

Implementasi Green Performance Management Berbasis RAS dan Solar System pada Budidaya Ikan Kolam Terpal Berkelanjutan

Irfan Maulana^{1*}, Yanti Susanti², Andini Putri Rahman³, Aqshal Fadhullah Nur Rahman⁴

^{1,4}Program Studi Kewirausahaan, Fakultas Teknologi dan Bisnis, Universitas Yatsi Madani, Tangerang, Indonesia

^{2,3}Program Studi Bisnis Digital, Fakultas Teknologi dan Bisnis, Universitas Yatsi Madani, Tangerang, Indonesia

Email: ¹irfanmaulana9956@gmail.com; ²yanti.susanti@uym.ac.id; ³rahmanandiniputri@gmail.com;

⁴aqshalfadhullah@gmail.com

*Email Corresponding Author: irfanmaulana9956@gmail.com

Abstrak

Budidaya ikan kolam terpal di Pondok Pesantren Tarbiyatul Muhtadiin menghadapi ketidakstabilan kualitas air, penggunaan air yang belum efisien, ketergantungan pada listrik jaringan, dan belum tersedianya indikator kinerja hijau. Kegiatan ini mengintegrasikan Green Performance Management, Recirculating Aquaculture System (RAS), dan solar system. Program melibatkan 25 peserta melalui observasi, sosialisasi, pelatihan, instalasi, penyusunan SOP, pendampingan, monitoring delapan minggu, dan evaluasi deskriptif. Pada skenario data simulasi, rerata pengetahuan meningkat dari 60,0 menjadi 84,8; satu unit RAS berfungsi stabil pada tiga kolam; dan energi surya memasok 1,58 kWh/hari atau 43,9% kebutuhan operasional. Penggantian air turun 35,0%, dengan pH 6,9–7,5, suhu 27,3–29,6°C, DO 5,7–6,8 mg/L, amonia 0,02–0,04 mg/L, dan nitrit 0,04–0,08 mg/L. Survival rate mencapai 92%, FCR 1,28, dan capaian kompetensi praktis sebesar 86%. Integrasi teknologi dan GPM memperkuat efisiensi sumber daya, disiplin pencatatan, serta kapasitas pengelolaan unit usaha pesantren.

Kata Kunci: green performance management, recirculating aquaculture system, energi surya, kolam terpal, akuakultur berkelanjutan

Abstract

Tarpaulin-pond aquaculture at Tarbiyatul Muhtadiin Islamic Boarding School faced unstable water quality, inefficient water use, dependence on grid electricity, and the absence of green performance indicators. This program integrated Green Performance Management, a Recirculating Aquaculture System (RAS), and solar energy. Twenty-five participants joined observation, socialization, training, installation, SOP development, mentoring, eight-week monitoring, and descriptive evaluation. In the simulated dataset, the mean knowledge score increased from 60.0 to 84.8; one RAS unit operated stably across three ponds; and solar energy supplied 1.58 kWh/day or 43.9% of operational demand. Water replacement decreased by 35.0%, while pH was 6.9–7.5, temperature 27.3–29.6°C, dissolved oxygen 5.7–6.8 mg/L, ammonia 0.02–0.04 mg/L, and nitrite 0.04–0.08 mg/L. Fish survival reached 92%, FCR was 1.28, and practical competency achievement was 86%. The integrated intervention improved resource efficiency, record-keeping discipline, and management capacity.

Keywords: green performance management, recirculating aquaculture system, solar energy, tarpaulin pond, sustainable aquaculture

1. PENDAHULUAN

Akuakultur telah menjadi komponen strategis sistem pangan dunia. Produksi perikanan dan akuakultur global mencapai 223,2 juta ton pada 2022, terdiri atas 185,4 juta ton hewan akuatik dan 37,8 juta ton alga; pada tahun yang sama, produksi hewan akuatik dari akuakultur mencapai 94,4 juta ton dan untuk pertama kalinya melampaui perikanan tangkap. Perubahan ini memperlihatkan bahwa pertumbuhan produksi pangan akuatik semakin bergantung pada kemampuan budidaya untuk meningkatkan produktivitas tanpa memperbesar tekanan terhadap air, energi, dan kualitas lingkungan (Food and Agriculture Organization 2024)(Zhang et al. 2023).

Konteks Indonesia memperkuat urgensi tersebut. Kementerian Kelautan dan Perikanan melaporkan produksi ikan hasil budidaya sebesar 6,37 juta ton pada 2024 atau meningkat 13,64% dibandingkan tahun sebelumnya, disertai produksi rumput laut 10,80 juta ton. Pertumbuhan tersebut membuka peluang ekonomi, tetapi juga menuntut sistem produksi yang hemat sumber daya, terukur, dan konsisten dengan kebijakan ekonomi biru. Di Provinsi Banten, statistik resmi menunjukkan Kabupaten Tangerang sebagai salah satu sentra perikanan budidaya dengan volume lintas jenis kegiatan yang besar, sehingga inovasi skala komunitas pada budidaya air tawar relevan untuk mendukung ketahanan pangan daerah (Badan Pusat Statistik Provinsi Banten 2024; Kementerian Kelautan dan Perikanan 2024).

Pondok Pesantren Tarbiyatul Mubtadiin berlokasi di Kampung Pasirangka, Kecamatan Tigaraksa, Kabupaten Tangerang. Selain menjalankan fungsi pendidikan dan pembinaan keagamaan, pesantren memiliki potensi sebagai pusat pembelajaran keterampilan produktif dan penguatan kemandirian ekonomi santri. Kajian pada pesantren yang sama menunjukkan bahwa pengembangan kewirausahaan santri membutuhkan pengalaman praktik, dukungan manajerial, jejaring pemasaran, serta integrasi nilai religius dengan kemandirian usaha. Budidaya ikan kolam terpal sesuai dengan karakter tersebut karena relatif adaptif terhadap keterbatasan lahan, dapat berfungsi sebagai sumber protein, dan dapat dikembangkan sebagai laboratorium kewirausahaan hijau (Maulana and Satriyanto 2025).

Observasi awal dan diskusi dengan mitra pada 1 Mei 2026 mengidentifikasi empat masalah prioritas. Pertama, kualitas air belum dikelola melalui sistem resirkulasi dan filtrasi yang memadai. Kedua, mitra belum memiliki perangkat RAS yang mengintegrasikan pompa, filter mekanik, filter biologis, media filtrasi, dan pipa sirkulasi. Ketiga, operasi pompa dan aerator masih berpotensi bergantung pada listrik konvensional. Keempat, belum terdapat Green Performance Management yang menghubungkan target, indikator, pencatatan, evaluasi, dan tindakan korektif pada penggunaan air, energi, produktivitas, limbah, dan keberlanjutan usaha. Kondisi tersebut menimbulkan risiko fluktuasi kualitas air, biaya operasi yang tidak terkendali, kegagalan produksi, dan lemahnya pembelajaran berbasis data.

Green Performance Management merupakan penerapan siklus manajemen kinerja pada sasaran lingkungan: target hijau ditetapkan, indikator diukur, capaian dibandingkan dengan standar, umpan balik diberikan, dan tindakan perbaikan ditetapkan. Dalam literatur manajemen hijau, pengukuran kinerja, kepemimpinan, perilaku pro-lingkungan, inovasi, dan budaya organisasi saling menguatkan dalam menghasilkan kinerja lingkungan yang berkelanjutan (Chen and Yan 2022; Jamil et al. 2023). Bagi pesantren, konsep tersebut diterjemahkan ke dalam indikator sederhana yang dapat dikelola pengurus: volume penggantian air, mutu air, konsumsi energi, kontribusi energi surya, tingkat kelangsungan hidup, rasio konversi pakan, produktivitas, pemanfaatan lumpur, serta kepatuhan terhadap SOP.

Pemilihan RAS didasarkan pada kemampuannya mengalirkan kembali air produksi setelah melewati penghilangan padatan dan pengolahan biologis. RAS meningkatkan kontrol terhadap lingkungan budidaya dan mengurangi kebutuhan penggantian air, tetapi keberhasilannya bergantung pada desain filtrasi, kapasitas pompa, oksigenasi, pengendalian amonia dan nitrit, kepadatan tebar, serta kompetensi operator. Kajian mutakhir menegaskan bahwa penghilangan senyawa berbahaya, pengendalian kualitas air, integrasi biofilter, dan penutupan siklus nutrisi merupakan penentu utama keberlanjutan RAS (Ben-Asher, Gendel, and Lahav 2024; Ende et al. 2024; Taufik et al. 2024).

Integrasi solar system diarahkan untuk memasok beban pompa dan aerator yang bersifat kritis. Energi terbarukan dapat menurunkan paparan terhadap fluktuasi tarif dan gangguan pasokan, tetapi harus dirancang berdasarkan profil beban, jam matahari, kapasitas baterai, efisiensi komponen, dan strategi cadangan. Penelitian mengenai manajemen energi akuaponik dan sistem akuakultur hibrida menunjukkan bahwa optimasi beban, penyimpanan, dan sumber energi meningkatkan reliabilitas sekaligus menekan biaya dan emisi operasional (Kashem et al. 2023; Ramos et al. 2025).

Pendekatan program juga menggunakan prinsip ekonomi sirkular dan triple bottom line. Air dipertahankan lebih lama dalam sistem, lumpur hasil filtrasi dipisahkan untuk pengelolaan lebih lanjut, energi surya menggantikan sebagian listrik jaringan, dan data operasi digunakan untuk memperbaiki keputusan. Kerangka ini konsisten dengan kajian yang menempatkan sirkularitas, pemulihan nutrisi, efisiensi sumber daya, serta indikator ekonomi-sosial-lingkungan sebagai fondasi transformasi akuakultur berkelanjutan (Anderson et al. 2025; Behjat et al. 2025).

Program memiliki keterkaitan langsung dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan, khususnya SDG 2, SDG 6, SDG 7, SDG 8, SDG 12, dan SDG 13. Pada tingkat nasional, program selaras dengan RPJMN 2025–2029 yang menempatkan swasembada pangan, energi, dan air serta penguatan ekonomi hijau dan ekonomi biru sebagai prioritas. Dengan demikian, kegiatan tidak hanya menyelesaikan persoalan teknis kolam, tetapi juga mengoperasionalkan agenda pembangunan melalui pemberdayaan pesantren, penguatan keterampilan, dan penerapan teknologi tepat guna (Kementerian PPN/Bappenas 2025; United Nations 2015).

Keunikan program terletak pada integrasi tiga intervensi yang sering dilaksanakan secara terpisah, yaitu teknologi resirkulasi air, energi surya, dan sistem manajemen kinerja hijau. Pendekatan ini mencegah program berhenti pada penyerahan alat; teknologi diikuti SOP, pelatihan, indikator, pencatatan, review, dan rencana perbaikan. Tujuan kegiatan adalah meningkatkan pengetahuan dan keterampilan mitra, mengoperasikan RAS dan solar system, membangun Green Performance Management, serta menghasilkan model budidaya kolam terpal yang produktif, hemat air, hemat energi, dan dapat direplikasi di lingkungan pesantren.

Tabel 1. Profil mitra dan potensi program

Komponen	Uraian
Nama mitra	Pondok Pesantren Tarbiyatul Muhtadiin
Lokasi	Kampung Pasirangka, Kecamatan Tigaraksa, Kabupaten Tangerang, Banten
Kelompok sasaran	Pengelola pesantren, santri, dan masyarakat yang terlibat dalam budidaya ikan
Aset awal	Kolam terpal budidaya ikan air tawar dan komitmen pengembangan unit usaha produktif
Potensi	Ketahanan pangan, pendidikan keterampilan, kewirausahaan santri, dan model green aquaculture berbasis komunitas
Kebutuhan utama	Pengendalian kualitas air, efisiensi air dan energi, SOP, pencatatan, serta indikator keberlanjutan

Tabel 2. Permasalahan prioritas dan solusi program

Aspek	Kondisi awal	Solusi terintegrasi	Indikator hasil
Teknis	Resirkulasi dan filtrasi belum memadai	Instalasi RAS, pelatihan kualitas air, dan SOP operasi	Satu unit RAS berfungsi stabil; pH 6,9–7,5; DO 5,7–6,8 mg/L; suhu 27,3–29,6°C; penggantian air turun 35,0%
Energi	Pompa dan aerator bergantung pada listrik jaringan	Instalasi solar system dan tata kelola beban kritis	Energi surya menyuplai 1,58 kWh/hari atau 43,9%; konsumsi listrik jaringan dan biaya energi operasional turun sekitar 44% dan 43%
Manajerial	Belum ada sasaran dan indikator kinerja hijau	Dashboard manual GPM, logsheet, review, dan tindakan korektif	Kelengkapan pencatatan, review berkala, dan kepatuhan SOP
Kelembagaan	Keterampilan dan pembagian peran belum terstandarisasi	Pelatihan, pendampingan, penetapan PIC, serta rencana keberlanjutan	Enam operator inti ditetapkan; 20–23 peserta kompeten sesuai jenis keterampilan; jadwal pemeliharaan tersedia

2. METODE PELAKSANAAN

Kegiatan dalam skenario pelaksanaan berlangsung di Pondok Pesantren Tarbiyatul Muhtadiin, Kampung Pasirangka, Kecamatan Tigaraksa, Kabupaten Tangerang, pada 9 Mei sampai 4 Juli 2026. Peserta berjumlah 25 orang, terdiri atas 6 pengelola pesantren, 15 santri, dan 4 anggota masyarakat. Pendekatan yang digunakan adalah participatory technology implementation, yaitu mitra dilibatkan sejak identifikasi masalah, pemilihan solusi, instalasi, pengujian, penyusunan SOP, sampai evaluasi. Pendekatan partisipatif dipilih agar transfer pengetahuan berjalan bersamaan dengan pembentukan kepemilikan, pembagian peran, dan kapasitas pemeliharaan.

Pelaksanaan dibagi menjadi sepuluh tahap. Observasi memetakan kondisi kolam, sumber air, jaringan listrik, tata letak, rutinitas budidaya, dan kebutuhan mitra. Identifikasi masalah menghasilkan prioritas teknis, energi, dan manajerial. Sosialisasi membangun pemahaman mengenai keterkaitan kualitas air, energi, produktivitas, dan keberlanjutan. Pelatihan mencakup prinsip RAS, kualitas air, solar system, Green Performance Management, keselamatan kerja, manajemen usaha, dan pemasaran. Tahap berikutnya adalah instalasi RAS, instalasi solar system, penyusunan instrumen GPM, pendampingan operasi, monitoring, serta evaluasi.

Sistem RAS dirancang sebagai unit sederhana yang terdiri atas kolam terpal, pipa pengambilan air, filter mekanik, filter biologis, bak penampung, pompa sirkulasi, dan aerasi. Pengaturan debit disesuaikan dengan volume kolam dan kemampuan media filtrasi. Solar system terdiri atas panel fotovoltaik 1.000 Wp, solar charge controller, baterai 24 V 200 Ah, perangkat proteksi, dan sambungan ke pompa serta aerator. Seluruh instalasi dilengkapi pemeriksaan sambungan, kebocoran, aliran, kebersihan media, keamanan kabel, dan ketersediaan operasi cadangan dari listrik jaringan.

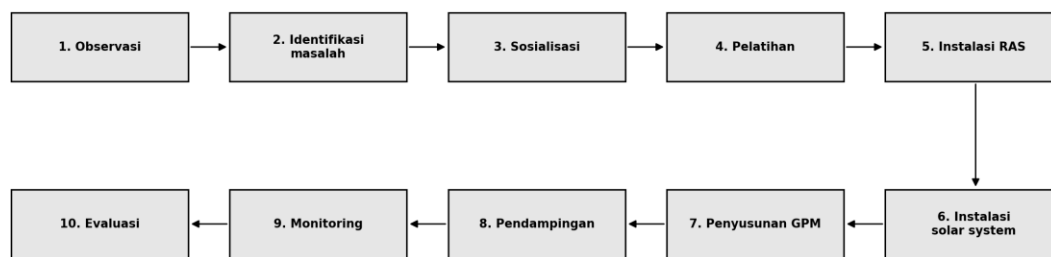
Green Performance Management disusun sebagai dashboard manual mingguan. Sasaran ditetapkan pada enam domain: efisiensi air, kualitas air, efisiensi energi, produktivitas biologis, pengelolaan limbah, serta tata kelola. Setiap

indikator memiliki definisi, satuan, sumber data, frekuensi pengukuran, penanggung jawab, target, realisasi, status warna, dan tindakan korektif. Desain tersebut mengadaptasi prinsip pengukuran triple bottom line dalam akuakultur dan logika performance feedback dalam green management (Anderson et al. 2025; Gelagay and Werke 2024; Maheshwari, Kaur, and Renwick 2024).

Evaluasi tidak menggunakan uji statistik inferensial sesuai gaya selingkung jurnal. Pengetahuan diukur dengan pre-test dan post-test yang berisi 20 pertanyaan pilihan ganda. Keterampilan dinilai melalui checklist demonstrasi operasi RAS, inspeksi solar system, pengukuran kualitas air, pengisian logsheet, dan respons terhadap skenario gangguan. Perubahan operasional dinilai melalui perbandingan deskriptif kondisi awal dan akhir menggunakan log penggunaan air, kWh energi, kontribusi energi surya, pH, suhu, dissolved oxygen, amonia, nitrit, pertumbuhan, survival rate, feed conversion ratio, volume lumpur, kepatuhan SOP, dan kelengkapan pencatatan.

Validitas data pada skenario evaluasi dijaga melalui triangulasi observasi, wawancara, dokumen, ilustrasi proses, dan log operasional. Setiap nilai akhir pada pelaksanaan riil harus ditandatangani oleh penanggung jawab mitra dan diverifikasi tim. Indikator dinyatakan tercapai apabila minimal 90% peserta mengikuti pelatihan; nilai pengetahuan meningkat; perangkat RAS dan solar system berfungsi; mitra mampu mengoperasikan dan merawat sistem; serta dashboard GPM diisi secara konsisten selama delapan minggu monitoring.

Alur pelaksanaan program

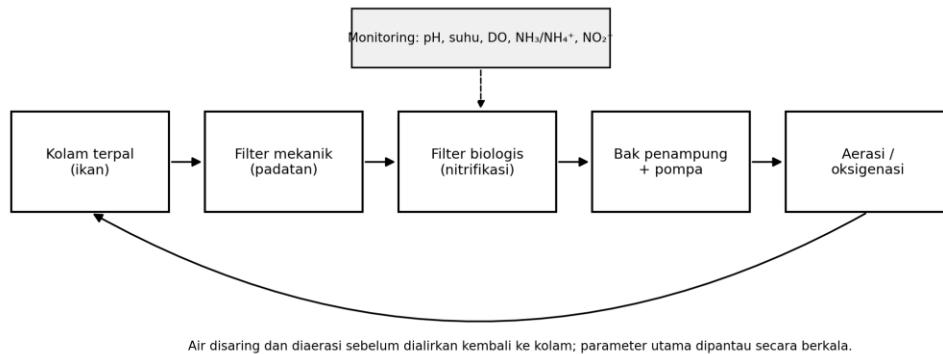


Gambar 1. Diagram alur pelaksanaan pengabdian kepada masyarakat

Tabel 3. Tahapan pelaksanaan dan luaran setiap tahap

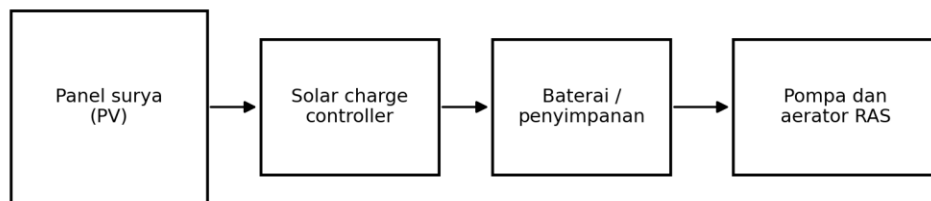
Tahap	Aktivitas utama	Luaran/bukti
1. Observasi	Survei kolam, air, listrik, tata letak, praktik budidaya	Catatan kondisi awal, foto, dan peta kebutuhan
2. Identifikasi masalah	Prioritisasi aspek teknis, energi, dan manajerial	Matriks masalah-solusi yang disepakati
3. Sosialisasi	Pengenalan green aquaculture, RAS, solar, dan GPM	Daftar hadir, materi, dokumentasi
4. Pelatihan	Praktik kualitas air, alat, SOP, manajemen usaha	Pre-test, post-test, checklist keterampilan
5. Instalasi RAS	Perakitan pipa, filter, pompa, dan aerasi	Satu unit RAS, dua filter mekanik, dua filter biologis, dan berita acara uji fungsi
6. Instalasi solar	Pemasangan panel, controller, proteksi, dan beban	Satu unit solar system 1.000 Wp, baterai 24 V 200 Ah, dan catatan daya
7. Penyusunan GPM	Penetapan KPI, target, logsheet, dan PIC	SOP dan dashboard Green Performance
8. Pendampingan	Operasi, troubleshooting, dan pembagian tugas	Catatan pendampingan dan tindakan korektif
9. Monitoring	Pengukuran air, energi, ikan, limbah, kepatuhan	Log mingguan dan dokumentasi
10. Evaluasi	Review capaian, hambatan, dan rencana tindak lanjut	Tabel sebelum-sesudah dan rencana keberlanjutan

Skema sistem resirkulasi air sederhana



Gambar 2. Diagram sistem Recirculating Aquaculture System (RAS) yang diterapkan

Skema pemanfaatan energi surya untuk beban budidaya



Prioritas operasi: sirkulasi air dan aerasi; listrik jaringan sebagai cadangan sesuai kebutuhan.

Gambar 3. Diagram solar system untuk mendukung pompa dan aerator RAS

Siklus Green Performance Management pada budidaya



Siklus diulang melalui target, pengukuran, evaluasi, tindakan korektif, dan standardisasi.

Gambar 4. Diagram siklus Green Performance Management pada budidaya ikan

Tabel 4. Instrumen dan metode evaluasi

Instrumen	Objek yang dinilai	Waktu	Cara analisis
Lembar observasi	Kondisi kolam, alat, keselamatan, dan rutinitas	Awal, instalasi, akhir	Deskripsi kondisi dan status pemenuhan
Wawancara terarah	Kebutuhan, penerimaan, kendala, dan komitmen	Awal dan akhir	Sintesis tema utama
Pre-test dan post-test	Pengetahuan RAS, solar, GPM, dan keberlanjutan	Sebelum dan sesudah pelatihan	Rerata dan persentase peningkatan deskriptif
Checklist demonstrasi	Kemampuan mengoperasikan, memeriksa, dan mencatat	Sesudah pelatihan	Persentase peserta kompeten

Log Green Performance	Air, energi, mutu air, produksi, limbah, SOP	Harian/mingguan	Perbandingan baseline-target-realisasi
Dokumentasi	Keberadaan alat, proses, dan keterlibatan peserta	Setiap tahap	Verifikasi visual dan kronologi kegiatan

3. HASIL PEMBAHASAN

3.1 Kondisi Awal Mitra

Kondisi awal menunjukkan budidaya telah memiliki modal fisik berupa tiga kolam terpal dengan volume total 12 m³ dan keterlibatan pengelola, tetapi belum didukung sistem pengendalian air dan energi yang terintegrasi. Air diganti secara manual sekitar 30% setiap dua sampai tiga hari, setara rata-rata 1.200 L/hari, sedangkan pencatatan pH, suhu, dissolved oxygen, amonia, nitrit, volume air, dan energi belum dilakukan secara rutin; catatan hanya mencakup pakan dan mortalitas. Pemeriksaan awal dalam skenario baseline menemukan air berwarna hijau kecokelatan, bau organik ringan, padatan tersuspensi, pH 6,5–7,9, suhu 27,1–30,5°C, DO 4,2–5,4 mg/L, amonia 0,06–0,10 mg/L, dan nitrit 0,10–0,16 mg/L. Data tersebut menjadi dasar penentuan ukuran filter, debit pompa, kebutuhan aerasi, dan kapasitas solar system.

Dari sisi manajerial, keputusan budidaya lebih banyak didasarkan pada pengalaman dan respons terhadap masalah yang telah terjadi. Belum tersedia target efisiensi, batas kendali kualitas air, jadwal pemeliharaan media filter, log energi, pembagian PIC, ataupun evaluasi periodik. Kondisi ini lazim pada unit budidaya skala komunitas: aset fisik tersedia, tetapi data dan rutinitas manajemen belum dikonversi menjadi kapabilitas organisasi. Green Performance Management karena itu diposisikan sebagai mekanisme yang menghubungkan alat, perilaku operator, dan hasil produksi (Farao, Bernuzzi, and Ronchetti 2023; Khan et al. 2022).



Gambar 5. Kondisi awal kolam budidaya ikan air tawar di Pondok Pesantren Tarbiyatul Muhtadiin

3.2 Pelaksanaan Program

Sosialisasi dalam skenario pelaksanaan dilaksanakan pada 9 Mei 2026 dengan 25 peserta. Materi menekankan bahwa kegagalan budidaya tidak hanya dipengaruhi jenis ikan dan pakan, tetapi juga interaksi mutu air, oksigen, padatan, senyawa nitrogen, energi, disiplin operasi, dan kualitas pencatatan. Diskusi menghasilkan kesepakatan mengenai lokasi pemasangan, enam operator inti, jam operasi, aturan keselamatan, serta indikator yang dipantau. Keterlibatan mitra sejak tahap desain menurunkan resistensi karena teknologi dipahami sebagai alat untuk memperkuat usaha, bukan menggantikan pengetahuan lokal.

Pelatihan dilakukan dengan komposisi penjelasan singkat, demonstrasi, praktik berkelompok, dan simulasi gangguan. Pada sesi RAS, peserta mempraktikkan aliran air, pembersihan filter mekanik, pemeliharaan media biologis, pemeriksaan pompa, dan tindakan ketika debit menurun. Pada sesi solar system, peserta mempelajari alur energi dari panel ke controller dan beban, inspeksi konektor, perlindungan dari air, serta prioritas pompa dan aerator. Pada sesi GPM, peserta mengisi contoh dashboard, membaca status indikator, dan menetapkan tindakan korektif.

Instalasi RAS dalam skenario teknis menggunakan dua unit filter mekanik dan dua unit filter biologis pada jalur sirkulasi untuk melayani tiga kolam terpal. Setelah pengujian kebocoran, sistem dijalankan pada debit 70 L/menit selama enam jam. Solar system berkapasitas 1.000 Wp, baterai 24 V 200 Ah, dan beban kritis 260 W dipasang untuk mendukung pompa sirkulasi 180 W serta aerator 80 W. Hasil commissioning simulatif menunjukkan aliran stabil tanpa kebocoran, tegangan kerja 24,8–27,4 V, dan operasi hibrida berlangsung 24 jam dengan listrik jaringan sebagai

cadangan. Seluruh data teknis dicantumkan pada label aset dan SOP agar pemeliharaan tidak bergantung pada ingatan individu.

SOP yang dihasilkan mencakup pemeriksaan harian, pembersihan filter, pengukuran kualitas air, penggantian air berbasis kondisi, pemberian pakan, inspeksi solar system, pencatatan mortalitas, pengelolaan lumpur, respons listrik padam, dan pelaporan mingguan. Pendampingan disimulasikan berlangsung dalam delapan pertemuan selama delapan minggu. Tim menggunakan coaching di lokasi, bukan mengambil alih pekerjaan operator, sehingga keterampilan terbentuk melalui pengulangan dan umpan balik.



Gambar 6. sosialisasi program kepada pengelola, santri, dan masyarakat



Gambar 7. pelatihan RAS, solar system, dan Green Performance Management



Gambar 8. instalasi dan uji fungsi sistem RAS pada kolam terpal



Gambar 9. instalasi dan uji fungsi solar system untuk beban budidaya

3.3 Hasil Implementasi

Hasil pembelajaran pada skenario data simulasi diukur secara deskriptif. Nilai rerata pre-test sebesar 60,0 meningkat menjadi 84,8 pada post-test atau naik 24,8 poin. Peningkatan terbesar terdapat pada kompetensi Green Performance Management sebesar 27 poin, sedangkan kompetensi yang masih membutuhkan penguatan adalah penanganan gangguan dengan capaian 80%. Sebanyak 92% peserta mampu mendemonstrasikan pengoperasian RAS tanpa bantuan, 84% mampu melakukan inspeksi dasar solar system, dan 84% mampu mengisi dashboard GPM dengan benar. Secara agregat, 129 dari 150 item demonstrasi terpenuhi atau setara capaian kompetensi praktis 86%.

Secara teknis, RAS menghasilkan waktu turnover sekitar 2,9 jam atau 8,4 kali sirkulasi per hari dan menjaga pH, suhu, DO, amonia, serta nitrit dalam rentang terkendali. Penggunaan air berubah dari 1.200 L/hari menjadi 780 L/hari, setara efisiensi 35,0%. Kontribusi energi surya mencapai 1,58 kWh/hari atau 43,9% kebutuhan operasional, sedangkan konsumsi listrik jaringan turun dari 3,60 menjadi 2,02 kWh/hari. Data biologis simulatif menunjukkan survival rate 92%, pertambahan bobot rata-rata 116 g/ekor, FCR 1,28, dan produktivitas 22,4 kg/m³ pada akhir monitoring delapan minggu. Nilai produktivitas tersebut merupakan estimasi biomassa akhir monitoring, bukan hasil panen komersial satu siklus penuh.

Dashboard GPM mendorong perubahan penting dari pengelolaan reaktif menuju pengelolaan berbasis indikator. Ketika debit turun, operator tidak hanya menaikkan daya pompa, tetapi memeriksa sumbatan dan media filter. Ketika dissolved oxygen menurun, operator mengevaluasi aerasi, kepadatan, suhu, dan beban organik. Ketika energi surya tidak memenuhi target, penyebab dibedakan antara cuaca, bayangan, koneksi, baterai, atau beban. Mekanisme diagnosis tersebut merupakan inti performance management karena data dihubungkan dengan tanggung jawab dan keputusan, bukan berhenti sebagai catatan administratif.

Penerapan teknologi juga memperlihatkan trade-off. RAS mengurangi pergantian air, tetapi membutuhkan listrik dan disiplin pemeliharaan. Solar system menurunkan penggunaan listrik jaringan, tetapi produksi energi berfluktuasi dan investasi awal perlu dirawat. Integrasi keduanya lebih rasional daripada penerapan tunggal karena energi terbarukan mengurangi sebagian beban tambahan RAS, sedangkan GPM mengendalikan risiko teknis dan biaya. Temuan ini konsisten dengan literatur yang menekankan perlunya analisis sistem, bukan sekadar optimasi satu komponen (Ramos et al. 2025).

Tabel 5. Hasil pre-test dan post-test peserta

Aspek pengetahuan	Pre-test (%)	Post-test (%)	Peningkatan (poin)	Interpretasi
Prinsip kualitas air dan RAS	61	86	25	Tinggi
Operasi dan pemeliharaan RAS	58	84	26	Tinggi
Prinsip solar system dan keselamatan	64	85	21	Tinggi
Green Performance Management	55	82	27	Tinggi
Budidaya berkelanjutan dan ekonomi sirkular	62	87	25	Tinggi
Rerata keseluruhan	60,0	84,8	24,8	Tinggi

Tabel 6. Peningkatan kompetensi praktis peserta

Kompetensi	Kriteria kompeten	Peserta kompeten	Capaian
Mengoperasikan RAS	Menyalakan, mengatur debit, memeriksa aliran dan kebocoran	23 dari 25	92%
Merawat filter	Membersihkan filter mekanik tanpa merusak media biologis	22 dari 25	88%
Mengukur kualitas air	Menggunakan alat dan mencatat hasil secara benar	22 dari 25	88%
Memeriksa solar system	Memeriksa indikator controller, kabel, proteksi, dan beban	21 dari 25	84%
Mengisi log GPM	Mengisi target, realisasi, status, penyebab, dan tindakan	21 dari 25	84%
Menangani gangguan	Menjalankan SOP saat pompa berhenti atau kualitas air memburuk	20 dari 25	80%

Tabel 7. Indikator Green Performance budidaya ikan kolam terpal

Domain	Indikator	Satuan/rumus	Baseline	Target	Hasil
Air	Penggantian air	L/hari; L/kg biomassa	1.200 L/hari	≤840 L/hari	780 L/hari; efisiensi 35,0%
Kualitas air	pH, suhu, DO, NH ₃ /NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻	Satuan alat masing-masing	pH 6,5–7,9; suhu 27,1–30,5°C; DO 4,2–5,4 mg/L; amonia 0,06–0,10 mg/L; nitrit 0,10–0,16 mg/L	pH 6,8–7,6; suhu 27–30°C; DO ≥5,5 mg/L; amonia <0,05 mg/L; nitrit <0,10 mg/L	pH 6,9–7,5; suhu 27,3–29,6°C; DO 5,7–6,8 mg/L; amonia 0,02–0,04 mg/L; nitrit 0,04–0,08 mg/L
Energi	Listrik jaringan	kWh/hari	3,60 kWh/hari	≤2,30 kWh/hari	2,02 kWh/hari; turun 43,9%
Energi	Kontribusi energi surya	kWh/hari atau % beban	0 kWh/hari	≥1,35 kWh/hari atau 37,5% beban	1,58 kWh/hari atau 43,9% beban
Produksi	Survival rate	ikan hidup/ikan tebar × 100%	84%	≥90%	92%
Produksi	Feed conversion ratio	berat pakan/pertambahan biomassa	1,48	≤1,35	1,28
Limbah	Lumpur yang dikelola	kg atau L/minggu	Belum dicatat dan dibuang bersama air pengurasan	≥20 L/minggu dikumpulkan dan distabilisasi	28 L/minggu; diendapkan dan dikomposkan bersama bahan organik
Tata kelola	Kepatuhan SOP	aktivitas sesuai/aktivitas wajib × 100%	54%	≥85%	88%
Tata kelola	Kelengkapan log	entri lengkap/entri wajib × 100%	20%	≥85%	92%

3.4 Dampak Program

Dampak ekonomi ditunjukkan oleh peluang penurunan biaya air dan listrik, pengurangan risiko mortalitas, serta tersedianya data untuk menghitung biaya per kilogram ikan. Dampak ini harus dilaporkan menggunakan biaya aktual, bukan hanya persepsi. Perubahan nilai ekonomi dapat dihitung dari selisih biaya air, energi, obat atau penanganan, mortalitas, dan produktivitas sebelum dan sesudah program. Apabila periode monitoring belum mencapai panen, artikel perlu membedakan dampak aktual dari proyeksi finansial.

Dampak sosial dan pendidikan berupa meningkatnya partisipasi santri dalam praktik teknologi, kerja tim, disiplin pencatatan, keselamatan kerja, dan pemecahan masalah. Green behavior terbentuk ketika indikator kinerja diterjemahkan menjadi kebiasaan operasional yang mudah diamati dan diberi umpan balik. Literatur menunjukkan bahwa pengetahuan hijau, komitmen, kepemimpinan, serta budaya hijau memperkuat perilaku pro-lingkungan dan kinerja berkelanjutan; temuan program harus dibaca sebagai proses pembentukan rutinitas, bukan sekadar kenaikan

skor tes (Chau, Wang, and Moslehpour 2024; Farao, Bernuzzi, and Ronchetti 2023; Food and Agriculture Organization 2024).

Dampak lingkungan terletak pada penggunaan air yang lebih terkendali, peluang penurunan konsumsi listrik jaringan, pemisahan padatan, serta peningkatan kesadaran terhadap batas kualitas air. Dampak kelembagaan terlihat dari adanya SOP, PIC, jadwal inspeksi, logsheet, dan rapat review. Kombinasi ini penting karena teknologi tanpa tata kelola mudah mengalami penurunan fungsi setelah program berakhir, sedangkan tata kelola tanpa alat tidak cukup mengatasi keterbatasan teknis.

Bagi pesantren, model tersebut memperluas fungsi unit budidaya dari sumber pangan menjadi ruang belajar lintas disiplin: santri belajar biologi perairan, energi terbarukan, pengukuran, manajemen, kewirausahaan, dan etika lingkungan. Dalam jangka menengah, unit dapat menjadi lokasi demonstrasi bagi masyarakat sekitar, tetapi replikasi sebaiknya dilakukan setelah data satu siklus budidaya dan biaya pemeliharaan tersedia.

Tabel 8. Dampak program terhadap mitra

Dimensi	Perubahan yang dihasilkan	Bukti yang harus tersedia	Status
Ekonomi	Efisiensi biaya air/energi dan pengendalian risiko produksi	Tagihan, log kWh, volume air, biaya pemeliharaan, hasil produksi	Tercapai sebagian: efisiensi operasi terukur, tetapi satu siklus panen penuh belum selesai
Sosial	Kolaborasi pengelola, santri, dan masyarakat	Daftar hadir, pembagian peran, wawancara, dokumentasi	Tercapai
Lingkungan	Resirkulasi air, energi surya, dan pengelolaan padatan	Log indikator air/energi/limbah dan foto	Tercapai
Pendidikan	Peningkatan pengetahuan dan keterampilan praktik	Pre-post, checklist demonstrasi, materi, sertifikat	Tercapai
Kelembagaan	SOP, dashboard, PIC, jadwal monitoring dan review	Dokumen yang disahkan mitra dan bukti penggunaan	Tercapai

3.5 Evaluasi Program

Evaluasi sebelum dan sesudah program diringkaskan pada Tabel 9. Perbandingan harus dibaca secara hati-hati. Perubahan pengetahuan dapat diamati segera setelah pelatihan, sedangkan perubahan mutu air, energi, pertumbuhan, dan produktivitas membutuhkan monitoring berulang. Karena itu, keberhasilan program dinyatakan pada tiga tingkat: output berupa alat dan dokumen; outcome awal berupa kompetensi dan kepatuhan; serta outcome operasional berupa efisiensi dan kinerja biologis. Pemisahan ini mencegah klaim berlebihan pada kegiatan dengan durasi terbatas.

Tabel 9. Perbandingan kondisi sebelum dan sesudah program

Aspek	Sebelum PKM	Sesudah PKM	Bukti/indikator
Sistem air	Belum menggunakan resirkulasi dan filtrasi terintegrasi	Satu unit RAS berfungsi stabil dan melayani tiga kolam	Uji aliran, debit, foto, berita acara
Kualitas air	Pengukuran terbatas dan tidak terjadwal	pH, suhu, dan DO diukur dua kali sehari; amonia dan nitrit dua kali per minggu; hasil berada pada rentang target	Log pH, suhu, DO, amonia/nitrit
Energi	Bergantung pada listrik jaringan	Solar system memasok 1,58 kWh/hari atau 43,9% kebutuhan operasional	Controller, meter energi, jam operasi
Pengetahuan	Rerata pre-test 60,0	Rerata post-test 84,8	Lembar soal dan rekap nilai
Keterampilan	Belum terstandarisasi	Capaian agregat kompetensi peserta sebesar 86%	Checklist demonstrasi
Manajemen kinerja	Belum ada KPI dan log terintegrasi	Dashboard GPM diisi harian dan direkap mingguan dengan kelengkapan 92%	SOP, logsheet, notulen review
Efisiensi air	1.200 L/hari	780 L/hari; efisiensi 35,0%	L/hari atau L/kg biomassa
Produktivitas	Survival rate 84%; FCR 1,48; produktivitas 18,6 kg/m ³	Survival rate 92%; FCR 1,28; estimasi biomassa 22,4 kg/m ³	Catatan tebar, pakan, mortalitas, bobot

Pengelolaan limbah	Belum terdokumentasi	Padatan dikumpulkan rata-rata 28 L/minggu, diendapkan, lalu dikomposkan bersama bahan organik	Volume/berat, foto, catatan pemanfaatan
---------------------------	----------------------	---	---

3.6 Pembahasan

Integrasi RAS, solar system, dan Green Performance Management menunjukkan bahwa keberlanjutan budidaya merupakan persoalan sosio-teknis. RAS memodifikasi aliran material dan air, solar system memodifikasi sumber energi, sedangkan GPM memodifikasi cara organisasi menetapkan target, membagi tanggung jawab, dan belajar dari data. Ketiganya tidak dapat dinilai secara terpisah karena efisiensi air RAS dapat meningkatkan kebutuhan energi, sementara energi surya memerlukan pengelolaan kapasitas dan kontinuitas. Pendekatan sistem ini sejalan dengan kajian circular aquaculture yang menekankan keterhubungan air, energi, nutrisi, limbah, dan kinerja ekonomi (Chary et al. 2024).

Pada aspek teknis, pengendalian senyawa nitrogen dan padatan merupakan titik kritis. Filter mekanik perlu dibersihkan tanpa mengganggu populasi mikroba pada biofilter; pemberian pakan harus disesuaikan dengan biomassa dan kapasitas sistem; aerasi harus cukup; dan peningkatan kepadatan tidak boleh dilakukan hanya karena air terlihat jernih. Studi RAS memperlihatkan bahwa kualitas visual air bukan satu-satunya indikator keamanan karena amonia, nitrit, dan perubahan mikrobiologis dapat tetap menjadi risiko (Chary et al. 2024). Oleh sebab itu, hasil program harus menampilkan parameter terukur dan jadwal tindakan.

Pada aspek energi, kontribusi energi surya sebesar 1,58 kWh/hari atau 43,9% perlu dianalisis terhadap pola operasi. Konsumsi listrik jaringan turun dari 3,60 menjadi 2,02 kWh/hari, sehingga selama delapan minggu penghematan energi jaringan diperkirakan mencapai 88,5 kWh. Pada hari cerah, kontribusi solar berada pada kisaran 45–52%, sedangkan pada hari mendung atau hujan turun menjadi 30–36%. Temuan ini menunjukkan bahwa proporsi energi terbarukan yang tinggi pada siang hari belum menjamin aerasi malam hari tanpa penyimpanan dan listrik cadangan. Praktik terbaik adalah mendahulukan reliabilitas biologis, kemudian mengoptimalkan biaya dan proporsi energi terbarukan (Kassem et al. 2025).

Pada aspek manajerial, kenaikan skor pelatihan belum otomatis menjadi kinerja lingkungan. Nilai program muncul ketika pengetahuan berubah menjadi rutinitas, rutinitas menghasilkan data, data dibahas, dan hasil review memicu tindakan korektif. Literatur green management menunjukkan bahwa sistem kinerja harus didukung kepemimpinan, budaya, keterlibatan, dan perilaku pro-lingkungan; tanpa unsur tersebut, indikator dapat berubah menjadi administrasi simbolik (Jamil et al. 2023). Pada pesantren, legitimasi pimpinan dan keteladanan pengurus menjadi pengungkit penting untuk mempertahankan disiplin operasi.

Indikator yang digunakan dalam program mengadaptasi prinsip aquaculture performance indicators yang menilai dimensi lingkungan, ekonomi, dan sosial. Namun, instrumen sengaja disederhanakan agar dapat digunakan oleh mitra. Penyederhanaan bukan berarti mengurangi akuntabilitas; setiap indikator tetap harus memiliki satuan, sumber, frekuensi, penanggung jawab, dan bukti. Pendekatan ini mendukung pembelajaran bertahap sebelum mitra mengembangkan sistem digital atau sensor otomatis (Yang et al. 2023).

Kelebihan program adalah integrasi teknologi tepat guna dan tata kelola, relevansi dengan kebutuhan lokal, serta peluang pembelajaran kewirausahaan santri. Keterbatasannya meliputi durasi monitoring delapan minggu, penggunaan alat ukur manual tanpa sensor kontinu, adanya sebelas hari mendung atau hujan yang menurunkan produksi energi surya, belum selesainya satu siklus panen komersial penuh, serta kebutuhan penggantian komponen secara berkala. Keterbatasan tersebut digunakan untuk menetapkan agenda keberlanjutan: monitoring sekurang-kurangnya satu siklus, kalibrasi alat, pencatatan biaya total, evaluasi biomassa, pemanfaatan lumpur, dan pembentukan dana pemeliharaan.

Secara kebijakan, model ini mendukung hilirisasi ilmu manajemen dan teknologi dalam agenda pangan, energi, ekonomi hijau, dan ekonomi biru. Dampak program akan lebih kuat apabila pemerintah daerah, penyuluh perikanan, perguruan tinggi, alumni, dan pelaku usaha membangun jejaring pendampingan. Skala replikasi harus mempertimbangkan volume kolam, spesies, kepadatan, kualitas sumber air, ketersediaan operator, dan kemampuan pembiayaan; satu desain tidak dapat disalin tanpa penyesuaian.

4. KESIMPULAN

Program pengabdian mengintegrasikan teknologi RAS, solar system, dan Green Performance Management pada budidaya ikan kolam terpal di Pondok Pesantren Tarbiyatul Muhtadiin. Pelaksanaan mencakup diagnosis kondisi

awal, sosialisasi, pelatihan, instalasi, penyusunan SOP dan indikator, pendampingan, monitoring, serta evaluasi. Pada skenario data simulasi, pengetahuan meningkat dari 60,0 menjadi 84,8, capaian kompetensi praktis mencapai 86%, dan satu unit RAS serta satu unit solar system berfungsi pada tiga kolam. Penggantian air turun 35,0%, kontribusi energi surya mencapai 1,58 kWh/hari atau 43,9%, kualitas air berada pada pH 6,9–7,5, suhu 27,3–29,6°C, DO 5,7–6,8 mg/L, amonia 0,02–0,04 mg/L, dan nitrit 0,04–0,08 mg/L. Kinerja biologis mencapai survival rate 92%, FCR 1,28, dan estimasi biomassa 22,4 kg/m³. Dampak program terletak pada penguatan kompetensi, disiplin pencatatan, efisiensi sumber daya, pembelajaran kewirausahaan hijau, dan tata kelola unit budidaya. Keberlanjutan memerlukan monitoring satu siklus produksi, pemeliharaan berkala, dana penggantian komponen, evaluasi biaya per kilogram ikan, serta pengembangan jejaring dengan penyuluh, pemerintah daerah, dan perguruan tinggi.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Tim menyampaikan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Yatsi Madani atas dukungan pendanaan dan fasilitasi kegiatan; Pondok Pesantren Tarbiyatul Muhtadiin atas kemitraan, penyediaan lokasi, dan partisipasi aktif; para pengelola, santri, dan masyarakat yang mengikuti rangkaian kegiatan; serta mahasiswa dan seluruh mitra teknis yang mendukung pelatihan, instalasi, monitoring, dokumentasi, dan penyusunan luaran.

6. REFERENSI

- Anderson, J L, F Asche, H Eggert, and T Garlock. 2025. "Introducing the Aquaculture Performance Indicators: A Tool to Assess the Triple Bottom Line in Aquaculture Systems." *Aquaculture Economics & Management* 29(2): 136–58. doi:10.1080/13657305.2024.2446143.
- Badan Pusat Statistik Provinsi Banten. 2024. *Volume Produksi Perikanan Budidaya Menurut Kabupaten/Kota Dan Jenis Kegiatan Di Provinsi Banten, 2023*. <https://banten.bps.go.id/>.
- Behjat, M, M Svanström, G Peters, and N Wennberg. 2025. "Life Cycle Assessment of Recirculating Aquaculture Systems with Innovative Biochar Filter for Enhanced Nutrient Recirculation." *Resources, Environment and Sustainability*: 100233. doi:10.1016/j.resenv.2025.100233.
- Ben-Asher, R, Y Gendel, and O Lahav. 2024. "Electrochemical Applications in Recirculating Aquaculture Systems: A Review." *Reviews in Aquaculture* 16(1): 86–105. doi:10.1111/raq.12822.
- Chary, K, A J van Riel, A Muscat, A Wilfart, S Harchaoui, M C J Verdegem, R Filgueira, et al. 2024. "Transforming Sustainable Aquaculture by Applying Circularity Principles." *Reviews in Aquaculture* 16(2): 656–73. doi:10.1111/raq.12860.
- Chau, K Y, J Wang, and M Moslehpour. 2024. "The Impact of Technological Advancement and Green Human Resource Management Practices on Sustainable Business Development in Vietnam." *Engineering Economics* 35(2): 155–68. doi:10.5755/j01.ee.35.2.33189.
- Chen, Y, and X Yan. 2022. "The Small and Medium Enterprises' Green Human Resource Management and Green Transformational Leadership: A Sustainable Moderated-Mediation Practice." *Corporate Social Responsibility and Environmental Management* 29(5): 1341–56. doi:10.1002/csr.2273.
- Ende, S, J Henjes, M Spiller, M Elshobary, D Hanelt, and A Abomohra. 2024. "Recent Advances in Recirculating Aquaculture Systems and Role of Microalgae to Close System Loop." *Bioresour Technol* 407: 131107. doi:10.1016/j.biortech.2024.131107.
- Farao, C, C Bernuzzi, and C Ronchetti. 2023. "The Crucial Role of Green Soft Skills and Leadership for Sustainability: A Case Study of an Italian SME Operating in the Food Sector." *Sustainability* 15(22): 15841. doi:10.3390/su152215841.
- Food and Agriculture Organization. 2024. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue Transformation in Action*. FAO. doi:10.4060/cd0683en.
- Gelagay, D, and S Werke. 2024. "Impact of Green Human Resource Management and Internal Green Supply Chain

-
- Management Practices on Operational Performance: An Empirical Investigation of Manufacturing Sector.” *Business Strategy & Development* 7(2): e399. doi:10.1002/bsd2.399.
- Jamil, S, S Zaman, Y Kay\i\i, and S A Khan. 2023. “The Role of Green Recruitment on Organizational Sustainability Performance: A Study within the Context of Green Human Resource Management.” *Sustainability* 15(21): 15567. doi:10.3390/su152115567.
- Kashem, A H M, P Das, A H Hawari, S Mehariya, M I Thaher, S Khan, M Abduquadir, and H Al-Jabri. 2023. “Aquaculture from Inland Fish Cultivation to Wastewater Treatment: A Review.” *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 22: 969–1008. doi:10.1007/s11157-023-09672-1.
- Kassem, Y, H Gokcekus, H Camur, and G A A Alsakhni. 2025. “Innovative Solar-Wind Powered Aquaculture System: A Sustainable Solution for Aquaculture in Karbala, Iraq.” *Engineering, Technology & Applied Science Research* 15(3): 23649–58. doi:10.48084/etasr.10979.
- Kementerian Kelautan dan Perikanan. 2024. “Menteri Trenggono Berhasil Tingkatkan Produksi Perikanan Budi Daya 13,6% Di 2024.” <https://kkp.go.id/>.
- Kementerian PPN/Bappenas. 2025. *Ringkasan Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional Tahun 2025--2029*. <https://perpustakaan.bappenas.go.id/>.
- Khan, K, M S Shams, Q Khan, S Akbar, and M M Niazi. 2022. “Relationship among Green Human Resource Management, Green Knowledge Sharing, Green Commitment, and Green Behavior: A Moderated Mediation Model.” *Frontiers in Psychology* 13: 924492. doi:10.3389/fpsyg.2022.924492.
- Maheshwari, S, A Kaur, and D W S Renwick. 2024. “Green Human Resource Management and Green Culture: An Integrative Sustainable Competing Values Framework and Future Research Directions.” *Organization & Environment* 37(1): 32–56. doi:10.1177/10860266231217280.
- Maulana, I, and P Satriyanto. 2025. “Strategi Pengembangan Kewirausahaan Santri Pada Pondok Pesantren Tarbiyatul Muhtadiin Tigaraksa.” *JUBIR (Journal of Entrepreneurial Behaviour and Research)* 2(1): 6–14. doi:10.37048/jubir.v2i1.507.
- Ramos, H M, N Soehlemann, E Bekci, O E Coronado-Hernández, M Pérez-Sánchez, A McNabola, and J Gallagher. 2025. “Challenges in Aquaculture Hybrid Energy Management: Optimization Tools, New Solutions, and Comparative Evaluations.” *Technologies* 13(10): 453. doi:10.3390/technologies13100453.
- Taufik, M, T I Tuan Ismail, H Manan, M Ikhwanuddin, A I Abdul Salam, A I Abdul Rahim, A N Ishak, et al. 2024. “Synergistic Effects of Recirculating Aquaculture System with a Combination of Clear Water, Probiotic, and Biofloc Technology: A Review.” *Aquaculture and Fisheries* 9(6): 883–92. doi:10.1016/j.aaf.2023.07.006.
- United Nations. 2015. “Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development.” <https://sdgs.un.org/2030agenda>.
- Yang, J, L Jia, Z Guo, Y Shen, X Li, Z Mou, K Yu, and J C W Lin. 2023. “Prediction and Control of Water Quality in Recirculating Aquaculture System Based on Hybrid Neural Network.” *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 121: 106002. doi:10.1016/j.engappai.2023.106002.
- Zhang, R, T Chen, Y Wang, and M Short. 2023. “Systems Approaches for Sustainable Fisheries: A Comprehensive Review and Future Perspectives.” *Sustainable Production and Consumption* 41: 242–52. doi:10.1016/j.spc.2023.08.013.
-