

PKM-PERAN URBAN FARMING BERBASIS AQUAPONIK SERTA KONTRIBUSI GENERASI MUDA DALAM MENDUKUNG KETAHANAN PANGAN MENUJU INDONESIA EMAS 2045

Pungky Slamet Wisnu Kusuma^{1*}, Dyah Hariani², Vivin Andriani¹, Tatang Sopandi¹, Dicky Surya Putra Pradana¹

¹Program Studi Biologi, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas PGRI Adi Buana Surabaya

²Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya

*Email: pungky@unipasby.ac.id

Informasi Artikel

Abstrak

Kata kunci:

Aquaponik, NFT, urban farming, ketahanan pangan, Indonesia Emas 2045

Diterima: 2026-05-22

Disetujui: 2026-06-02

Dipublikasikan: 2026-07-09

Sistem aquaponik NFT (*Nutrient Film Technique*) merupakan inovasi urban farming yang mampu mendukung ketahanan pangan perkotaan secara berkelanjutan. Kegiatan pengabdian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi sistem aquaponik NFT serta meningkatkan pemahaman mahasiswa dan masyarakat mengenai penerapannya melalui Webinar Nasional. Hasil menunjukkan bahwa sistem aquaponik NFT mampu menghemat penggunaan air hingga 80–90% dibandingkan sistem konvensional melalui mekanisme resirkulasi tertutup. Integrasi ikan lele (*Clarias sp.*), tanaman kangkung (*Ipomoea aquatica*), dan bakteri nitrifikasi menciptakan sistem budidaya yang produktif, ramah lingkungan, dan mendukung konsep *zero waste system*. Selain itu, hasil evaluasi webinar menunjukkan peningkatan pemahaman peserta sebesar 26%, dari 62% menjadi 88% setelah kegiatan. Peserta juga menunjukkan antusiasme tinggi terhadap penerapan aquaponik berbasis *smart farming*. Dengan demikian, aquaponik NFT berpotensi menjadi Solusi urban farming modern dalam mendukung pembangunan berkelanjutan menuju Indonesia Emas 2045.

Keyword:
Aquaponics, NFT,
urban farming, food
security, Golden
Indonesia 2045

The NFT (Nutrient Film Technique) aquaponic system is an urban farming innovation capable of sustainably supporting urban food security. This research and educational activity aimed to analyze the efficiency of the NFT aquaponic system and improve public understanding of its implementation through a National Webinar. The results showed that the NFT aquaponic system was able to reduce water usage by 80–90% compared to conventional systems through a closed recirculation mechanism. The integration of catfish (*Clarias* sp.), water spinach (*Ipomoea aquatica*), and nitrifying bacteria created a productive, environmentally friendly cultivation system that supports the concept of a zero-waste system. In addition, webinar evaluation results showed an increase in participants' understanding by 26%, from 62% to 88% after the activity. Participants also demonstrated high enthusiasm for the implementation of smart farming-based aquaponics. Therefore, NFT aquaponics has strong potential as a modern urban farming solution to support sustainable development toward Golden Indonesia 2045).

PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk perkotaan di Indonesia terus meningkat seiring dengan urbanisasi yang pesat. Data Badan Pusat Statistik menunjukkan bahwa proporsi penduduk yang tinggal di wilayah perkotaan terus mengalami peningkatan dan diproyeksikan mencapai lebih dari 70% pada tahun 2045. Peningkatan urbanisasi tersebut berdampak pada meningkatnya kebutuhan pangan, sementara luas lahan pertanian produktif terus mengalami penurunan akibat alih fungsi lahan menjadi kawasan permukiman dan industri. Kondisi ini berpotensi menimbulkan ancaman terhadap ketahanan pangan di wilayah urban apabila tidak diantisipasi melalui inovasi pertanian yang efisien, berkelanjutan, dan adaptif terhadap keterbatasan ruang (Pida et al., 2025; Ramadan et al., 2025).

Salah satu inovasi yang berkembang dalam mendukung ketahanan pangan perkotaan adalah urban farming berbasis aquaponik. Aquaponik merupakan sistem budidaya terpadu yang menggabungkan akuakultur dan hidroponik dalam satu sistem resirkulasi tertutup (Negara et al., 2024). Dalam sistem ini, limbah metabolisme ikan yang mengandung amonia diubah oleh bakteri nitrifikasi menjadi nitrat yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber nutrisi bagi tanaman. Selanjutnya tanaman berfungsi sebagai biofilter alami yang membantu menjaga kualitas air sehingga dapat digunakan kembali untuk budidaya ikan. Sistem ini dinilai lebih hemat air, ramah lingkungan, dan sesuai diterapkan pada lahan terbatas di wilayah perkotaan (Wongkiew et al., 2021; Zhu et al., 2023).

Meskipun memiliki berbagai keunggulan, pemahaman masyarakat, khususnya generasi muda, mengenai penerapan aquaponik masih relatif terbatas. Hasil identifikasi awal yang dilakukan melalui formulir pendaftaran webinar menunjukkan bahwa sebagian besar calon peserta memiliki ketertarikan terhadap budidaya pangan mandiri, namun belum memahami prinsip kerja aquaponik, sistem NFT (*Nutrient Film Technique*), maupun manfaatnya dalam mendukung ketahanan pangan keluarga. Selain itu, peserta juga membutuhkan informasi mengenai penerapan teknologi pertanian modern yang mudah diaplikasikan pada skala rumah tangga maupun usaha kecil. Generasi muda memiliki peran strategis dalam pengembangan pertanian modern karena memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap teknologi digital dan inovasi pertanian berkelanjutan (Winarno & Muharami, 2025; Nair, 2025; Zamnuri et al., 2024).

Untuk menjawab kebutuhan tersebut, Kelompok Studi Biology Farming, Culture, Fishery and Assessment (BIFALFIA), Jurusan Biologi FMIPA Universitas Negeri Surabaya menyelenggarakan Webinar Nasional bertema “*Urban Farming Berbasis Aquaponik: Kontribusi Generasi Muda dalam Transformasi Pertanian dan Perikanan Perkotaan Menuju Indonesia Emas 2045*”. Kegiatan ini bertujuan meningkatkan pengetahuan peserta mengenai penerapan aquaponik sistem NFT sekaligus memperkenalkan teknologi urban farming yang dapat diterapkan secara mandiri sebagai upaya mendukung ketahanan pangan perkotaan dan pembangunan berkelanjutan menuju Indonesia Emas 2045.

METODE

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini ditujukan kepada mahasiswa, pelajar, akademisi, serta masyarakat umum yang memiliki minat terhadap pengembangan pertanian dan perikanan perkotaan berbasis teknologi. Peserta kegiatan berjumlah 272 orang yang berasal dari berbagai daerah di Indonesia dan mengikuti kegiatan secara daring melalui platform konferensi virtual. Pemanfaatan webinar sebagai media edukasi dipilih karena mampu menjangkau peserta dalam jumlah besar secara efektif serta mendukung penyebaran informasi dan transfer pengetahuan secara luas.

Tahap Pelaksanaan Kegiatan

Kegiatan pengabdian dilaksanakan pada tanggal 20 Desember 2025 melalui Webinar Nasional bertema “*Urban Farming Berbasis Aquaponik: Kontribusi Generasi Muda dalam Transformasi Pertanian dan Perikanan Perkotaan Menuju Indonesia Emas 2045*”. Pelaksanaan kegiatan dilakukan melalui tiga tahapan, yaitu persiapan, pelaksanaan, dan evaluasi sebagaimana direkomendasikan dalam model pelaksanaan program pengabdian masyarakat berbasis edukasi.

1. Tahap Persiapan

Tahap persiapan meliputi koordinasi tim pelaksana, penyusunan materi edukasi, publikasi kegiatan, pendaftaran peserta, serta penyusunan instrumen evaluasi berupa pre-test dan post-test. Selain itu, tim juga menyiapkan dokumentasi demonstrasi sistem aquaponik NFT yang digunakan sebagai

media pembelajaran selama webinar. Penyusunan materi dilakukan berdasarkan konsep urban farming berkelanjutan dan teknologi aquaponik yang telah banyak digunakan sebagai solusi ketahanan pangan pada lahan terbatas.

2. Tahap Pelaksanaan

Pelaksanaan kegiatan dilakukan melalui metode ceramah, demonstrasi, dan diskusi interaktif. Metode ceramah digunakan untuk menyampaikan konsep dasar urban farming dan aquaponik, sedangkan demonstrasi digunakan untuk memberikan gambaran penerapan teknologi secara praktis. Diskusi interaktif dilakukan untuk meningkatkan partisipasi peserta dan memperdalam pemahaman terhadap materi yang diberikan. Kombinasi metode ceramah dan diskusi diketahui efektif dalam meningkatkan transfer pengetahuan pada kegiatan edukasi masyarakat. Materi yang disampaikan meliputi: Konsep dasar urban farming, prinsip kerja sisten aquaponik NFT, Integrasi budidaya ikan dan tanaman dalam sistem aquaponic, peran generasi muda dalam pengembangan pertanian modern, potensi aquaponic dalam mendukung ketahanan pangan menuju Indonesia Emas 2045.

Sebagai pendukung penyampaian materi, narasumber juga menampilkan hasil demonstrasi penerapan sistem aquaponik NFT yang mengintegrasikan ikan lele (*Clarias sp.*) dan kangkung (*Ipomoea aquatica*) dalam satu sistem resirkulasi tertutup. Sistem aquaponik dipilih karena mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan menghasilkan dua komoditas secara simultan dalam satu unit budidaya.

3. Tahap Evaluasi

Evaluasi dilakukan untuk mengetahui efektivitas kegiatan dalam meningkatkan pemahaman peserta. Instrumen evaluasi berupa pre-test dan post-test yang masing-masing terdiri atas 10 pertanyaan pilihan ganda mengenai konsep aquaponik, prinsip kerja sistem NFT, efisiensi penggunaan air, dan manfaat aquaponik dalam mendukung ketahanan pangan.

Metode pre-test dan post-test banyak digunakan dalam kegiatan edukasi masyarakat karena mampu mengukur perubahan tingkat pengetahuan peserta sebelum dan sesudah intervensi pembelajaran. Selain evaluasi pengetahuan, peserta juga diminta mengisi kuesioner umpan balik untuk mengetahui tingkat kepuasan peserta terhadap materi, penyampaian narasumber, dan manfaat kegiatan.

Indikator Keberhasilan

Keberhasilan kegiatan ditentukan berdasarkan beberapa indikator berikut:

1. Jumlah peserta yang mengikuti webinar mencapai lebih dari 200 orang.
2. Terjadi peningkatan nilai rata-rata post-test dibandingkan pre-test.
3. Minimal 80% peserta memberikan respons positif terhadap pelaksanaan kegiatan.
4. Peserta menunjukkan minat untuk menerapkan sistem aquaponik sebagai bentuk urban farming di lingkungan masing-masing.

Penetapan indikator keberhasilan tersebut mengacu pada prinsip evaluasi program pengabdian masyarakat yang menekankan aspek partisipasi, peningkatan pengetahuan, dan perubahan sikap peserta setelah mengikuti kegiatan (Djazulli, 2024).

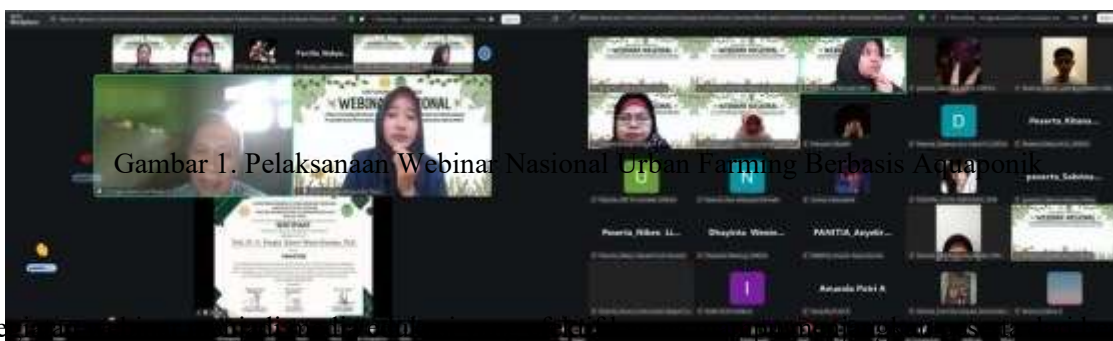
Analisis Data

Data hasil pre-test dan post-test dianalisis secara deskriptif kuantitatif menggunakan persentase. Peningkatan pemahaman peserta dihitung berdasarkan selisih nilai rata-rata sebelum dan sesudah kegiatan. Data hasil kuesioner umpan balik dianalisis secara deskriptif untuk menggambarkan respons dan tingkat kepuasan peserta terhadap kegiatan yang dilaksanakan. Analisis deskriptif digunakan karena sesuai untuk menggambarkan perubahan pengetahuan dan respons peserta pada kegiatan pengabdian masyarakat

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat dilaksanakan melalui Webinar Nasional bertema “Urban Farming Berbasis Aquaponik: Kontribusi Generasi Muda dalam Transformasi Pertanian dan Perikanan Perkotaan Menuju Indonesia Emas 2045” pada tanggal 20 Desember 2025. Kegiatan ini diikuti oleh 272 peserta yang berasal dari kalangan mahasiswa, pelajar, akademisi, dan masyarakat umum dari berbagai daerah di Indonesia. Tingginya jumlah peserta menunjukkan bahwa isu ketahanan pangan perkotaan dan teknologi urban farming berbasis aquaponik menjadi topik yang menarik perhatian masyarakat, khususnya generasi muda.

Pelaksanaan webinar berlangsung secara interaktif melalui penyampaian materi, demonstrasi penerapan sistem aquaponik NFT (Nutrient Film Technique), serta sesi diskusi dan tanya jawab. Materi yang diberikan meliputi konsep dasar urban farming, prinsip kerja aquaponik, integrasi budidaya ikan dan tanaman, pemanfaatan teknologi digital dalam sistem pertanian modern, serta peluang pengembangan aquaponik sebagai solusi ketahanan pangan menuju Indonesia Emas 2045. Peserta diberikan kesempatan untuk berdiskusi secara langsung dengan narasumber mengenai peluang dan tantangan implementasi aquaponik pada skala rumah tangga maupun usaha kecil.



Gambar 1. Pelaksanaan Webinar Nasional Urban Farming Berbasis Aquaponik

Ke... sebagai wilayah tanpa batasan geografis. Model pembelajaran daring juga memungkinkan penyebarluasan informasi secara lebih luas dan efisien sehingga dapat meningkatkan akses masyarakat terhadap pengetahuan mengenai teknologi pertanian modern.

Demonstrasi Sistem Aquaponik

Sebagai bagian dari kegiatan edukasi, peserta diperkenalkan pada demonstrasi penerapan sistem aquaponik NFT yang mengintegrasikan budidaya ikan lele (*Clarias* sp.) dan tanaman kangkung (*Ipomoea aquatica*) dalam satu sistem resirkulasi tertutup. Demonstrasi ini bertujuan memberikan gambaran nyata mengenai mekanisme kerja aquaponik serta manfaatnya dalam mendukung produksi pangan pada lahan terbatas.

Hasil demonstrasi menunjukkan bahwa sistem aquaponik NFT mampu mendukung pertumbuhan tanaman dan ikan secara bersamaan. Tanaman kangkung menunjukkan pertumbuhan yang baik dengan tinggi tanaman berkisar 20–30 cm dan jumlah daun 8–12 helai selama masa pemeliharaan. Sementara itu, tingkat kelangsungan hidup ikan lele mencapai 85–95%, yang menunjukkan bahwa kualitas lingkungan budidaya tetap terjaga selama sistem beroperasi.

Sistem aquaponik NFT menunjukkan efisiensi penggunaan air yang tinggi karena air digunakan secara berulang dalam sistem tertutup. Penggunaan air diperkirakan dapat dihemat hingga 80–90% dibandingkan sistem budidaya konvensional. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa aquaponik merupakan teknologi budidaya yang mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air sekaligus menghasilkan dua komoditas pangan dalam satu sistem produksi (Wongkiew et al., 2021; Ibrahim et al., 2023).

Selain menghasilkan sayuran dan ikan secara simultan, sistem aquaponik juga mendukung konsep *zero waste system*. Limbah metabolisme ikan dimanfaatkan sebagai sumber nutrisi tanaman melalui aktivitas bakteri nitrifikasi sehingga mengurangi kebutuhan pupuk tambahan dan meminimalkan pencemaran lingkungan. Kondisi tersebut menjadikan aquaponik sebagai salah satu inovasi pertanian berkelanjutan yang sesuai diterapkan di wilayah perkotaan (Zhu et al., 2023).

Peningkatan Pemahaman Peserta

Keberhasilan kegiatan pengabdian dievaluasi melalui pemberian pre-test dan post-test kepada peserta webinar. Evaluasi dilakukan untuk mengetahui tingkat pemahaman peserta sebelum dan sesudah mengikuti kegiatan.

Tabel 1. Hasil Evaluasi Pemahaman Peserta

Parameter	Nilai (%)
Pre-test	62
Post-test	88
Peningkatan	26

Hasil evaluasi menunjukkan adanya peningkatan nilai rata-rata peserta dari 62% sebelum kegiatan menjadi 88% setelah kegiatan berlangsung. Dengan demikian terjadi peningkatan pemahaman sebesar 26%. Hasil ini menunjukkan bahwa materi yang disampaikan mampu meningkatkan pengetahuan

peserta mengenai konsep urban farming berbasis aquaponik, prinsip kerja sistem NFT, serta manfaat aquaponik dalam mendukung ketahanan pangan perkotaan.

Peningkatan pengetahuan tersebut menunjukkan bahwa metode webinar yang dipadukan dengan demonstrasi dan diskusi interaktif efektif dalam menyampaikan informasi kepada peserta. Hasil ini sejalan dengan berbagai kegiatan edukasi masyarakat yang menunjukkan bahwa kombinasi ceramah, demonstrasi, dan diskusi mampu meningkatkan pemahaman peserta secara signifikan karena peserta tidak hanya memperoleh informasi teoritis tetapi juga contoh penerapan secara praktis.

Respons dan Antusiasme Peserta

Selama sesi diskusi, peserta menunjukkan antusiasme yang tinggi terhadap materi yang disampaikan. Hal ini terlihat dari banyaknya pertanyaan yang diajukan terkait desain sistem aquaponik sederhana, pemilihan komoditas budidaya, pengelolaan kualitas air, serta peluang usaha berbasis aquaponik. Sebagian besar peserta menyatakan bahwa aquaponik merupakan teknologi yang menarik karena dapat diterapkan pada lahan sempit dengan kebutuhan air yang relatif rendah.

Selain itu, peserta juga menunjukkan ketertarikan terhadap penerapan teknologi digital dalam sistem budidaya, seperti penggunaan sensor kualitas air, *Internet of Things* (IoT), dan sistem monitoring otomatis. Ketertarikan tersebut menunjukkan bahwa generasi muda memiliki potensi besar untuk menjadi agen perubahan dalam transformasi pertanian modern berbasis teknologi. Temuan ini sejalan dengan pendapat Winarno dan Muharami (2025) yang menyatakan bahwa generasi muda memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap inovasi teknologi sehingga berperan penting dalam pengembangan pertanian berkelanjutan.

Implikasi Kegiatan terhadap Ketahanan Pangan

Kegiatan pengabdian ini memberikan kontribusi dalam meningkatkan literasi masyarakat mengenai teknologi produksi pangan yang efisien dan berkelanjutan. Melalui pemahaman yang lebih baik mengenai sistem aquaponik, peserta diharapkan mampu mengembangkan budidaya pangan secara mandiri pada lingkungan tempat tinggal masing-masing. Implementasi aquaponik tidak hanya berpotensi meningkatkan ketersediaan pangan rumah tangga, tetapi juga dapat menjadi peluang usaha yang mendukung perekonomian masyarakat.

Pengembangan urban farming berbasis aquaponik sejalan dengan upaya mewujudkan ketahanan pangan nasional, pemanfaatan sumber daya secara efisien, serta pembangunan ekonomi hijau yang menjadi bagian penting dalam visi Indonesia Emas 2045. Oleh karena itu, kegiatan edukasi dan pendampingan mengenai teknologi aquaponik perlu terus dilakukan agar pemanfaatannya dapat semakin luas di masyarakat.

Keterbatasan Kegiatan

Kegiatan ini masih memiliki beberapa keterbatasan, terutama karena pelaksanaan dilakukan secara daring sehingga belum memungkinkan adanya praktik langsung oleh seluruh peserta. Selain itu,

evaluasi yang dilakukan hanya mengukur peningkatan pengetahuan jangka pendek melalui pre-test dan post-test sehingga belum dapat menggambarkan tingkat adopsi teknologi aquaponik setelah kegiatan berlangsung. Oleh karena itu, diperlukan kegiatan lanjutan berupa pelatihan praktik dan pendampingan implementasi aquaponik secara langsung untuk meningkatkan keberlanjutan program pengabdian.

KESIMPULAN

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat melalui Webinar Nasional “*Urban Farming Berbasis Aquaponik: Kontribusi Generasi Muda dalam Transformasi Pertanian dan Perikanan Perkotaan Menuju Indonesia Emas 2045*” berhasil meningkatkan pengetahuan dan pemahaman peserta mengenai penerapan sistem aquaponik NFT sebagai salah satu solusi urban farming yang efisien dan berkelanjutan. Demonstrasi sistem aquaponik menunjukkan bahwa integrasi budidaya ikan lele (*Clarias sp.*) dan tanaman kangkung (*Ipomoea aquatica*) dalam sistem resirkulasi tertutup mampu mendukung produktivitas budidaya sekaligus menghemat penggunaan air hingga 80–90% dibandingkan sistem konvensional.

Hasil evaluasi kegiatan menunjukkan adanya peningkatan pemahaman peserta dari 62% sebelum kegiatan menjadi 88% setelah kegiatan berlangsung, atau meningkat sebesar 26%. Selain itu, peserta menunjukkan antusiasme yang tinggi terhadap pengembangan aquaponik sebagai alternatif budidaya pangan pada lahan terbatas dan sebagai peluang usaha berbasis teknologi. Temuan ini menunjukkan bahwa webinar efektif sebagai sarana edukasi dan diseminasi inovasi pertanian modern kepada masyarakat, khususnya generasi muda.

Melalui peningkatan literasi dan pemahaman mengenai urban farming berbasis aquaponik, kegiatan ini diharapkan dapat mendorong masyarakat untuk menerapkan teknologi budidaya yang hemat sumber daya, ramah lingkungan, dan produktif. Dengan demikian, aquaponik berpotensi menjadi salah satu inovasi yang mendukung ketahanan pangan perkotaan, pemberdayaan masyarakat, serta pencapaian visi pembangunan berkelanjutan menuju Indonesia Emas 2045.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kelompok Studi Biology Farming, Culture, Fishery and Assessment (BIFALFIA), Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya yang telah memberi kesempatan terhadap pengabdian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Djazulli Achmad R. 2024. Evaluasi Program Pemberdayaan Masyarakat. Sumatera. UMG Press. <http://eprints.umg.ac.id/11322/1/EVALUASI%20PROGRAM%20PEMBERDAYAAN%20MASYARAKAT%20%2B%20Cover%20-%20UMG%20Press%202024.pdf>
- Ibrahim, L. A., Shaghaleh, H., El-Kassar, G. M., Abu-Hashim, M., Elsadek, E. A., & Alhaj Hamoud, Y. (2023). Aquaponics: A Sustainable Path to Food Sovereignty and Enhanced Water Use Efficiency. *Water* 2023, Vol. 15, Page 4310, 15(24), 4310. <https://doi.org/10.3390/W15244310>
- Nair, C. S., Junge, R., Manoharan, R., Nishanth, D., Subramanian, R., Ahmed, Z. F. R., Bhasu, S.,

- Subramaniam, S., & Jaleel, A. (2025). Marine aquaponics for arid and coastal resilience: Closing loops in saline food systems. *Aquaculture Reports*, 45, 103123. <https://doi.org/10.1016/J.AQREP.2025.103123>
- Negara, Muh. R. K., Milal, M., Simanjuntak, M. P., Putri, D. A., Hapsari, S. K., Chairani, D. P., Respati, Y. N. L., & Istiqomah, N. (2024). Akuaponik Sebagai Solusi Untuk Ketahanan Pangan dan Pemberdayaan Masyarakat di Kelurahan Bejen Kabupaten Karanganyar. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Bangsa*, 2(2), 263–272. <https://doi.org/10.59837/JPMBA.V2I2.808>
- Pida, D. F., Aini, K. N., & Putri, C. A. (2025). Dampak Urbanisasi terhadap Perkembangan Kota di Indonesia: Tinjauan dari Aspek Ekonomi Pembangunan. *WISSEN: Jurnal Ilmu Sosial Dan Humaniora*, 3(1), 226–238. <https://doi.org/10.62383/WISSEN.V3I1.562>
- Ramadan, E., Abdalla, S., Al Ahabbi, A., Gibreel, T., & Al Hosani, N. (2025). Towards sustainable urban agriculture in the arid GCC states: Drivers of technology adoption among small-scale farmers. *City and Environment Interactions*, 28, 100222. <https://doi.org/10.1016/J.CACINT.2025.100222>
- Winarno Agung, R., & Muharami Lestari, Y. (2025). Strategies for Digital Technology–Based Modern Agricultural Transformation: A Literature Review on the Role of the Millennial Generation in Driving Sustainable Agricultural Innovation in the Digital Era. *Prosiding Seminar Nasional Politeknik Pembangunan Pertanian Bogor*, 3(3), 474–490. <https://jurnal.polbangtan-bogor.ac.id/index.php/prosiding/article/view/1327>
- Wongkiew, S., Hu, Z., Lee, J. W., Chandran, K., Nhan, H. T., Marcelino, K. R., & Khanal, S. K. (2021). Nitrogen Recovery via Aquaponics–Bioponics: Engineering Considerations and Perspectives. *ACS ES&T Engineering*, 1(3), 326–339. <https://doi.org/10.1021/ACSESTENGG.0C00196>
- Zamnuri, M. A. H. bin, Qiu, S., Rizalmy, M. A. A. bin, He, W., Yusoff, S., Roeroe, K. A., Du, J., & Loh, K. H. (2024). Integration of IoT in Small-Scale Aquaponics to Enhance Efficiency and Profitability: A Systematic Review. *Animals : An Open Access Journal from MDPI*, 14(17), 2555. <https://doi.org/10.3390/ANI14172555>
- Zhu, Z., Yogev, U., Keesman, K. J., Rachmilevitch, S., & Gross, A. (2023). Integrated hydroponics systems with anaerobic supernatant and aquaculture effluent in desert regions: Nutrient recovery and benefit analysis. *Science of The Total Environment*, 904, 166867. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.166867>