antraknosa), penggunaan benih yang kurang sesuai, serta pola pemupukan yang tidak seimbang. Selain itu, perubahan iklim dan teknik pengendalian gulma yang tidak tepat memperburuk kondisi tanaman. Karena itu, kegiatan dirancang untuk memperkuat kapasitas petani melalui pendekatan teknologi tepat guna dan ramah lingkungan.

3.2 Implementasi Kegiatan

Kegiatan dilaksanakan pada 4–5 Agustus 2025 di Balai Desa Lamunre Tengah dan lahan percontohan warga, dengan 15 peserta (petani, penyuluh, perangkat desa). Metode bersifat kualitatif deskriptif dan meliputi observasi lapangan, diskusi kelompok terarah (FGD), demonstrasi praktik, serta pemasangan sistem irigasi tetes sederhana berbasis sensor kelembapan. Pendekatan *learning by doing* diterapkan untuk memastikan transfer keterampilan praktis.

Pendekatan ini bertujuan menggali pengalaman dan persepsi petani terhadap teknologi ramah lingkungan, serta memperkenalkan inovasi sederhana yang relevan dengan kondisi agroklimat setempat, termasuk pengendalian hama terpadu, pembuatan biopestisida alami, dan pemanfaatan teknologi pertanian pintar (IoT sederhana dan sensor kelembapan tanah).

3.2.1 Materi Kegiatan

Materi kegiatan dikembangkan berdasarkan prinsip solusi agronomis terapan yang sesuai dengan kebutuhan petani cabai, meliputi:

- 1) Konsep dasar pertanian ramah lingkungan, mencakup pengendalian hama terpadu (IPM) dan prinsip efisiensi sumber daya.
- 2) Sosialisasi pembuatan biopestisida dan pupuk organik cair, menggunakan bahan alami seperti neem oil, *Trichoderma spp.*, dan *Bacillus thuringiensis* yang berfungsi sebagai agen hayati untuk mengendalikan hama dan meningkatkan kesuburan tanah.
- 3) Penerapan teknologi pertanian pintar sederhana, termasuk sistem irigasi tetes berbasis sensor kelembapan tanah dan panel surya untuk efisiensi air.
- 4) Diskusi kelompok dan penyusunan rencana tindak lanjut, meliputi strategi penerapan hasil sosialisasi dan pengelolaan lahan secara berkelanjutan.

3.2.2 Pelaksanaan Kegiatan

Hari pertama difokuskan pada penyuluhan dan demonstrasi teknik pembuatan pupuk serta biopestisida organik, dilanjutkan dengan praktik langsung oleh peserta. Hari kedua meliputi demonstrasi penerapan pengendalian hama alami di lahan cabai dan diskusi kelompok mengenai tantangan lokal serta solusi berbasis teknologi sederhana.

Pendekatan *learning by doing* digunakan agar peserta tidak hanya memahami teori, tetapi juga menguasai keterampilan praktis. Hasil kegiatan menunjukkan bahwa petani mampu membuat dan mengaplikasikan pupuk organik cair serta memahami prinsip dasar pengendalian hama biologis.



Gambar 1. Demonstrasi Penyemprotan Biopestisida oleh Tim Pelaksana



Gambar 2. Diskusi antara Petani dan Tim Pelaksana untuk Merumuskan Strategi Penerapan Teknologi Ramah Lingkungan di Desa Lamunre Tengah.



Gambar 3. Dokumentasi Bersama Tim Pelaksana, Perangkat Desa dan Mitra Kegiatan

3.3 Metode Pengukuran Capaian Kegiatan

Evaluasi dilakukan melalui observasi langsung, wawancara, dan penilaian partisipatif. *Pre-test* dan *post-test* digunakan untuk menilai peningkatan pengetahuan, keterampilan, dan sikap peserta terhadap teknologi ramah lingkungan.

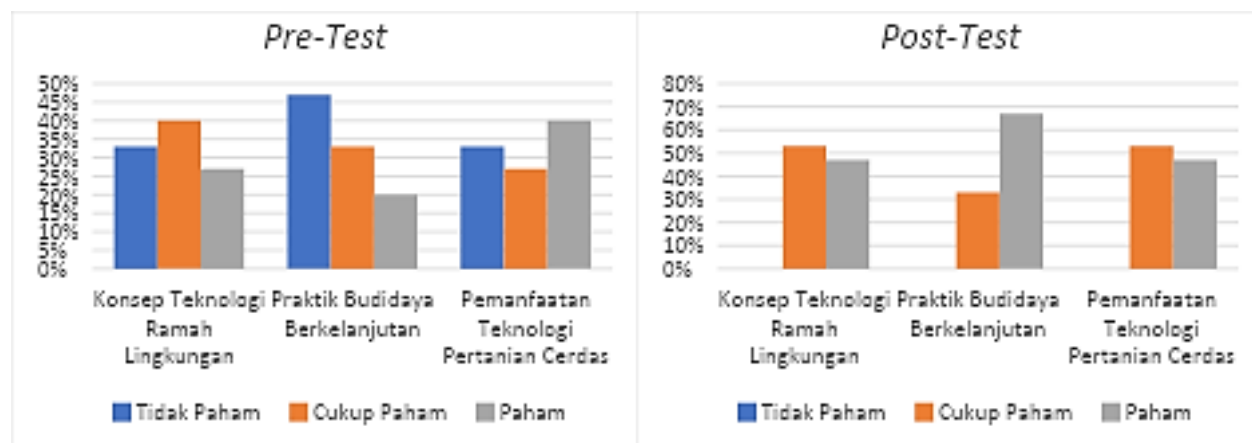
Capaian kegiatan diukur pada tiga dimensi utama:

- 1) Peningkatan pemahaman tentang pengendalian hama terpadu, biopestisida, dan irigasi presisi.
- 2) Kemampuan membuat pupuk organik cair dan biopestisida berbasis bahan alami.
- 3) Komitmen petani untuk menerapkan dan menyebarkan praktik pertanian ramah lingkungan di kelompok tani.

Hasil triangulasi dari observasi, wawancara, dan tanggapan peserta menjadi dasar untuk merancang program pendampingan lanjutan, berupa pembentukan kelompok tani binaan berorientasi pertanian berkelanjutan di Desa Lamunre Tengah.

4. Hasil dan Diskusi

Untuk mengukur efektivitas kegiatan sosialisasi teknologi ramah lingkungan, dilakukan evaluasi menggunakan instrumen *pre-test* dan *post-test* terhadap 15 petani peserta kegiatan di Desa Lamunre Tengah. Pengukuran ini bertujuan menilai perubahan tingkat pengetahuan dan pemahaman petani terhadap konsep budidaya berkelanjutan, penggunaan pupuk organik, pestisida hayati, serta penerapan sistem irigasi presisi. Hasil dari kedua pengujian ini ditampilkan pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Hasil *Pre-Test* dan *Post-Test*

Hasil *pre-test* pada Gambar 4 menunjukkan bahwa tingkat pemahaman awal peserta masih tergolong rendah. Pada aspek konsep teknologi ramah lingkungan, hanya 33% peserta yang memahami dengan baik, 40% cukup paham, dan 27% belum memahami. Pada praktik budidaya berkelanjutan, tingkat pemahaman lebih rendah, hanya 20% yang memahami, 33% cukup paham, dan 47% tidak paham. Sementara pada aspek pemanfaatan teknologi pertanian cerdas, hanya 40% peserta yang memahami, 27% cukup paham, dan 33% tidak paham. Kondisi ini memperlihatkan bahwa sebagian besar petani di Desa Lamunre Tengah masih bergantung pada praktik konvensional dan memiliki keterbatasan pengetahuan terhadap sistem pertanian ramah lingkungan serta teknologi modern.

Setelah kegiatan Sosialisasi dan praktik lapangan dilaksanakan, hasil *post-test* menunjukkan peningkatan signifikan di semua aspek. Pemahaman terhadap konsep teknologi ramah lingkungan meningkat menjadi 47% paham dan 53% cukup paham. Pada aspek praktik budidaya berkelanjutan, 67% peserta menyatakan paham dan 33% cukup paham, sedangkan tidak ada lagi

peserta yang berada dalam kategori tidak paham. Begitu pula dengan pemanfaatan teknologi pertanian cerdas, sebanyak 47% peserta sudah memahami dan 53% cukup paham. Secara kuantitatif, peningkatan pemahaman peserta mencapai rata-rata 34% dibandingkan sebelum kegiatan.

5. Kesimpulan

Kegiatan pengabdian masyarakat di Desa Lamunre Tengah menunjukkan bahwa sosialisasi teknologi ramah lingkungan pada budidaya cabai berhasil meningkatkan pengetahuan dan keterampilan petani. Berdasarkan hasil *pre-test* dan *post-test*, tingkat pemahaman petani terhadap konsep teknologi ramah lingkungan meningkat dari 33% menjadi 47%, praktik budidaya berkelanjutan naik dari 20% menjadi 67%, dan pemanfaatan teknologi pertanian cerdas dari 40% menjadi 47%, dengan rata-rata peningkatan keseluruhan sebesar 34%. Hasil ini membuktikan bahwa pendekatan penyuluhan interaktif dan praktik lapangan efektif dalam memperkuat kapasitas petani menuju sistem pertanian yang efisien dan berkelanjutan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Universitas Islam Negeri Palopo atas dukungan pendanaan transportasi dalam pelaksanaan kegiatan pengabdian masyarakat ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Pemerintah Desa Lamunre Tengah, Kecamatan Belopa Utara, Kabupaten Luwu, beserta para petani cabai yang telah berpartisipasi aktif selama sosialisasi berlangsung. Dukungan dan kerja sama dari seluruh pihak telah berkontribusi besar terhadap keberhasilan kegiatan ini dalam memperkuat kapasitas petani menuju penerapan teknologi pertanian ramah lingkungan yang berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- Awad Fahad, A. (2023). Modern techniques in integrated pest management to achieve sustainable agricultural development. *International Journal of Family Studies, Food Science and Nutrition Health*, 4(1), 1–14. <https://doi.org/10.21608/ijfsnh.2024.293410.1010>
- Azlan, A., Sultana, S., Huei, C. S., and Razman, M. R. (2022). Antioxidant, Anti-Obesity, Nutritional and Other Beneficial Effects of Different Chili Pepper: A Review. *Molecules*, 27(3), 898. <https://doi.org/10.3390/molecules27030898>
- Bayu, M. S. Y. I., Prayogo, Y., dan Indiaty, S. W. (2021). Beauveria bassiana: Biopestisida Ramah Lingkungan dan Efektif untuk Mengendalikan Hama dan Penyakit Tanaman. *Buletin Palawija*, 19(1), 41. <https://doi.org/10.21082/bulpa.v19n1.2021.p41-63>
- BPS. (2024). *Statistik Produksi Hortikultura Nasional Tahun 2023*. <https://www.bps.go.id/id/publication/2024/06/10/790c957ba8892f9771aeefb7/statistik-hortikultura-2023>
- Brunori, G., Maye, D., Galli, F., and Barling, D. (2019). Symposium introduction—ethics and sustainable agri-food governance: appraisal and new directions. *Agriculture and Human Values*, 36(2), 257–261. <https://doi.org/10.1007/s10460-019-09929-y>
- FAO. (1996). *Rome Declaration on World Food Security and World Food Summit Plan of Action*. <https://www.fao.org/3/w3613e/w3613e00.htm>
- FAO. (2023). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2023*. Food and Agriculture Organization. <https://www.fao.org>
- Gliessman, S. R. (2014). *Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems* (3rd ed.). CRC Press. <https://www.perlego.com/book/2193720/agroecology-the-ecology-of-sustainable->

- food-systems-third-edition-pdf
- Han, W., Luo, J., Wang, J., Gu, Q., Lin, L., Gao, Y., Chen, H., Luo, K., Zeng, Z., and He, J. (2025). Design of a Chili Pepper Harvesting Device for Hilly Chili Fields. *Agronomy*, 15(5), 1118. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051118>
- Hou, T., Zhao, J., Lei, Z., Shimizu, K., and Zhang, Z. (2021). Addition of air-nanobubble water to mitigate the inhibition of high salinity on co-production of hydrogen and methane from two-stage anaerobic digestion of food waste. *Journal of Cleaner Production*, 314, 127942. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127942>
- Imran, A., Sardar, F., Khaliq, Z., Nawaz, M. S., Shehzad, A., Ahmad, M., Yasmin, S., Hakim, S., Mirza, B. S., Mubeen, F., and Mirza, M. S. (2022). Tailored Bioactive Compost from Agri-Waste Improves the Growth and Yield of Chili Pepper and Tomato. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.787764>
- Kumar, R., Das, S. P., Choudhury, B. U., Kumar, A., Prakash, N. R., Verma, R., Chakraborti, M., Devi, A. G., Bhattacharjee, B., Das, R., Das, B., Devi, H. L., Das, B., Rawat, S., and Mishra, V. K. (2024). Advances in genomic tools for plant breeding: harnessing DNA molecular markers, genomic selection, and genome editing. *Biological Research*, 57(1), 80. <https://doi.org/10.1186/s40659-024-00562-6>
- Lamasigi, Z. Y., Haba, A. R. K., Jafar, M. I., Syamsir, and Hulukati, S. A. (2024). Automated Drip Irrigation System Based on IoT for Chili Plants Using Solar Panel Energy. *Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 5(1), 183–191. <https://doi.org/https://doi.org/10.32815/jpm.v5i1.2006>
- Lee, S., Chakma, N., Joung, S., Lee, J. M., and Lee, J. (2022). QTL Mapping for Resistance to Bacterial Wilt Caused by Two Isolates of *Ralstonia solanacearum* in Chili Pepper (*Capsicum annuum* L.). *Plants*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/plants11121551>
- Madik Linda, A., Setiawan, B., Shinta Hartati Wahyuningtyas, A., and Asmara, R. (2025). Determinants of Lowland Rice Farmers' Behavior in Food-Insecure Areas in East Nusa Tenggara, Indonesia: A COM-B Model Approach. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 56(3), 1–15. <https://doi.org/10.62321/issn.1000-1298.2025.3.1>
- Nisa, A., dan Ambarwati, E. (2022). Keragaman Morfologi Bunga dan Buah Dua Puluh Aksesori Cabai (*Capsicum* sp.). *Vegetalika*, 11(4), 280. <https://doi.org/10.22146/veg.63923>
- Nizamani, M. M., Hughes, A. C., Zhang, H.-L., & Wang, Y. (2024). Revolutionizing agriculture with nanotechnology: Innovative approaches in fungal disease management and plant health monitoring. *Science of The Total Environment*, 928, 172473. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172473>
- Novita, D., Supriana, T., . S., and Lubis, S. N. (2024). Strategy of Development of Sustainable Red Chili Agribusiness Areas in North Sumatra Province. *Journal of Ecohumanism*, 3(7). <https://doi.org/10.62754/joe.v3i7.4607>
- Poudyal, D., Joshi, B. K., Zhou, R., Ottosen, C.-O., and Dahal, K. C. (2023). Evaluating the physiological responses and identifying stress tolerance of Akabare chili landraces to individual and combined drought and heat stresses. *AoB PLANTS*, 15(6), plad083. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plad083>
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations*, 5th Edition. Free Press. <https://books.google.co.id/books?id=9U1K5LjUOwEC>
- Ruangwong, O.-U., Pornsuriya, C., Pitija, K., and Sunpapao, A. (2021). Biocontrol Mechanisms of *Trichoderma koningiopsis* PSU3-2 against Postharvest Anthracnose of Chili Pepper. *Journal of Fungi*, 7(4), 276. <https://doi.org/10.3390/jof7040276>

Soussi, A., Zero, E., Sacile, R., Trincherro, D., and Fossa, M. (2024). Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review. *Sensors*, 24(8), 2647. <https://doi.org/10.3390/s24082647>

Wiji Astuti, W., dan Hala, Y. (2024). Pemberdayaan *Bacillus Thuringiensis* sebagai Biopestisida pada Tanaman. *Jurnal Biogenerasi*, 10(1), 554–557. <https://doi.org/10.30605/biogenerasi.v10i1.5100>