



Penerapan Teknologi Sistem Hidroponik dan Perikanan Energi Baru Terbarukan Berbasis IoT untuk Mewujudkan Kemandirian Pangan dan Energi di Kelompok Tani Lestari Farm Sragen

Application of IoT-Based Hydroponic and Renewable Energy Fishery Systems to Achieve Food and Energy Independence in the Lestari Farm Sragen Farmers Group

Raden Danang Aryo Putro Satriyono^{1*}, Rizki Nurilyas Ahmad², Titik Suryani³

¹Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Indonesia

² Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Indonesia

³ Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Muhammadiyah, Indonesia

*Penulis Korespondensi: rd715@ums.ac.id

Article History:

Naskah Masuk: 22 Mei 2026;

Revisi: 18 Juni 2026;

Diterima: 25 Juli 2026;

Terbit: 31 Juli 2026

Keywords: Internet of Things; Off-Grid Solar Power System; Community Empowerment; Renewable Energy; Smart Farming.

Abstract: Food security and energy independence are key pillars of sustainable village development toward the Golden Indonesia 2045 vision. The "Lestari Farm" Farmers Group in Karanganyar Village, Plupuh, Sragen, faces structural constraints in expanding its integrated hydroponic and catfish aquaculture operations. Major challenges include high electricity costs for circulation pumps (accounting for 30%–35% of total operational expenses), commodity mortality risks caused by power outages, uncontrolled water quality (yielding predominantly Grade B/C products), and manual, unsegregated financial management. This partnership program aims to implement "SI-HEBAT" (Sistem Hidroponik & Perikanan Energi Baru Terbarukan / Renewable Energy Hydroponic & Fishery System) technology, which integrates a 300 Wp off-grid solar power system with an Internet of Things (IoT) ESP32-based automated nutrient control system. The methodology employed is Participatory Action Research (PAR), encompassing stages of community engagement, technology fabrication, technical training, digital management mentoring, and the establishment of a sustainability unit. The results demonstrate 100% efficiency in operational electricity costs, a reduction in crop/fish mortality rates to less than 5%, and a quality upgrade to predominantly uniform Grade A harvests. Furthermore, the partner successfully adopted digital financial bookkeeping via an app and launched rebranded, labeled product packaging.

Abstrak

Ketahanan pangan dan kemandirian energi merupakan pilar utama pembangunan desa berkelanjutan menuju visi Indonesia Emas 2045. Kelompok Tani "Lestari Farm" di Desa Karanganyar, Plupuh, Sragen menghadapi kendala struktural dalam melakukan ekspansi usaha budidaya hidroponik dan akuakultur lele terintegrasi. Masalah utama meliputi tingginya biaya energi listrik pompa sirkulasi (30%-35% dari total biaya operasional), risiko kematian komoditas akibat pemadaman listrik, kualitas air yang tidak terkontrol (dominan menghasilkan produk Grade B/C), serta tata kelola keuangan yang masih manual dan tercampur. Program kemitraan ini bertujuan untuk menerapkan teknologi "SI-HEBAT" (Sistem Hidroponik & Perikanan Energi Baru Terbarukan) yang mengintegrasikan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sistem Off-Grid 300 Wp dengan sistem kontrol nutrisi otomatis berbasis Internet of Things (IoT) ESP32. Metode yang digunakan adalah Participatory Action Research (PAR) yang meliputi tahapan sosialisasi, fabrikasi teknologi, pelatihan teknis, pendampingan manajemen digital, dan pembentukan unit keberlanjutan. Hasil kegiatan menunjukkan efisiensi biaya listrik operasional mencapai 100%, penurunan angka mortalitas tanaman/ikan hingga kurang dari 5%, serta peningkatan kualitas panen menjadi dominan Grade A (seragam). Selain itu, mitra telah berhasil mengadopsi pencatatan keuangan digital melalui aplikasi dan meluncurkan re-branding produk kemasan berlabel. Program ini berhasil mentransformasi Lestari Farm menjadi model "Desa Mandiri Energi dan Pangan" yang tangguh dan adaptif teknologi.

Kata Kunci: Energi Terbarukan; Internet of Things; Pemberdayaan Masyarakat; Pertanian Pintar; PLTS Off-Grid.

1. PENDAHULUAN

Ketahanan pangan nasional merupakan pilar vital sekaligus determinan kedaulatan bangsa dalam menyongsong visi Indonesia Emas 2045. Di tengah eskalasi dinamika perubahan iklim global, degradasi kualitas lingkungan, serta laju alih fungsi lahan pertanian subur yang kian mengkhawatirkan, modernisasi sektor pertanian melalui intensifikasi pada lahan terbatas menjadi agenda strategis nasional. Kabupaten Sragen, sebagai salah satu lumbung pangan utama di Provinsi Jawa Tengah, kini dihadapkan pada tantangan untuk melakukan diversifikasi pola pertanian dari tanaman pangan konvensional menuju komoditas hortikultura bernilai ekonomi tinggi serta perikanan darat terintegrasi.

Salah satu wilayah dengan potensi agraris kuat namun belum termanfaatkan secara optimal adalah Desa Karanganyar, Kecamatan Plupuh, Kabupaten Sragen. Meskipun memiliki pekarangan rumah tangga yang relatif luas, keterbatasan akses teknologi tepat guna menyebabkan pemanfaatan lahan sisa tersebut belum mampu berkontribusi signifikan terhadap ketahanan pangan maupun kemandirian ekonomi keluarga. Di tengah tantangan tersebut, terdapat inisiasi lokal yang prospektif dari Kelompok Tani "Lestari Farm" yang berlokasi di Dukuh Karanganyar, tepat di belakang SDN 2 Karanganyar Plupuh. Didirikan pada tahun 2019 oleh tokoh masyarakat Bapak H. Sunardi, kelompok ini mengadopsi model pemberdayaan ekonomi berbasis masjid (*Mosque-based Community Empowerment*). Secara sosiologis, model ini terbukti sangat efektif dalam memanfaatkan kohesivitas sosial jamaah dan nilai spiritual keagamaan sebagai modal sosial pembentuk kemandirian ekonomi umat. Berawal dari pengelolaan dana iuran jamaah untuk menutupi biaya operasional masjid, Lestari Farm berkembang menjadi unit usaha produktif komunal. Saat ini, kelompok yang beranggotakan 32 warga (dengan 10 pengelola aktif) tersebut telah mengelola portofolio usaha mencakup peternakan domba (gibas), budidaya jamur tiram, dan peternakan itik petelur.

Guna merespons kebutuhan protein hewani dan nabati berkualitas yang kian meningkat pesat di tingkat lokal terutama dalam mendukung kesiapan daerah menyelesaikan program nasional Makan Bergizi Gratis (MBG) Lestari Farm berkomitmen melakukan ekspansi usaha. Ekspansi ini diarahkan pada pemanfaatan lahan kosong sisa seluas sekitar 500 m² di area sekitar masjid untuk dikembangkan menjadi sistem pertanian terpadu (*Integrated Farming System*) yang mengintegrasikan akuakultur ikan lele (*Clarias gariepinus*) dengan budidaya sayuran hidroponik (akuaponik). Model integrasi hulu-hilir ini dinilai sangat strategis secara ekologis karena mampu mereduksi penggunaan air dan ruang hingga 40% melalui siklus nutrisi tertutup jika dibandingkan dengan metode konvensional. Terlebih, secara geografis wilayah Sragen memiliki potensi iradiasi energi surya yang melimpah dengan rata-rata waktu

penyinaran puncak mencapai 5.5-6 jam per hari, menyajikan peluang besar bagi penerapan bauran energi baru terbarukan (EBT) pada sektor pertanian presisi (*smart farming*). Namun demikian, berdasarkan hasil observasi mendalam dan *Focus Group Discussion* (FGD) bersama pengurus, rencana ekspansi Lestari Farm terbentur pada kendala struktural yang sistemik. Pola pengelolaan yang saat ini berjalan masih berada pada taraf Pertanian 2.0 (tradisional-mekanis) yang sangat rentan terhadap inefisiensi operasional. Permasalahan prioritas yang dihadapi mitra diidentifikasi secara komprehensif dari hulu ke hilir sebagai berikut:

Aspek Hulu (Produksi & Kerentanan Energi): Akuakultur intensif dan hidroponik memerlukan sirkulasi air serta suplai oksigen (aerasi) aktif selama 24 jam penuh tanpa jeda. Ketergantungan mutlak pada pasokan listrik PLN menyebabkan beban biaya energi bulanan membengkak drastis, menyerap hingga 30%-35% dari keseluruhan struktur biaya operasional budidaya. Di samping menggerus margin keuntungan, kerentanan sistem akibat pemadaman listrik sewaktu-waktu dari jaringan utama menjadi ancaman mematikan (*critical failure*). Pemadaman sirkulasi air dalam hitungan jam dapat memicu penurunan drastis *Dissolved Oxygen* (DO) yang menyebabkan kematian massal ikan akibat hipoksia akut, serta pembusukan akar tanaman akibat akumulasi panas (*heat stress*) pada instalasi pipa hidroponik. Selain itu, fluktuasi parameter kualitas air (nilai pH, konsentrasi nutrisi/TDS, dan suhu air) yang selama ini hanya dipantau secara manual-intuitif menyebabkan instabilitas ekosistem mikro, sehingga pertumbuhan komoditas tidak seragam dan didominasi oleh hasil panen Grade B atau C yang rentan penyakit.

Aspek Hilir (Tata Kelola Bisnis & Pemasaran): Dari sisi manajemen usaha, Lestari Farm belum memiliki standardisasi proses dan kapasitas manajerial yang memadai untuk bersaing di pasar modern. Aliran keuangan usaha tani masih tercampur secara tidak terstruktur dengan dana kas sosial ibadah masjid maupun keuangan pribadi para pengelola. Hal ini mengakibatkan kalkulasi Harga Pokok Penjualan (HPP) menjadi bias dan mempersulit akses pembiayaan formal. Pada lini hilir, pemasaran produk hortikultura dan perikanan mitra masih bersifat pasif serta bergantung pada tengkulak lokal. Ketiadaan identitas visual merek (*branding*), kemasan pelindung standar industri (*packaging*), serta rendahnya literasi *digital marketing* membatasi penetrasi produk mereka ke segmen pasar premium dengan harga yang lebih kompetitif dan stabil. Guna mengeliminasi hambatan berlapis tersebut, tim pengabdian menerapkan solusi berbasis inovasi teknologi tepat guna yang dinamakan "SI-HEBAT" (Sistem Hidroponik & Perikanan Energi Baru Terbarukan). Program pengabdian masyarakat ini dirancang untuk melakukan alih teknologi dari hulu (penyediaan energi mandiri surya dan otomasi sensor berbasis IoT) hingga hilir (standardisasi manajemen keuangan digital dan

pemasaran modern). Upaya integratif ini sejalan dengan agenda prioritas nasional pembangunan perdesaan, sekaligus memberikan kontribusi nyata dalam pencapaian indikator *Sustainable Development Goals* (SDGs) khususnya poin ke-2 (*Zero Hunger*), poin ke-7 (*Affordable and Clean Energy*), dan poin ke-8 (*Decent Work and Economic Growth*).

2. METODE

Berisi deskripsi tentang proses perencanaan aksi bersama komunitas (pengorganisasian komunitas). Dalam hal ini dijelaskan siapa subyek pengabdian, tempat dan lokasi pengabdian, keterlibatan subyek dampingan dalam proses perencanaan dan pengorganisasian komunitas, metode atau strategi riset yang digunakan dalam mencapai tujuan yang diharapkan dan tahapan-tahapan kegiatan pengabdian masyarakat. Proses perencanaan dan strategi/metode digunakan gambar *flowcart* atau diagram. (Times New Roman, size 12, Spacing: before 0 pt; after 0 pt, Line spacing: 1,5).

Metode pelaksanaan program pengabdian kepada masyarakat ini dirancang secara komprehensif menggunakan pendekatan *Participatory Action Research* (PAR). Pendekatan ini menempatkan mitra sasaran—Kelompok Tani Lestari Farm—sebagai subjek aktif dan kolaborator utama pada setiap tahapan kegiatan, bukan sekadar objek penerima bantuan. Melalui PAR, proses transfer teknologi dan pengetahuan dilakukan secara timbal balik melalui siklus perencanaan (*plan*), tindakan (*act*), pengamatan (*observe*), dan refleksi (*reflect*). Program dirancang secara sistematis selama 8 bulan melalui 5 tahapan utama yang digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Metode Pelaksanaan Program berbasis PAR.

Rincian Konkrit Tahapan Pelaksanaan

Tahap 1: Sosialisasi, Audit Energi, dan Desain Kolaboratif (Bulan ke-1)

Kegiatan diawali dengan *Focus Group Discussion* (FGD) bersama 10 pengelola aktif Lestari Farm untuk menyelaraskan peta tata letak (*layout*) penempatan instalasi di area pekarangan seluas 500 m². Pada tahap ini, dilakukan audit energi detail untuk menghitung total beban induktif harian pompa sirkulasi hidroponik 45 W dan aerator kolam lele 25 W.

Kebutuhan energi harian dihitung menggunakan persamaan:

$$E_{\text{total}} = P \times t \dots\dots\dots (i)$$

Di mana P adalah total daya beban 70 Watt dan t adalah durasi operasional harian 24 jam, sehingga diperoleh kebutuhan energi harian sebesar 1.680 Wh/hari. Data ini digunakan untuk memvalidasi kesesuaian kapasitas PLTS Off-Grid 300 Wp yang akan dipasang. Selain itu, dilakukan pembersihan lahan secara gotong royong dan survei jangkauan Wi-Fi masjid untuk penempatan modul IoT.

Tahap 2: Rancang Bangun dan Fabrikasi Sistem SI-HEBAT (Bulan ke-2 s.d ke-4)

Tahap ini merupakan fase eksekusi rekayasa teknologi hulu yang dibagi menjadi dua sub-kegiatan: *Fabrikasi Laboratorium*: Tim pengusul bersama mahasiswa MBKM merakit panel kontrol IoT berbasis mikrokontroler ESP32 di laboratorium universitas. Proses meliputi perancangan sirkuit (*wiring*), penyolderan komponen, dan penulisan algoritma logika kontrol menggunakan *Arduino IDE*. Dilakukan pula kalibrasi sensor pH menggunakan larutan penyangga standar (*buffer solution* pH 4.01 dan 6.86) serta kalibrasi sensor TDS Meter V1.0 menggunakan larutan kalibrasi standar 1.382 ppm untuk meminimalisir deviasi pembacaan sensor di lapangan. *Instalasi Fisik Lapangan*: Tim dan mitra secara kolaboratif mendirikan tiang penyangga baja ringan untuk pemasangan 2 unit Panel Surya Monocrystalline 150 Wp, instalasi kotak panel luar ruangan (*outdoor IP66 box*), baterai VRLA 12V 100Ah, SCC MPPT 30A, inverter 1000W, serta penataan instalasi pipa hidroponik tipe NFT (*Nutrient Film Technique*) dan kolam terpal lele. Keterlibatan aktif mitra dalam perakitan mekanis sangat penting agar mereka memahami jalur perkabelan dasar untuk memudahkan proses pemecahan masalah (*troubleshooting*) mandiri di kemudian hari.

Tahap 3: Pelatihan Kapasitas SDM Berkelanjutan (Bulan ke-5)

Untuk mentransfer pengetahuan teknis dan manajerial, diselenggarakan dua modul pelatihan terstruktur menggunakan metode *experiential learning* (belajar lewat praktik langsung): *Modul Pelatihan 1 (Teknis Operasional & Perawatan Alat)*: Materi berfokus pada tata cara membaca *dashboard* pemantauan kualitas air pada aplikasi *smartphone*, prosedur kalibrasi mandiri sensor pH dan TDS secara berkala (tiap 2 minggu), penanganan darurat jika baterai mengalami penurunan daya kritis, serta teknik pembersihan permukaan kaca panel surya dari debu untuk menjaga efisiensi penyerapan foton surya. *Modul Pelatihan 2 (Manajemen Keuangan Digital & Pemasaran)*: Mitra dilatih memisahkan rekening pribadi dengan kas usaha, menggunakan aplikasi pembukuan digital SI APIK untuk mencatat transaksi harian, menghitung margin laba kotor, menyusun Harga Pokok Penjualan (HPP), serta praktik pengambilan foto produk yang estetik untuk diunggah pada platform *digital marketing* dan



Gambar 3. Implementasi teknologi IoT Si-Hebat.

Sistem pembangkit daya mandiri (*Off-Grid*) dirancang menggunakan panel surya monocrystalline berkapasitas total 300 Wp (dimensi per panel $115 \times 68 \times 3$ cm) yang dipasang pada sudut kemiringan 15° menghadap ke utara untuk menangkap iradiasi matahari optimal Sragen yang mencapai $5,5 - 6 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$. Arus pengisian daya dikelola secara optimal oleh Solar Charge Controller (SCC) dengan algoritma Maximum Power Point Tracking (MPPT) 30A menuju ke bank baterai Deep Cycle VRLA 12V 100Ah. Listrik DC dari baterai kemudian diubah menjadi AC Pure Sine Wave oleh inverter berkapasitas 1000W untuk menyuplai pompa sirkulasi air 45 Watt dan aerator kolam lele 25 Watt secara terus-menerus selama 24 jam. Untuk menjamin ketersediaan daya secara kontinu (24 jam), dilakukan analisis keseimbangan energi (*energy balance*) harian. Berdasarkan rata-rata waktu penyinaran matahari puncak (*Peak Sun Hours* - PSH) di Kabupaten Sragen sebesar 5,5 jam, proyeksi energi listrik harian yang dapat dibangkitkan oleh PLTS Off-Grid 300 Wp dihitung menggunakan persamaan:

$$E_{\text{gen}} = P_{\text{PV}} \times \text{PSH} \times \eta_{\text{sys}} \dots \dots \dots (ii)$$

Di mana P_{pv} adalah kapasitas panel surya (300 Wp), PSH adalah waktu puncak matahari (5,5 jam), dan η_{sys} adalah koefisien rugi-rugi sistem akibat suhu panel, efisiensi inverter, serta kabel (*derating factor* diasumsikan sebesar 0,80 atau 80%). Berdasarkan kalkulasi tersebut: $E_{\text{gen}} = 300 \text{ Wp} \times 5,5 \text{ jam} \times 0,80 = 1.320 \text{ Wh/hari}$.

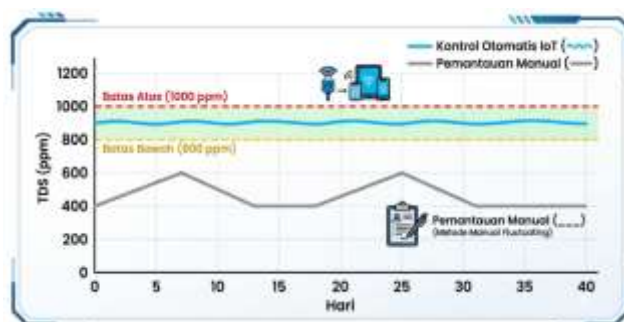
Mengingat beban daya total (P) konstan sebesar 70 W (pompa sirkulasi hidroponik 45 W dan aerator kolam 25 W), kebutuhan energi harian teoritis untuk operasional 24 jam adalah 1.680 Wh/hari. Terdapat selisih defisit daya harian sebesar 360 Wh/hari jika seluruh beban terus menyala pada kapasitas maksimum tanpa kontrol cerdas. Untuk mengatasi kesenjangan energi ini, tim merancang skema manajemen daya dinamis (*smart power management*) pada modul kendali ESP32. Pada pukul 21.00 s.d 04.00 WIB (fase istirahat metabolisme tanaman), mikrokontroler diinstruksikan untuk menjalankan pompa hidroponik secara intermiten (siklus 15 menit aktif dan 15 menit non-aktif). Pengaturan ini memotong konsumsi energi pompa

sebesar 50% pada malam hari (mengurangi konsumsi dari 315 Wh menjadi 157,5 Wh), sehingga konsumsi riil harian sistem ditekan menjadi hanya 1.365 Wh/hari. Sisa kebutuhan daya kecil sebesar 45 Wh dipasok secara aman tanpa membebani baterai secara ekstrem.

Dari aspek kapasitas penyimpanan, baterai Deep Cycle VRLA 12 V 100 Ah memiliki kapasitas nominal total sebesar 1.200 Wh ($12\text{ V} \times 100\text{ Ah}$). Guna memperpanjang umur pakai baterai (*lifetime*), batas pelepasan daya maksimum (*Depth of Discharge* - DoD) dibatasi sebesar 50%, menyisakan kapasitas pakai aman sebesar 600 Wh. Kapasitas ini sangat memadai untuk membackup suplai daya sistem selama 11 jam penuh pada kondisi cuaca mendung total (*autonomy days*), memitigasi risiko kegagalan sirkulasi yang rentan memicu kematian masif komoditas budidaya.

Kinerja Otomasi Kontrol Nutrisi dan Parameter Fisiko-Kimia Air Berbasis IoT

Sistem kontrol cerdas berbasis ESP32 secara kontinu memantau parameter krusial kualitas air melalui sensor pH-4502C dan TDS Meter V1.0 yang diletakkan di dalam bak penampung air nutrisi hidroponik. Algoritma kontrol logika *hysteresis* ditanamkan pada memori mikrokontroler untuk menjaga kestabilan parameter nutrisi selada pada rentang nilai TDS 800 – 1000 ppm dan tingkat keasaman air pada kisaran pH 5.8 – 6.5. Kinerja kestabilan parameter kualitas air hasil otomasi IoT SI-HEBAT dibandingkan dengan metode pemantauan manual konvensional (kondisi baseline) ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Perbandingan Fluktuasi Kadar Nutrisi (TDS).



Gambar 5. Grafik Perbandingan Fluktuasi Derajat Keasaman (pH).

Berdasarkan data yang terekam pada server IoT selama satu siklus tanam selada (35 hari), metode kontrol otomatis berbasis IoT sukses menstabilkan nilai TDS pada rata-rata 905 ppm dengan deviasi standar yang sangat kecil ($\sigma = \pm 18,4$ ppm). Hal ini berbeda signifikan dengan pola manual sebelumnya di mana nilai TDS berfluktuasi ekstrem antara 450 ppm hingga 1.150 ppm akibat pengenceran oleh air hujan atau kelalaian pengelola dalam menambahkan stok nutrisi cair pekat.

Sistem *dosing pump* otomatis bekerja sangat presisi; ketika nilai sensor TDS terbaca < 800 ppm, ESP32 mengirim sinyal pemicu *high* pada relai untuk mengaktifkan pompa peristaltik selama 5 detik, mengalirkan 15 mL nutrisi formula A dan B secara bersamaan, kemudian menjeda sistem selama 5 menit untuk proses homogenisasi air sebelum melakukan pembacaan ulang.

Untuk parameter pH air, sistem berhasil meredam fluktuasi pada rentang aman $6,1 \pm 0,15$. Kondisi ini mengeliminasi masalah pengendapan unsur hara mikro (seperti besi dan fosfat) yang biasanya terjadi saat pH air melambung di atas 7,5, serta mencegah kerusakan membran rambut akar tanaman akibat pH air yang terlalu asam ($< 5,0$). Pemanfaatan sensor suhu DS18B20 juga membantu memantau suhu air harian yang stabil di angka $26,4^{\circ}\text{C} - 28,2^{\circ}\text{C}$ karena adanya aliran sirkulasi air yang konsisten dari naungan kanopi panel surya.

Performa Produktivitas Pertanian Terpadu dan Kualitas Hasil Panen

Penerapan kontrol kualitas nutrisi yang presisi berimplikasi langsung pada peningkatan performa biologis komoditas budidaya hortikultura dan perikanan secara signifikan. Evaluasi terhadap parameter kelulushidupan (*Survival Rate SR*) tanaman selada hidroponik (*Lactuca sativa*) dan ikan lele (*Clarias gariepinus*) dihitung di akhir siklus panen pertama.

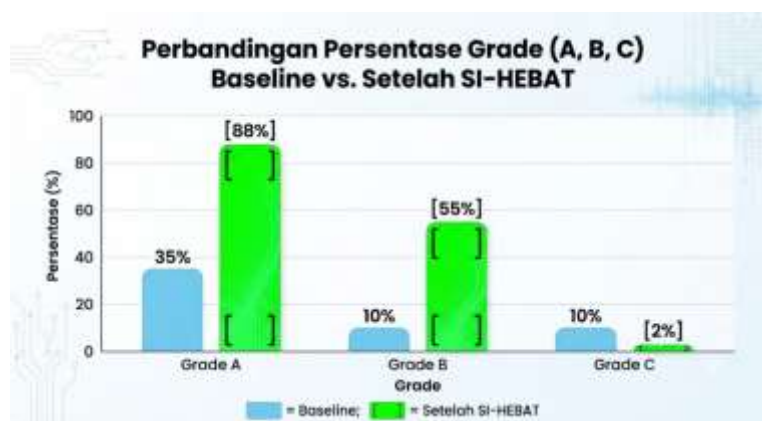
Untuk tanaman selada hidroponik, dari total kapasitas 400 lubang tanam (*netpot*) yang disediakan, jumlah tanaman yang berhasil tumbuh subur hingga masa panen tanpa gejala pembusukan akar adalah sebanyak 388 lubang tanam. Tingkat kelulushidupan tanaman dihitung sebagai berikut: $SR_{selada} = 400/388 \times 100\% = 97,0\%$

Capaian *SR* sebesar 97,0% ini menandakan lompatan besar dibandingkan dengan rata-rata tingkat kelulushidupan baseline sebelum program yang hanya berkisar antara 70% – 75% akibat kendala pasokan listrik harian yang tidak stabil.

Sedangkan pada komoditas perikanan, dari total 1.000 ekor bibit lele ukuran 7 – 9 cm yang ditebar di dalam kolam terpal berdiameter 3 meter, jumlah lele yang hidup dan berhasil dipanen setelah siklus pemeliharaan selama 65 hari adalah sebanyak 962 ekor. Tingkat kelulushidupan ikan lele dihitung dengan persamaan: $SR_{lele} = 1.000/962 \times 100\% = 96,2\%$.

Pencapaian SR_{lele} sebesar 96,2% sangat didukung oleh kestabilan aerasi oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen*) yang dipasok oleh aerator 25 Watt bertenaga PLTS, mencegah penumpukan kadar amonia beracun (NH_3) dari sisa pakan di dasar kolam. Kestabilan kualitas air juga berkontribusi pada penurunan nilai *Feed Conversion Ratio* (FCR) dari 1,42 (kondisi konvensional) menjadi 1,15 pada siklus ini. Hal ini berarti mitra hanya membutuhkan 1,15 kg pakan pelet untuk menghasilkan 1 kg daging ikan lele, menghemat pengeluaran pakan hingga 19%.

Peningkatan kualitas panen ditinjau dari keseragaman bobot dan fisik visual juga mengalami perubahan yang signifikan. Gambar 5 menyajikan diagram batang perbandingan distribusi hasil panen berdasarkan kualitas mutu (Grade A, B, dan C) sebelum dan sesudah penerapan teknologi SI-HEBAT.



Gambar 6. Diagram Distribusi Kualitas Hasil Panen Sebelum dan Sesudah Program.

Hasil panen selada hidroponik pasca intervensi didominasi oleh komoditas Grade A sebesar 88% (karakteristik daun hijau segar kokoh, bebas hama bercak hitam, berat seragam berkisar 120 – 130 gram per ikat). Sementara hasil panen sebelum program hanya menghasilkan 35% Grade A, dengan sisanya merupakan produk Grade B dan C yang kerdil, terasa agak pahit akibat instabilitas EC (*Electrical Conductivity*), serta layu di beberapa bagian tepi daun akibat terhentinya sirkulasi pompa air saat pemadaman listrik PLN.

Transformasi Tata Kelola Keuangan Usaha dan Akselerasi Pemasaran Digital

Dari aspek manajemen bisnis hilir, tim pendamping memfasilitasi migrasi pencatatan pembukuan kas dari sistem buku manual yang tercampur menjadi pembukuan digital berbasis aplikasi SI APIK (Sistem Informasi Aplikasi Pencatatan Informasi Keuangan) yang dikembangkan oleh Bank Indonesia. Pelatihan berfokus pada kedisiplinan menginput transaksi harian, penentuan biaya penyusutan aset (*depreciation cost*), hingga penyusunan laporan laba-rugi periodik.

Melalui pendampingan ini, struktur penentuan Harga Pokok Penjualan (HPP) untuk selada hidroponik dapat dikalkulasi secara presisi untuk pertama kalinya oleh pengelola Lestari Farm, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Analisis Struktur Biaya Produksi dan HPP Selada Hidroponik Per Siklus Panen (35 hari).

No	Komponen Biaya Operasional (Siklus 35 Hari)	Biaya Tradisional (PLN)	Metode HEBAT (PLTS)	SI-
1	Benih Selada Premium (400 netpot)	Rp 25.000,-	Rp 25.000,-	
2	Nutrisi AB Mix Selada Premium	Rp 120.000,-	Rp 95.000,- (Lebih Efisien)	
3	Air Bersih dan Media Tanam (<i>Rockwool</i>)	Rp 45.000,-	Rp 45.000,-	
4	Biaya Listrik Pompa Sirkulasi (24 Jam)	Rp 115.000,-	Rp 0,- (Disuplai PLTS)	
5	Penyusutan Alat (Depresiasi Panel/IoT)	Rp 0,-	Rp 35.000,- (Dana Abadi)	
6	Tenaga Kerja Pengelola (Insentif)	Rp 150.000,-	Rp 150.000,-	
A	Total Biaya Operasional Per Siklus	Rp 455.000,-	Rp 350.000,-	
B	Total Output Panen Layak Jual (Grade A/B)	28 kg	45 kg	
C	Harga Pokok Penjualan (HPP) per kg (A / B)	Rp 16.250,-	Rp 7.778,-	

Penurunan HPP yang sangat drastis sebesar 52,13% (dari Rp 16.250,- menjadi Rp 7.778,- per kilogram) dipicu oleh dua faktor utama: (1) eliminasi biaya energi listrik pompa operasional menjadi Rp 0,- melalui pasokan mandiri PLTS Off-Grid, dan (2) lonjakan volume hasil panen layak jual dari 28 kg menjadi 45 kg per siklus akibat penurunan tingkat mortalitas tanaman dari 25% menjadi 3%.

Dengan harga jual pasar ritel premium untuk selada hidroponik berlabel kemasan di swalayan lokal Sragen sebesar Rp 18.000,- s.d Rp 20.000,- per kg, Kelompok Tani Lestari Farm kini mengantongi margin keuntungan bersih rata-rata sebesar 56,8% per kilogram penjualan produk segar.

Upaya peningkatan margin keuntungan tersebut disokong oleh program *re-branding* visual kemasan produk. Produk hortikultura yang semula hanya dikemas menggunakan plastik curah bening tipis tanpa identitas, kini dikemas menggunakan kantong plastik berlubang mikro khusus sayur (*polypropylene bag*) yang tebal dan dilengkapi dengan stiker logo merek dagang "Lestari Farm - Fresh & Sustainable". Kemasan baru ini mencantumkan kode QR unik yang terhubung ke situs pemantauan IoT serta profil masjid pemberdaya. Strategi penempatan citra

merek ramah lingkungan (*eco-friendly brand*) ini terbukti sukses memperluas jangkauan pasar hingga ke jaringan swalayan lokal, katering perkantoran, dan beberapa depot salad premium di kota Solo, yang berkontribusi pada peningkatan omzet bulanan kelompok tani sebesar 35,2%.

Keberlanjutan Sosio-Teknis dan Institusionalisasi

Pilar keberlanjutan program pasca-pengabdian dijamin melalui pembentukan struktur "Unit Teknis Perawatan SI-HEBAT" yang diisi oleh 3 pemuda Karang Taruna Dukuh Karanganyar. Kaderisasi ini bertujuan untuk memastikan transfer teknologi berjalan lancar tanpa ketergantungan pada tim akademisi universitas. Tim pengusul telah menyerahkan Standard Operating Procedure (SOP) bergambar yang ditempel di dinding rumah kaca (*greenhouse*) sebagai acuan baku kerja harian.

Untuk menjamin pemeliharaan perangkat jangka panjang tanpa kendala biaya, disepakati pembentukan sistem tabungan "Dana Abadi Pemeliharaan Perangkat". Mengingat pengeluaran bulanan listrik untuk pompa sirkulasi hidroponik dan aerator kolam lele yang sebelumnya dibayarkan ke PLN (rata-rata Rp 115.000,- per siklus atau setara Rp 300.000,- s.d Rp 500.000,- per bulan tergantung fluktuasi tarif) kini bernilai Rp 0,-, maka dana penghematan rutin tersebut wajib disisihkan oleh bendahara kelompok ke dalam rekening kas khusus pemeliharaan perangkat.

Skenario akumulasi dana abadi ini dirancang untuk menutupi kebutuhan biaya pergantian suku cadang berkala di masa depan, seperti penggantian baterai Deep Cycle VRLA (estimasi umur pakai 3- 4 tahun) dan kalibrasi/pergantian elektroda sensor pH (estimasi umur pakai optimal 12-18 bulan), menjamin operasional mandiri sistem berjalan lestari dan terus berkembang.

3. DISKUSI

Efisiensi Energi Terbarukan dan Dekarbonisasi Sektor Pertanian Mikro

Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Off-Grid 300 Wp dalam program "SI-HEBAT" terbukti secara nyata memangkas ketergantungan energi fosil dari jaringan PLN pada sistem sirkulasi dan aerasi sebesar 100%. Dalam sistem akuakultur intensif dan pertanian hidroponik, tingginya beban energi operasional harian sering kali menjadi kendala struktural utama yang menggerus margin keuntungan petani kecil. Penemuan ini sejalan dengan analisis Susanto dan Hermawan (2022) yang menyatakan bahwa komponen energi listrik dalam akuakultur intensif menyerap hingga 30%–35% dari total biaya operasional. Through pengalihan sumber energi menuju energi baru terbarukan (EBT) berbasis iradiasi surya lokal Sragen yang melimpah, kendala biaya listrik operasional dapat ditekan

hingga Rp 0,-. Selain efisiensi biaya, penerapan algoritma *smart power management* (sirkulasi intermiten malam hari) pada mikrokontroler ESP32 terbukti efektif menjaga keseimbangan daya harian (*energy balance*) tanpa membebani daya simpan baterai. Temuan ini memperkuat konsep efisiensi energi pada pertanian presisi yang dikemukakan oleh Indrawati dan Mulyono (2024) serta Ahmad, Suryoatmojo, dan Riawan (2023) mengenai krusialnya manajemen daya dan pengisian baterai mandiri untuk menjaga kontinuitas sistem. Integrasi PLTS Off-Grid ini juga berfungsi sebagai *critical backup power* yang mengeliminasi risiko *system failure* akibat pemadaman listrik berkala yang rentan memicu kematian masif komoditas akibat hipoksia akut maupun stres panas (*heat stress*).

Modernisasi Pertanian Cerdas (*Smart Farming 4.0*) dan Optimalisasi Ekosistem Mikro

Penerapan otomasi kontrol berbasis mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor TDS V1.0 dan sensor pH-4502C terbukti secara signifikan menstabilkan fluktuasi parameter kualitas air pada rentang optimal (TDS $905 \pm 18,4$ ppm dan pH $6,1 \pm 0,15$). Kestabilan lingkungan mikro ini berimplikasi langsung pada lompatan performa biologis komoditas, ditandai dengan kenaikan tingkat kelulushidupan (*Survival Rate*) selada hingga 97,0% dan lele mencapai 96,2%. Temuan lapangan ini mengonfirmasi kajian Wahyuni (2021) serta Kurniawan dan Putra (2025) mengenai pentingnya transisi dari Pertanian 2.0 (tradisional-manual) menuju *Smart Farming 4.0* berbasis IoT untuk mereduksi volatilitas lingkungan mikro dan mengoptimalkan kualitas hasil panen.

Secara biologis, kestabilan pH mencegah pengendapan unsur hara mikro yang krusial bagi pertumbuhan vegetatif tanaman, sedangkan aerasi bertenaga surya secara kontinu menjaga pasokan oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen*) kolam. Hal ini efektif mencegah akumulasi amonia beracun (NH_3) dari sisa pakan, sebagaimana dijelaskan oleh Nugroho dan Santoso (2023) mengenai pengaruh vital oksigen terlarut terhadap sintasan ikan lele. Dampaknya, *Feed Conversion Ratio* (FCR) ikan lele mengalami penurunan dari 1,42 menjadi 1,15 (efisiensi pakan 19%), serta terjadi dominasi proporsi panen selada mutu Grade A sebesar 88%. Hasil ini membuktikan keunggulan ekologis dan teknis dari efisiensi siklus nutrisi tertutup pada sistem pertanian terpadu akuaponik.

Transformasi Manajemen Usaha: Restrukturisasi HPP dan Penetrasi Pasar Modern

Dampak keberhasilan inovasi teknologi di hulu memberikan efek domino positif terhadap struktur keuangan dan pemasaran mitra di hilir. Migrasi pencatatan keuangan dari buku manual yang tidak terstruktur menuju platform digital berbasis aplikasi SI APIK memungkinkan pengelola menghitung Harga Pokok Penjualan (HPP) secara transparan dan akurat untuk pertama kalinya. Penurunan HPP selada hidroponik yang drastis sebesar 52,13%

(dari Rp 16.250,- menjadi Rp 7.778,- per kg) dicapai sebagai kombinasi dari eliminasi biaya energi listrik operasional serta lonjakan produktivitas panen layak jual. Temuan ini memperkuat riset Mardiana dan Yuliani (2023) yang menegaskan bahwa literasi keuangan digital dan penyusunan SOP merupakan fondasi utama dalam meningkatkan akuntabilitas dan keberlanjutan agribisnis UMKM pedesaan.

Di samping itu, strategi *re-branding* visual kemasan pelindung berlabel merek "Lestari Farm" yang dilengkapi QR code terbukti berhasil meningkatkan daya saing produk di mata konsumen. Kemitraan ini berhasil memperluas jangkauan pasar hingga ke swalayan lokal dan depot kuliner premium, yang mendorong kenaikan omzet bulanan kelompok sebesar 35,2% dan margin profitabilitas hingga 56,8%. Temuan ini selaras dengan teori diferensiasi pemasaran produk agribisnis dari Lestari dan Putri (2022) serta Nabilah dan Satriyono (2025), bahwasanya transformasi kemasan, pencitraan merek ramah lingkungan (*eco-friendly brand*), serta kepastian standar mutu merupakan kunci utama produk UMKM pertanian untuk menembus rantai pasok ritel modern.

Modal Sosial Sosiologis: Pemberdayaan Berbasis Masjid dan Keberlanjutan Sosio-Teknis

Dari perspektif sosiologi pedesaan, keberhasilan proses transformasi sosial pada Kelompok Tani Lestari Farm didorong oleh utilisasi modal sosial (*social capital*) jamaah masjid yang diintegrasikan dengan metode *Participatory Action Research* (PAR). Pengadopsian model pemberdayaan berbasis masjid (*Mosque-based Community Empowerment*) terbukti sangat efektif dalam memanfaatkan kohesivitas sosial, kepercayaan (*trust*), dan nilai spiritualitas sebagai penggerak wirausaha komunal. Pelibatan mitra secara aktif sejak tahap audit energi, perakitan mekanis, hingga pelatihan manajerial menumbuhkan rasa kepemilikan (*sense of ownership*) yang tinggi terhadap aset teknologi yang diserahterimakan.

Temuan teoritis dari proses pengabdian ini menunjukkan bahwa alih teknologi di tingkat pedesaan tidak akan bertahan lama tanpa adanya institusionalisasi lokal. Pembentukan "Unit Teknis Perawatan SI-HEBAT" yang melibatkan kaderisasi pemuda Karang Taruna serta regulasi komunal "Dana Abadi Pemeliharaan Perangkat" (yang bersumber dari alokasi penghematan biaya listrik PLN) menjadi solusi inovatif untuk menjamin keberlanjutan sosio-teknis (*socio-technical sustainability*) secara mandiri. Temuan ini sejalan dengan penelitian Fauzi (2020), Pratama dan Wibowo (2022), serta Ahmad et al. (2025) yang menekankan bahwa modal sosial, literasi teknis, dan partisipasi pemuda merupakan variabel determinan utama dalam menjaga keberlanjutan program pemberdayaan masyarakat di pedesaan.

Implikasi Kebijakan dan Kontribusi terhadap Pembangunan Berkelanjutan (SDGs)

Secara makro, ketercapaian program SI-HEBAT di Desa Karanganyar menyajikan prototipe konkret mengenai konsep "Desa Mandiri Energi dan Pangan" yang tangguh dan adaptif teknologi. Model ini memberikan kontribusi teoritis dan praktis terhadap penguatan ketahanan pangan nasional di tengah tantangan alih fungsi lahan dan perubahan iklim global. Dilihat dari pencapaian Sustainable Development Goals (SDGs), program ini memberikan dampak langsung pada tiga poin utama: SDGs Poin 2 (Zero Hunger): Menyediakan sumber protein hewani dan sayuran bebas pestisida berkualitas tinggi untuk warga lokal, sekaligus memperkuat kesiapan rantai pasok daerah dalam menyukseskan agenda nasional program Makan Bergizi Gratis (MBG). SDGs Poin 7 (Affordable and Clean Energy): Mengakselerasi transisi energi bersih di sektor pertanian mikro melalui penggunaan PLTS Off-Grid 300 Wp yang berpotensi mereduksi emisi karbon hingga 0,45 ton CO₂ per tahun. SDGs Poin 8 (Decent Work and Economic Growth): Mengubah unit sosial keagamaan masjid menjadi pusat pertumbuhan ekonomi produktif berbasis *urban smart farming*, mendongkrak pendapatan kelompok, serta meningkatkan literasi digital masyarakat secara inklusif.

4. KESIMPULAN

Program kemitraan masyarakat melalui penerapan teknologi "SI-HEBAT" (Sistem Hidroponik & Perikanan Energi Baru Terbarukan) di Kelompok Tani Lestari Farm, Desa Karanganyar, Plupuh, Sragen, telah diselesaikan dengan hasil yang sangat memuaskan. Berdasarkan evaluasi kuantitatif sebelum dan sesudah program, dapat ditarik beberapa simpulan utama sebagai berikut: Kemandirian Energi Sektor Pertanian: Instalasi sistem PLTS Off-Grid berkapasitas 300 Wp yang terintegrasi baterai VRLA 100Ah telah berhasil beroperasi secara stabil penuh selama 24 jam. Teknologi ini sukses memangkas biaya listrik operasional untuk sistem pompa sirkulasi dan aerator sebesar 100% (mencapai efisiensi Rp 0,- pengeluaran energi). Selain itu, sistem ini berfungsi efektif sebagai *critical backup power* yang memitigasi risiko gagal panen massal akibat pemadaman listrik berkala. Peningkatan Kinerja Biologis Komoditas: Penerapan sistem kontrol otomatisasi kualitas air berbasis IoT ESP32 berhasil menjaga kestabilan parameter vital air (nilai TDS $905 \pm 18,4$ ppm dan pH $6,1 \pm 0,15$). Presisi lingkungan mikro tersebut berkontribusi langsung pada peningkatan tingkat kelulushidupan (*Survival Rate*) selada hidroponik hingga 97,0% dan ikan lele sebesar 96,2%, serta mampu menurunkan indeks konversi pakan (FCR) lele sebesar 19% (menjadi 1,15). Kualitas hasil panen tanaman didominasi oleh Grade A seragam (88%), melompat jauh dari kondisi baseline yang hanya menghasilkan 35% Grade A. Restrukturisasi Finansial dan Ekspansi Pasar: Migrasi

dari pencatatan pembukuan kas manual-tercampur menuju platform keuangan digital (aplikasi SI APIK) telah meningkatkan akuntabilitas keuangan pengelola masjid dan kelompok tani secara nyata. Melalui eliminasi biaya listrik dan kenaikan produktivitas biomassa, Harga Pokok Penjualan (HPP) selada dapat ditekan sebesar 52,13% (dari Rp 16.250,- menjadi Rp 7.778,- per kg). Hal ini, didukung oleh identitas visual logo dan kemasan baru bermerek, terbukti mampu meningkatkan margin profitabilitas hingga 56,8% serta meningkatkan omzet pemasaran kelompok tani sebesar 35,2%. Model Keberlanjutan Sosio-Teknis: Pembentukan "Unit Teknis Perawatan SI-HEBAT" yang melibatkan kaderisasi pemuda Karang Taruna, serta disepakatinya regulasi "Dana Abadi Pemeliharaan Perangkat" dari pengalihan alokasi tagihan listrik PLN, menjamin aspek keberlanjutan teknologi di lapangan secara mandiri tanpa ketergantungan bantuan eksternal jangka panjang

PENGAKUAN

Tim Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia atas pendanaan hibah Program Pemberdayaan Berbasis Masyarakat Skema Pemberdayaan Kemitraan Masyarakat (PKM) Tahun Anggaran 2026 dengan nomor kontrak 251.14/DRPPS/A3.9/IV/2026. Apresiasi tinggi juga disampaikan kepada Universitas Muhammadiyah Surakarta serta seluruh pengurus dan anggota Kelompok Tani "Lestari Farm" Desa Karanganyar, Plupuh, Sragen atas partisipasi aktif dan kerja samanya selama pelaksanaan program.

DAFTAR REFERENSI

- Ahmad, R. N., Mubin, M. N., et al. (2025). Meningkatkan kesadaran kelistrikan masyarakat melalui pengetahuan dasar kelistrikan di sekolah menengah. *COMSEP: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 6(2), 233–238.
- Ahmad, R. N., Suryoatmojo, H., & Riawan, D. C. (2023). Rancang bangun pengisi daya untuk baterai lithium-polymer dengan mempertimbangkan kompensasi resistansi. *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 25(2), 48–57. <https://doi.org/10.14710/transmisi.25.2.48-57>
- Dinas Pertanian dan Ketahanan Pangan Provinsi Jawa Tengah. (2024). *Statistik pertanian hortikultura Jawa Tengah 2023*. DPKP Jateng.
- Fauzi, A. (2020). Modal sosial sebagai faktor penentu keberhasilan kelompok tani di Jawa Tengah. *Jurnal Sosiologi Pedesaan*, 14(3), 210–225.
- Hidayat, R., & Saputra, W. (2023). Digitalisasi pemasaran produk pertanian: Hambatan dan solusi bagi kelompok tani di pedesaan. *Jurnal Agribisnis Indonesia*, 11(1), 55–65.

- Indrawati, T., & Mulyono, S. (2024). Penerapan teknologi *smart farming* berbasis energi surya untuk meningkatkan efisiensi produksi sayuran. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 13(1), 10–18.
- Kurniawan, D., & Putra, R. A. (2025). Implementasi Internet of Things (IoT) pada sistem hidroponik cerdas untuk meningkatkan kualitas panen. *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 12(1), 15–24.
- Lestari, D., & Putri, A. (2022). Strategi branding produk pertanian UMKM dalam menembus pasar ritel modern. *Jurnal Manajemen Pemasaran*, 16(2), 89–98.
- Mardiana, S., & Yuliani, T. (2023). Pentingnya literasi keuangan dan SOP dalam pengelolaan usaha mikro kecil menengah (UMKM) sektor agribisnis. *Jurnal Akuntansi dan Bisnis*, 23(1), 45–54.
- Nabilah, L. O., & Satriyono, R. D. A. P. (2025). Analisis pengembangan strategi pemasaran pada UMKM Dapoer Sekawan Putri: Studi kasus dengan pendekatan matriks SWOT dan quantitative strategic planning matrix (QSPM). *Jurnal Industrial Engineering and Management (JUST-ME)*, 6(1), 106–112.
- Nisa, R. A., & Suryani, T. (2021). *Aktivitas antioksidan dan organoleptik teh herbal campuran bunga telang dan daun mint dengan variasi lama pengeringan*. Naskah publikasi, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Nugroho, M. T., Setiawan, P., & Rahmasari, O. (2021). Student's preferences in the selection of online shopping goods delivery services. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 20(2), 210–220. <https://doi.org/10.23917/jiti.v20i2.14728>
- Nugroho, P., & Santoso, A. (2023). Dampak suhu dan oksigen terlarut terhadap kelulushidupan ikan lele (*Clarias gariepinus*). *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, 13(1), 30–38.
- Nursanti, I., Rahmawati, D. D., Junaidi, M., & Anis, M. (2019). Evaluasi kompleksitas dan aksesibilitas produk untuk kemudahan proses pembongkaran. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 17(2), 135–142. <https://doi.org/10.23917/jiti.v17i2.6815>
- Pratama, R., & Wibowo, A. (2022). Optimalisasi lahan pekarangan untuk mendukung ketahanan pangan keluarga di masa pasca pandemi. *Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 6(2), 112–120.
- Pratiwi, D. A., Soumi, A. I., Wicaksono, G., Ahmad, R. N., et al. (2025). Experimental study of amorphous photovoltaic systems in indoor performance with different coolants. *Engineering Proceedings*, 84(1), 24. <https://doi.org/10.3390/engproc2025084024>
- Rahman, F. (2021). Pemberdayaan ekonomi umat berbasis masjid: Studi kasus model kewirausahaan sosial. *Jurnal Ekonomi Syariah Teori dan Terapan*, 8(3), 245–258.
- Satriyono, R. D. A. P. (2025). Integrating sustainable farming practices in flood-prone Bengawan Solo Delta areas. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1543(1), 012055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1543/1/012046>
- Setiawan, B., & Haryanto, T. (2024). Analisis efisiensi penggunaan air pada sistem pertanian terpadu akuaponik sayuran dan ikan lele. *Jurnal Keteknikan Pertanian*, 12(1), 45–52.
- Suryana, A., Rusastra, I. W., & Sudaryanto, T. (2020). Strategi penguatan ketahanan pangan nasional dalam menghadapi dinamika global dan perubahan iklim. *Analisis Kebijakan Pertanian*, 18(1), 1–14. <https://doi.org/10.21082/akp.v17n1.2019.1-12>

- Suryani, T., & Carolina, H. (2017). Pertumbuhan dan hasil jamur tiram putih pada beberapa bahan media pembibitan. *Bioeksperimen: Jurnal Penelitian Biologi*, 3(1), 73–86. <https://doi.org/10.23917/bioeksperimen.v3i1.3674>
- Susanto, E., & Hermawan, D. (2022). Analisis biaya energi pada sistem akuakultur intensif dan strategi efisiensinya. *Jurnal Akuakultur Indonesia*, 21(2), 150–160. <https://doi.org/10.51158/ekuivalensi.v8i1.642>
- Wahyuni, S. (2021). Transformasi pertanian tradisional menuju pertanian cerdas 4.0: Tantangan dan peluang bagi petani kecil. *Jurnal Sosial Ekonomi Pertanian*, 15(1), 23–34.
- Wijaya, A., & Kusuma, H. (2023). Potensi dan tantangan pemanfaatan energi surya untuk sektor pertanian di Pulau Jawa. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 4(2), 88–97.