

SMART AQUACULTURE:

Budidaya Perairan Berbasis Teknologi 4.0

Editor: Endah Romadhon



Smart Aquaculture: Budidaya Perairan Berbasis Teknologi 4.0

Resmi Rahmawati, S.Pd., M.Si., dkk.
Editor: Endah Romadhon

PT CIPTA DIGITAL EDUKASI

Anggota IKAPI: No. 666/DKI/2026



Smart Aquaculture: Budidaya Perairan Berbasis Teknologi 4.0

Penulis : Resmi Rahmawati, S.Pd., M.Si., Ita Apriani, S.Pi.,
M.Si., Robby Maulana Putra, S.Si., M.Pi., Lilis
Nurbaiti, S.Pi., M.Si., Ahmad Shifa Uka, S.Si., M.Si.,
Rizka Helisia Putri, S.Pi., M.Si., Safira Meidina
Nursatya, S.Kel., M.Si., dan Aryo Wenang
Wicaksono, S.Pi., M.Si.
ISBN : 978-634-7777-48-5 (PDF)
Penyunting Naskah : Endah Romadhon
Tata Letak : Endah Romadhon
Desain Sampul : Novikean Keysah Sanisri

Penerbit

PT Cipta Digital Edukasi

Jl. Wijaya Ii/Wijaya Grand Centre Blok G-15, Desa/Kelurahan Pulo, Kec. Kebayoran Baru, Kota Adm.
Jakarta Selatan, Provinsi DKI Jakarta, Kode Pos: 1216

E-Mail : penerbitcde@gmail.com

Website : cideka.com

© Hak cipta dilindungi oleh undang-undang

Berlaku selama 50 (lima puluh) tahun sejak Ciptaan tersebut pertama kali dilakukan pengumuman.

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit. Ketentuan Pidana Sanksi Pelanggaran Pasal 2 UU Nomor 19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta.

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau Pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (Tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).
2. Barang siapa dengan sengaja menyerahkan, menyiarkan, memamerkan, mengedarkan atau menjual kepada umum suatu Ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga buku referensi yang berjudul *Smart Aquaculture: Budidaya Perairan Berbasis Teknologi 4.0* dapat disusun dan diselesaikan dengan baik. Buku ini hadir sebagai salah satu referensi yang membahas perkembangan teknologi dalam bidang budidaya perairan serta penerapannya dalam mendukung peningkatan produktivitas, efisiensi, dan keberlanjutan usaha akuakultur di era digital.

Buku ini mengulas berbagai konsep dan aplikasi teknologi 4.0 dalam budidaya perairan, mulai dari pemantauan kualitas air berbasis sensor, sistem pemberian pakan otomatis, pengelolaan data produksi, hingga pemanfaatan teknologi digital dalam pengambilan keputusan. Penulis berharap buku ini dapat menjadi sumber belajar dan referensi yang bermanfaat bagi mahasiswa, dosen, peneliti, praktisi perikanan, serta pelaku usaha budidaya dalam memahami dan mengimplementasikan inovasi teknologi untuk mendukung pengembangan akuakultur yang modern dan berkelanjutan.

Jakarta, Juni 2026

Tim Penyusun

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	iv
Bab 1: Akuakultur Era Baru: Dari Tradisional ke Digital.....	1
Resmi Rahmawati, S.Pd., M.Si.	1
1.1 Transformasi Akuakultur Modern	1
1.2 Sistem dan Skala Budidaya Kontemporer	5
1.3 Peran Strategi dalam Ketahanan Pangan Global	10
1.4 Potensi Indonesia sebagai Pemain Utama Kawasan.....	15
1.5 Mengganggu Teknologi dan Peluang Bisnis	19
Bab 2: Sains Perairan: Fondasi Ekosistem Budidaya	24
Robby Maulana Putra, S.Si., M.Pi.....	24
2.1 Anatomi dan Fisiologi Organisme Akuatik.....	24
2.2 Dinamika Ekosistem dan Daya Dukung Perairan	27
2.3 Indeks Kualitas Udara dan Standar Budidaya	31
2.4 Pemantauan Parameter Lingkungan Secara Real-Time	34
2.5 Perubahan Iklim dan Adaptasi Budidaya	37
Bab 3: Teknologi Pembenihan: Rekayasa Produksi Berkualitas	42
Lilis Nurbaiti, S.Pi., M.Si.	42
3.1 Seleksi Genetik dan Manajemen Induk	42
3.2 Pemijahan Terinduksi dan Teknologi Reproduksi	45
3.3 Pemeliharaan Larva dan Optimalisasi Kelangsungan Hidup	48
3.4 Pendederan Cerdas dan Logistik Benih.....	51
3.5 Rekayasa Kelamin dan Budidaya Monosex	54
Bab 4: Sistem Budidaya Pintar: Intensifikasi Berkelanjutan.	58

Ita Apriani, S.Pi., M.Si.	58
4.1 Budidaya Presisi dan Kecerdasan Buatan	58
4.2 Kolam, Keramba, dan Sistem Jaring Apung	60
4.3 Sistem Resirkulasi dan Budidaya Tanpa Limbah.....	63
4.4 Integrasi Bioflok-Akuaponik dan Multi-Trofik.....	65
4.5 Budidaya Vertikal dalam Ruangan dan Pertanian Kota	68
Bab 5: Budidaya Air Tawar: Optimalisasi Produksi	71
Ita Apriani, S.Pi., M.Si.	71
5.1 Spesies Unggulan Ekonomi Tinggi	71
5.2 Ikan Lokal dan Industri Ikan Hias	73
5.3 Desain Polikultur dan Kompatibilitas Spesies.....	75
5.4 Integrasi Padi-Ikan dan Pertanian Terpadu	77
5.5 Budidaya Udang Galah dan Lobster Air Tawar	80
Bab 6: Budidaya Laut: Ekspansi Ekonomi Biru	83
Ahmad Shifa Uka, S.Si., M.Si.	83
6.1 Budidaya Udang Intensif dan Pencegahan Penyakit	83
6.2 Kepiting Bakau, Rajungan, dan Lobster Laut	88
6.3 Ikan Laut Bernilai Tinggi	92
6.4 Rumput Laut, Kerang, dan Budidaya Lepas Pantai.....	96
6.5 Keramba Jaring Apung dan Teknologi Laut Dalam.....	102
Bab 7: Inovasi Pakan: Nutrigenomik dan Masa Depan.....	110
Resmi Rahmawati, S.Pd., M.Si.	110
7.1 Kebutuhan Nutrisi Spesifik per Spesies	110
7.2 Alternatif Protein dari Serangga dan Mikroalga.....	114
7.3 Teknologi Pengolahan dan Rekayasa Pelet	119
7.4 Kultur Pakan Alami dan Sistem Pemberian Otomatis.....	124
7.5 Optimalisasi Konversi Pakan dan Pemberian Presisi	128
Bab 8: Manajemen Kesehatan: Biosekuriti Menyeluruh.....	133
Rizka Helisia Putri, S.Pi., M.Si.	133

8.1 Penyakit Emerging dan Pengawasan Patogen	133
8.2 Diagnostik Molekuler dan Deteksi Cepat.....	137
8.3 Kedokteran Preventif dan Protokol Biosekuriti.....	140
8.4 Probiotik, Imunostimulan, dan Program Vaksinasi.....	144
8.5 Budidaya Tanpa Antibiotik dan Resistensi Antimikroba	148
Bab 9: Rekayasa Lingkungan: Akuakultur Hijau.....	153
Safira Meidina Nursatya, S.Kel., M.Si.	153
9.1 Manajemen Kualitas Air Berbasis Sensor Pintar.....	154
9.2 Sistem Aerasi dan Optimalisasi Oksigen Terlarut.....	157
9.3 Pengolahan Limbah dan Pemulihan Nutrisi	160
9.4 Budidaya Netral Karbon dan Jasa Ekosistem.....	164
9.5 Karbon Biru dan Adaptasi Perubahan Iklim.....	167
Bab 10: Masa Depan Akuakultur: Teknologi, Keberlanjutan, & Pasar.....	171
Aryo Wenang Wicaksono, S.Pi., M.Si.	171
10.1 Pemanenan Cerdas dan Rantai Dingin Terintegrasi	171
10.2 Pengolahan Nilai Tambah dan Jaminan Mutu.....	175
10.3 Ketertelusuran, Sertifikasi, dan Keamanan Pangan.....	179
10.4 Pemuliaan Berbasis Kecerdasan Buatan dan Blockchain.....	182
10.5 Ekonomi Sirkular dan Budidaya Nol Emisi	185
DAFTAR PUSTAKA.....	189
PROFIL PENULIS	228

Bab 1: Akuakultur Era Baru: Dari Tradisional ke Digital

Resmi Rahmawati, S.Pd., M.Si.

1.1 Transformasi Akuakultur Modern

1.1.1 Definisi dan Konteks Akuakultur Kontemporer

Akuakultur telah berkembang pesat dan menjadi sektor produksi pangan dengan pertumbuhan tercepat di dunia, dengan laju pertumbuhan rata-rata sekitar 6,7 persen per tahun selama dua dekade terakhir. Era baru akuakultur ditandai dengan transisi mendasar dari sistem tradisional yang bersifat ekstensif menuju sistem yang terintegrasi dengan teknologi canggih dan pendekatan ilmiah yang komprehensif. Transformasi ini tidak hanya mencakup metode produksi, tetapi juga melibatkan perubahan paradigma dalam pengelolaan sumber daya, manajemen lingkungan, dan orientasi pasar. Akuakultur modern berkembang tidak hanya sebagai sektor produksi pangan, tetapi juga sebagai sistem yang harus dikelola secara berkelanjutan. Konsep pembangunan berkelanjutan dalam akuakultur didasarkan pada tiga pilar utama, yaitu produktivitas ekonomi, keberlanjutan lingkungan, dan kesejahteraan sosial. Keseimbangan antara ketiga aspek ini menjadi kunci dalam memastikan bahwa kegiatan budidaya perairan tidak hanya mampu memenuhi kebutuhan pangan dan meningkatkan pendapatan, tetapi

juga menjaga kelestarian ekosistem serta memberikan manfaat yang adil bagi masyarakat.

Pergeseran dari akuakultur tradisional ke era baru mencerminkan respon industri terhadap tantangan global yang semakin kompleks. Pertumbuhan populasi manusia yang diproyeksikan mencapai 9,7 miliar pada tahun 2050 menghasilkan permintaan protein yang meningkat 40-75 persen, dengan 70 persen dari permintaan tambahan ini berasal dari negara-negara berkembang (Troell et al., 2023). Dalam konteks ini, akuakultur menawarkan solusi yang lebih efisien dibandingkan dengan peternakan darat tradisional. Penelitian menunjukkan bahwa jejak karbon per kilogram budidaya ikan (seperti salmon) hanya mencapai 1 kilogram CO₂, jauh lebih rendah dibandingkan dengan daging sapi yang mencapai 90 kilogram CO₂ per kilogram produk. Efisiensi konversi pakan akuakultur juga mengungguli sistem produksi ternak darat, dengan tingkat retensi nutrisi yang lebih tinggi dan penggunaan lahan yang lebih efisien.

1.1.2 Perkembangan Teknologi dalam Sistem Budidaya

Transformasi akuakultur modern didorong oleh integrasi teknologi digital dan otomasi yang belum pernah ada sebelumnya. Teknologi *Internet of Things* (IoT), sistem pemantauan berbasis sensor, dan analitik data besar (*big data analitic*) telah mengubah cara petani akuakultur mengelola operasi mereka. Sistem *Recirculating Aquaculture System* (RAS) dan teknologi bioflok (BFT) memungkinkan pengendalian lingkungan yang presisi, pengurangan penggunaan udara hingga 90 persen, dan

pemulihan nutrisi yang mencapai efisiensi 95 persen. Inovasi ini tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga mengurangi dampak lingkungan yang sebelumnya menjadi perhatian utama industri akuakultur.

Penggunaan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) dan pembelajaran mesin (*machine learning*) dalam akuakultur memberikan kemampuan prediktif yang revolusioner. Sistem berbasis AI dapat memprediksi kualitas udara, mendeteksi penyakit ikan pada tahap awal, mengoptimalkan pemberian pakan, dan merencanakan manajemen farmasi yang lebih efektif (Dayiolu & Trker, 2021). Teknologi *drone* dan sistem kamera otomatis dengan analisis visual memungkinkan pemantauan secara *real-time* terhadap kesehatan ikan, perilaku kawanan, dan parameter kualitas udara tanpa intervensi manusia yang ekstensif. Integrasi teknologi blockchain juga membuka peluang baru untuk transparansi rantai pasokan, terutama dalam menjamin keaslian produk akuakultur organik dan hilangnya sertifikasi.

1.1.3 Perubahan Paradigma Manajemen Sumber Daya

Transformasi akuakultur modern mencerminkan perubahan paradigma dalam pendekatan manajemen sumber daya dari ekstraksi murni menjadi pendekatan ekonomi sirkular (*circular economy*). Konsep ini mengintegrasikan akuakultur dengan pertanian dalam sistem yang saling mendukung, seperti pada sistem akuaponik yang menggabungkan budidaya ikan dengan budidaya tanaman hidroponik. Dalam sistem ini, limbah ikan menjadi nutrisi untuk tanaman, sementara tanaman membantu memfiltrasi dan

menyediakan udara untuk ikan (Suryawati et al., 2024). Pendekatan *Integrated Multi-Trophic Aquaculture* (IMTA) memanfaatkan ekologi komplementaritas (*ecological complementarity*) antara berbagai spesies yang dibudidayakan, di mana organisme *filter-feeder* seperti kerang dan rumput laut membantu pengelolaan limbah organik dari ikan yang dibudidayakan (Nazar et al., 2024).

Pergeseran paradigma ini juga tercermin dalam pengakuan akan pentingnya kearifan lokal dalam pengembangan akuakultur berkelanjutan. Penelitian menunjukkan bahwa integrasi praktik tradisional dengan teknologi modern menghasilkan sistem yang lebih tangguh dan ramah lingkungan. Sistem manajemen berbasis komunitas, seperti sistem *sasi* yang dikenal di beberapa daerah di Indonesia, menyediakan mekanisme pengendalian sumber daya yang efektif dan telah teruji oleh waktu. Kombinasi antara pendekatan berbasis ekosistem (*Ecosystem Approach to Aquaculture*) dengan teknologi kontemporer menciptakan model pengembangan yang seimbang antara produktivitas, keberlanjutan lingkungan, dan kesejahteraan sosial (Fadhilah et al., 2024).

1.1.4 Perkembangan Regulasi dan Sertifikasi Internasional

Era baru akuakultur ditandai dengan peningkatan signifikan dalam regulasi dan standarisasi internasional yang mendorong praktik berkelanjutan. Regulasi Uni Eropa tentang keberlanjutan budidaya perikanan, standar ASC (*Aquaculture Stewardship Council*), dan berbagai sertifikasi lingkungan telah meningkatkan biaya produksi tetapi juga membuka akses ke pasar premium yang

menghargai kemiskinan. Pengekspor utama akuakultur negara-negara, khususnya di Asia Tenggara, telah mengadopsi standar-standar ini tidak hanya untuk memenuhi persyaratan pasar impor, tetapi juga untuk meningkatkan kredibilitas dan nilai tambah produk mereka (Setiawan & Surantha, 2024).

Perkembangan regulasi internasional juga mencakup upaya harmonisasi dalam aspek kesehatan akuakultur, penggunaan antibiotik, dan manajemen penyakit. Organisasi seperti *FAO (Food and Agricultural Organization)* dan *OIE (Office International des Épizooties)* telah mengembangkan panduan dan standar yang digunakan sebagai referensi oleh banyak negara. Kerangka kerja regulasi ini mendorong inovasi dalam pengembangan vaksin ikan, probiotik, dan strategi pengendalian penyakit yang tidak bergantung pada antibiotik sintetis. Pada tingkat nasional, banyak negara termasuk Indonesia telah mereformasi kerangka regulasi mereka untuk meningkatkan koordinasi antar lembaga, meningkatkan kapasitas pengawasan, dan menciptakan lingkungan bisnis yang lebih kondusif untuk investasi dalam akuakultur berkelanjutan.

1.2 Sistem dan Skala Budidaya Kontemporer

1.2.1 Diversifikasi Sistem Budidaya dan Spesies

Akuakultur kontemporer menampilkan diversifikasi yang luar biasa dalam jenis sistem budidaya dan spesies yang dibudidayakan. Sistem budidaya dapat dipecah menjadi beberapa tipe utama: sistem ekstensif di tambak dengan input minimal, sistem

semi-intensif yang menggabungkan pengelolaan udara dan pemberian pakan terkontrol, sistem intensif dalam kolam beton atau tangki dengan kontrol lingkungan yang ketat, dan sistem resirkulasi yang menggunakan teknologi filtrasi dan bioteknologi untuk mendaur ulang udara (Troell et al., 2023). Setiap sistem memiliki keunggulan dan keterbatasan spesifik yang membuatnya sesuai dengan kondisi lokal dan spesies tertentu.

Diversifikasi spesies yang dibudidayakan telah berkembang pesat, dengan lebih dari 700 spesies akuatik saat ini dibudidayakan secara komersial di seluruh dunia. Selain spesies dominan seperti salmon, trout, dan udang putih (*Litopenaeus vannamei*), terdapat upaya ekspansi ke spesies-spesies baru yang memiliki potensi ekonomi tinggi, ketahanan terhadap penyakit unggul, atau profil nutrisi yang lebih baik. Penelitian menunjukkan bahwa diversifikasi spesies tidak hanya meningkatkan ketahanan sistem akuakultur terhadap penurunan pasar, tetapi juga mengurangi risiko wabah penyakit yang dapat menjaminkan seluruh produksi monokultur. Budidaya organisme *filter-feeder* seperti kerang mutiara (*Pinctada maxima*) dan rumput laut menawarkan potensi ekonomi yang signifikan dengan dampak lingkungan yang minimal, karena organisme ini tidak memerlukan pakan buatan dan bahkan dapat mengelola nutrisi berlebih dalam lingkungan akuatik (Haryani et al., 2025).

1.2.2 Sistem Budidaya Terpadu dan Multitrofik

Sistem budidaya multitrofik terpadu merepresentasikan evolusi lebih lanjut dalam desain sistem akuakultur berkelanjutan.

Sistem IMTA menggabungkan budidaya spesies pada tingkat tropis yang berbeda dalam satu sistem produksi, memanfaatkan limbah dari satu spesies sebagai masukan nutrisi untuk spesies lainnya. Dalam konfigurasi yang khas, ikan yang diberi pakan menghasilkan limbah organik yang kaya akan nitrogen dan karbon, yang kemudian dimanfaatkan oleh organisme filter-feeder seperti kerang, yang selanjutnya mengeluarkan limbah yang sesuai untuk pertumbuhan rumput laut atau makroalga lainnya. Penelitian empiris menunjukkan bahwa penerapan IMTA dapat meningkatkan output ekonomi total per unit luas sambil mengurangi limbah lingkungan dan meningkatkan sistem ekologis.

Sistem akuaponik merepresentasikan integrasi yang berbeda, menggabungkan akuakultur dengan budidaya tanaman hidroponik dalam satu sistem tertutup. Dalam sistem ini, udara dari kolam ikan yang kaya akan nutrisi dipompa ke area pertanian, di mana bakteri nitrifikasi mengubah amonia dari limbah ikan menjadi nitrat yang tersedia bagi tanaman. Sementara tanaman menyerap nutrisi ini untuk pertumbuhannya, udara yang sudah terfiltrasi kembali ke kolam ikan. Sistem akuaponik ini terbukti sangat cocok untuk pengembangan di daerah perkotaan dan semi perkotaan, dengan keuntungan tambahan berupa efisiensi penggunaan udara yang ekstrim (pengurangan 90 persen dibandingkan pertanian konvensional) dan produksi makanan lokal yang berkelanjutan. Teknologi IoT yang terintegrasi dalam sistem akuaponik modern memungkinkan pemantauan *real-time* terhadap pH udara, tingkat oksigen terlarut, suhu, dan kekeruhan, dengan sistem otomasi yang

dapat menyesuaikan parameter lingkungan secara dinamis untuk mengoptimalkan pertumbuhan baik ikan maupun tanaman (Vdovenko, 2025).

1.2.3 Skala Produksi dari Mikroskala hingga Industri

Akuakultur kontemporer mencakup spektrum skala produksi yang sangat luas, mulai dari sistem rumah tangga skala mikro hingga operasi industri yang melayani pasar global. Produksi mikro dan skala kecil semakin penting dalam konteks ketahanan pangan lokal dan pemberdayaan masyarakat, terutama di negara-negara berkembang. Sistem-sistem ini, yang sering dikelola oleh petani individu atau kelompok komunitas kecil, menawarkan keuntungan berupa perkawinan kondisi terhadap kondisi lokal, pemeliharaan ekosistem tradisional, dan distribusi manfaat ekonomi yang lebih luas dalam komunitas. Dengan dukungan teknologi terbuka dan pelatihan yang tepat, sistem mikro dapat mencapai produktivitas yang sebanding dengan operasi yang lebih besar, tanpa memerlukan modal investasi yang mahal.

Di tingkat menengah, terdapat perkembangan sistem budidaya skala sedang yang memanfaatkan teknologi cukup maju seperti sistem aerasi mekanis, kontrol pakan otomatis berbasis sensor sederhana, dan pemantauan kualitas air berbasis analitik dasar. Operasi pada skala ini sering menunjukkan efisiensi biaya yang optimal, menggabungkan skala ekonomi dengan kegelisahan yang responsif terhadap perubahan pasar. Pada skala industri, operasi akuakultur besar mengintegrasikan teknologi terdepan (teknologi tercanggih), sistem manajemen terintegrasi berbasis

komputer, dan praktik-praktik terbaik yang divalidasi secara ilmiah. Fasilitas RAS industri besar dapat memproduksi ribuan ton ikan berkualitas tinggi per tahun dengan jejak lingkungan yang minimal dan tingkat efisiensi pakan yang mencapai 1:1 atau lebih baik (Fidari et al., 2022).

1.2.4 Tren Relokasi dan Ekspansi Geografis Akuakultur

Lanskap akuakultur global mengalami transformasi geografis yang signifikan dalam dekade terakhir. Meskipun Asia tetap menjadi pusat produksi akuakultur global dengan kontribusi 91,6 persen dari total produksi dan 59,5 persen dari nilai produk akuakultur, terdapat tren relokasi dan ekspansi ke wilayah-wilayah baru. Amerika Selatan, khususnya Chile dan Kolumbia, telah mengembangkan industri salmon yang kompetitif dengan memanfaatkan kondisi hidrologis yang menguntungkan dan infrastruktur yang terintegrasi. Afrika menunjukkan potensi pertumbuhan yang signifikan, didorong oleh ketersediaan lahan, air tawar, dan kebutuhan lokal akan protein yang meningkat. Eropa dan Amerika Utara bergerak menuju sistem RAS secara intensif yang memungkinkan produksi dekat dengan pusat konsumsi, mengurangi jejak karbon transportasi dan meningkatkan kesegaran produk (Dayiolu & Trker, 2021).

Dalam konteks Asia Pasifik, ekspansi akuakultur mulai bergeser dari pertumbuhan ekstensif dalam jumlah area hingga intensifikasi sistem yang ada, didorong oleh tekanan lingkungan dan ketersediaan lahan yang terbatas. Negara-negara seperti Vietnam, Indonesia, dan Filipina mengalami tren konversi dari sistem

ekstensif tambak tradisional menjadi sistem semi-intensif dan intensif yang lebih produktif. Seiring dengan tren ini, terdapat juga pergeseran geografis dalam spesies yang dibudidayakan, dengan udang putih yang lebih tahan terhadap penyakit pengganti udang windu (*Penaeus monodon*) di banyak wilayah, meskipun upaya revitalisasi udang windu melalui teknologi pemuliaan yang lebih baik sedang dalam kemajuan. Pengembangan kawasan budidaya di lepas pantai yang lebih dalam (*deep-offshore aquaculture*) juga menjadi tren yang berkembang, terutama di Tiongkok, memungkinkan perluasan produksi dengan mengurangi persaingan terhadap lahan pesisir yang berharga (Bush et al., 2010).

1.3 Peran Strategi dalam Ketahanan Pangan Global

1.3.1 Kontribusi Akuakultur terhadap Kebutuhan Protein Global

Kontribusi akuakultur terhadap keamanan pangan global telah mencapai tingkat yang belum pernah terjadi sebelumnya. Dari 90,9 juta ton produk akuatik yang dihasilkan secara global pada tahun 2023, akuakultur mencapai 52 persen atau sekitar 47,4 juta ton, melampaui produksi penangkapan ikan untuk pertama kalinya dalam sejarah industri. Tren ini diproyeksikan akan terus berlanjut, dengan perkiraan bahwa akuakultur akan mencapai produksi 72 persen dari total kebutuhan pangan akuatik manusia pada tahun 2050 jika pertumbuhan saat ini tetap terjaga.

Pentingnya akuakultur dalam ketahanan pangan tidak hanya terletak pada volume produksi, tetapi juga pada komposisi nutrisi produk yang dihasilkan. Ikan dan produk akuatik lainnya menyediakan protein berkualitas tinggi dengan profil asam amino yang lengkap, lemak tak jenuh ganda (*Polyunsaturated Fatty Acids* atau PUFA) termasuk omega-3 yang penting untuk kesehatan otak dan jantung, serta berbagai mikro nutrisi esensial seperti selenium, yodium, dan vitamin D. Penelitian epidemiologi menunjukkan bahwa konsumsi ikan dan produk akuatik secara signifikan menurunkan risiko penyakit kardiovaskular, demensia, dan penyakit degeneratif lainnya. Dalam konteks global di mana malnutrisi masih mempengaruhi lebih dari 700 juta orang, akuakultur memainkan peran penting dalam menyediakan protein yang terjangkau dan nutrisi esensial, terutama bagi populasi rendah di negara-negara berkembang (Wasik et al., 2025).

1.3.2 Ketahanan Pangan Lokal dan Keamanan Nutrisi Komunitas

Pada tingkat komunitas dan regional, akuakultur memainkan peran fundamental dalam membangun ketahanan pangan lokal dan keamanan nutrisi. Sistem budidaya skala kecil yang berfokus pada konsumsi lokal dapat memberikan kontribusi protein yang signifikan dengan beban eksternal yang minimal. Penelitian di berbagai negara berkembang menunjukkan bahwa keluarga petani yang terlibat dalam akuakultur skala kecil mengalami peningkatan 20-30 persen dalam asupan protein, dengan perbaikan khususnya pada anak-anak dan perempuan yang sering menjadi kelompok rentan malnutrisi.

Produk akuakultur lokal juga memiliki keuntungan menyediakan lapangan kerja bagi komunitas pesisir, meningkatkan pendapatan rumah tangga, dan mendukung pembangunan ekonomi lokal.

Dalam konteks perubahan iklim yang mengancam produktivitas penangkapan dan pertanian darat, akuakultur menawarkan solusi adaptif yang dapat diimplementasikan dengan implementasi tinggi. Sistem budidaya dapat disesuaikan dengan kondisi iklim lokal yang berubah, misalnya dengan memilih spesies yang lebih tahan terhadap suhu dan salinitas yang berfluktuasi, atau dengan mengadopsi sistem yang membutuhkan input udara lebih sedikit di wilayah dengan ketersediaan air yang menurun (Nazar et al., 2024). Pendekatan budidaya perikanan cerdas iklim yang mengintegrasikan adaptasi iklim dengan mitigasi emisi karbon sedang dikembangkan dan diimplementasikan di berbagai negara, menawarkan jalan menuju akuakultur yang lebih tangguh terhadap perubahan lingkungan.

1.3.3 Peran dalam Mengatasi Kemiskinan dan Pemberdayaan Perekonomian

Akuakultur telah terbukti menjadi salah satu instrumen paling efektif untuk mengatasi kemiskinan dan pemberdayaan komunitas ekonomi di negara-negara berkembang. Lapangan kerja yang diciptakan oleh sektor akuakultur, baik dalam budidaya maupun dalam rantai nilai pasca-panen, mempekerjakan lebih dari 20 juta orang secara global, dengan proporsi perempuan mencapai 28 persen. Dalam banyak komunitas pesisir, terutama di negara-negara dengan pertumbuhan ekonomi rendah, akuakultur

menawarkan peluang mata pencaharian yang berkelanjutan dengan hambatan masuk yang relatif rendah dibandingkan dengan sektor industri modern lainnya (Wira et al., 2025).

Implikasi ekonomi dari akuakultur melampaui produksi primer. Nilai perdagangan akuakultur global mencapai USD 263 miliar pada tahun 2020, dengan pertumbuhan yang terus meningkat. Industri pendukung akuakultur, termasuk produksi pakan, peralatan manufaktur, layanan kesehatan ikan, dan penyimpanan produk, menciptakan lapangan kerja tambahan yang signifikan. Di banyak negara, ekspor produk akuakultur menjadi sumber devisa yang penting, memberikan kontribusi besar terhadap keseimbangan pembayaran nasional. Pengembangan sistem budidaya yang lebih produktif dan berkelanjutan melalui teknologi modern mempromosikan intensifikasi ekonomi yang meningkatkan pendapatan per unit area, memungkinkan petani untuk meningkatkan taraf hidup mereka sambil mengurangi tekanan ekspansi geografis (Andana & Saputra, 2025).

1.3.4 Integrasi Akuakultur dalam Sistem Pangan Lokal dan Pasar Global

Integrasi akuakultur dalam sistem pangan lokal membutuhkan pendekatan yang holistik dan *multi-stakeholder*. Rantai nilai akuakultur yang efisien, mulai dari produksi hingga konsumsi, memerlukan infrastruktur yang memadai untuk penyimpanan, transportasi, dan pemrosesan, serta akses ke pasar yang menguntungkan. Banyak petani akuakultur di negara berkembang masih menghadapi hambatan dalam hal akses pasar

teknologi, kredit, dan informasi, yang membatasi kemampuan mereka untuk meningkatkan produktivitas dan nilai. Inisiatif pengembangan kapasitas, termasuk pelatihan teknis dan pengembangan organisasi petani, telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam meningkatkan produktivitas dan profitabilitas akuakultur lokal (Wasik et al., 2025).

Pada tingkat pasar global, akuakultur semakin terlibat dalam rantai pasokan internasional yang kompleks. Produsen akuakultur besar negara-negara seperti China, Vietnam, dan Indonesia tidak hanya memenuhi permintaan domestik tetapi juga menjadi eksportir utama ke pasar global. Namun, integrasi ini juga membawa tantangan dalam hal kepatuhan terhadap standar internasional, transparansi rantai pasokan, dan mitigasi risiko terkait dengan praktik produksi yang tidak berkelanjutan. Teknologi blockchain sedang dikembangkan untuk meningkatkan transparansi dan ketertelusuran produk akuakultur dalam rantai pasokan global, memungkinkan konsumen mengetahui asal produk dan memastikan bahwa produk diproduksi sesuai dengan standar lingkungan dan sosial yang diterima (Handra et al., 2024). Pengembangan pasar produk akuakultur khusus, seperti ikan organik bersertifikat atau produk yang dibuat dengan sistem budidaya inovatif, membuka peluang untuk penetapan harga premium dan diferensiasi produk yang meningkatkan nilai tambah bagi petani.

1.4 Potensi Indonesia sebagai Pemain Utama Kawasan

1.4.1 Sumber Daya Alam dan Geografis untuk Akuakultur

Indonesia memiliki keunggulan komparatif yang luar biasa untuk pengembangan akuakultur di kawasan Asia Pasifik, didukung oleh sumber daya alam dan geografis yang unik. Sebagai negara kepulauan terbesar di dunia dengan garis pantai sepanjang lebih dari 81.000 kilometer, Indonesia memiliki akses ke lingkungan akuatik yang sangat beragam, mulai dari perairan tropis hangat hingga perairan ekuator dengan produktivitas biologis yang tinggi. Wilayah pesisir Indonesia mencakup lebih dari 6 juta hektar kawasan yang berpotensi untuk pengembangan akuakultur, yang sebagian besarnya masih belum dimanfaatkan secara optimal. Kondisi hidrologis Indonesia, dengan suhu air tawar dan laut yang stabil sepanjang tahun dan curah hujan yang cukup, menciptakan lingkungan yang ideal untuk budidaya berbagai spesies akuatik tanpa memerlukan investasi besar dalam sistem kontrol lingkungan (Lesmana et al., 2026).

Keragaman ekosistem pesisir Indonesia, termasuk hutan bakau, terumbu karang, dan padang lamun, menyediakan fondasi ekologis yang kaya untuk pengembangan akuakultur berkelanjutan. Penelitian menunjukkan bahwa banyak daerah di Indonesia yang cocok untuk pengembangan akuakultur multispesies yang mengintegrasikan budidaya ikan dengan budidaya kerang, rumput laut, dan spesies lainnya (Effendi et al., 2021). Ketersediaan lahan

juga menjadi keunggulan kompetitif Indonesia dibandingkan dengan negara tetangga yang lebih padat penduduknya. Meskipun beberapa wilayah pesisir utama telah mengalami intensifikasi penggunaan lahan, masih terdapat wilayah yang signifikan dengan potensi pengembangan yang belum dieksplorasi secara menyeluruh, terutama di Indonesia bagian timur dan Papua. Kombinasi antara ketersediaan sumber daya alam yang melimpah dan populasi muda yang besar menciptakan peluang untuk menjadikan akuakultur sebagai salah satu pilar pembangunan ekonomi nasional.

1.4.2 Kapasitas Produksi Ini dan Pertumbuhan Potensial

Produksi akuakultur Indonesia pada tahun 2023 mencapai lebih dari 18 juta ton, menempatkan Indonesia sebagai pemimpin produksi akuakultur dunia setelah China. Namun potensi pertumbuhannya masih sangat besar. Analisis terhadap tingkat pemanfaatan lahan akuakultur menunjukkan bahwa Indonesia baru memanfaatkan sekitar 20-25 persen dari total wilayah yang cocok untuk akuakultur. Jika tingkat pemanfaatan ini ditingkatkan menjadi 50 persen dengan peningkatan produktivitas melalui penerapan teknologi modern, produksi akuakultur Indonesia dapat meningkat menjadi 40-50 juta ton pada tahun 2035, dengan nilai ekonomi yang melebihi USD 100 miliar (Wasik et al., 2025). Pertumbuhan ini akan melampaui pertumbuhan populasi manusia dan bahkan memungkinkan Indonesia menjadi eksportir produk bersih akuakultur berkualitas tinggi ke pasar global.

Potensi pertumbuhan ini juga didukung oleh diversifikasi spesies yang dibudidayakan. Saat ini, produksi akuakultur Indonesia

didominasi oleh udang (terutama *Litopenaeus vannamei*) dan ikan lele (*Clarias batrachus*), yang menyumbang lebih dari 60 persen dari total produksi. Namun, penelitian menunjukkan bahwa banyak spesies lain yang memiliki potensi komersial yang tinggi tetapi belum dikembangkan secara optimal di Indonesia, termasuk barramundi (*Lates calcarifer*), kerapu (*Epinephelus* spp.), dan berbagai jenis kerang dan krustasea (Lesmana et al., 2026). Pengembangan sistem budidaya untuk spesies-spesies bernilai tinggi ini dapat meningkatkan nilai tambah per satuan luas dan memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan pendapatan petani akuakultur.

1.4.3 Tantangan dan Hambatan Pengembangan Akuakultur Indonesia

Meskipun memiliki potensi yang besar, Indonesia menghadapi berbagai tantangan struktural dalam pengembangan akuakultur berkelanjutan. Infrastruktur pendukungnya masih belum memadai di banyak lokasi, terutama di daerah terpencil dan Indonesia Timur. Kurangnya fasilitas pembenihan berkualitas tinggi, unit pemrosesan ikan, dan sistem transportasi yang efisien menjadi hambatan signifikan untuk intensifikasi dan diversifikasi produksi. Akses petani akuakultur ke teknologi dan pengetahuan modern juga masih terbatas, dengan banyaknya petani yang masih menggunakan praktik tradisional yang kurang efisien. Investasi dalam penelitian dan pengembangan akuakultur di Indonesia, meskipun meningkat, masih di bawah standar internasional,

menghambat inovasi dan adaptasi teknologi terbaru (Wasik et al., 2025).

Tantangan lingkungan juga masalah menjadi serius. Konversi hutan mangrove untuk pembangunan tambak akuakultur telah mengakibatkan hilangnya ekosistem yang penting dan peningkatan emisi karbon. Praktik akuakultur yang tidak berkelanjutan telah menghasilkan degradasi kualitas udara dan akumulasi limbah organik di beberapa wilayah pesisir utama. Penyakit ikan, terutama penyakit virus pada udang, terus menjadi ancaman bagi kelangsungan usaha akuakultur, menyebabkan kerugian ekonomi yang signifikan setiap tahunnya. Masalah sosial, termasuk konflik lahan antara akuakultur dan pengguna lain, serta isu eksploitasi tenaga kerja dalam industri penyimpanan ikan, juga memerlukan perhatian serius dalam pengembangan sektor yang berkelanjutan dan inklusif (Nagel et al., 2024).

1.4.4 Strategi dan Kebijakan untuk Akselerasi Pengembangan

Untuk mewujudkan potensi Indonesia sebagai pemain utama akuakultur kawasan, diperlukan strategi komprehensif yang mengintegrasikan aspek teknis, ekonomi, lingkungan, dan sosial. Kebijakan nasional perlu difokuskan pada: (1) pengembangan infrastruktur pendukung, khususnya fasilitas penetasan, unit pengangkutan, dan sistem logistik; (2) peningkatan akses petani terhadap teknologi, kredit, dan informasi pasar melalui sistem penyuluhan yang diperkuat dan pengembangan organisasi petani; (3) investasi dalam penelitian dan pengembangan untuk adaptasi teknologi global terhadap kondisi lokal Indonesia; (4) penetapan

regulasi dan sistem pengawasan untuk memastikan terlaksananya akuakultur yang berkelanjutan dan bertanggung jawab secara sosial; dan (5) promosi dan diversifikasi pasar untuk produk akuakultur Indonesia (Wasik et al., 2025).

Implementasi *Ecosystem Approach to Aquaculture* (EAA) di tingkat regional dapat membantu menyeimbangkan pertumbuhan ekonomi dengan pelestarian lingkungan dan keadilan sosial. Program pelatihan dan sertifikasi untuk petani akuakultur, didukung oleh kemitraan dengan universitas dan lembaga penelitian internasional, dapat mempercepat penerapan praktik terbaik. Pengembangan sistem budidaya inovatif seperti RAS dan akuaponik, yang sesuai dengan kondisi lahan terbatas dan perkotaan, dapat membuka peluang baru untuk pertumbuhan akuakultur. Kolaborasi antara pemerintah, sektor swasta, akademisi, dan komunitas masyarakat akan menjadi kunci sukses dalam mengubah potensi menjadi realitas pertumbuhan akuakultur Indonesia yang berkelanjutan.

1.5 Mengganggu Teknologi dan Peluang Bisnis

1.5.1 Transformasi Digital dan Otomasi Sistem Budidaya

Gangguan teknologi digital telah mengubah secara fundamental cara akuakultur dijalankan dan dikelola. Sistem otomasi berbasis IoT memungkinkan pengendalian secara *real-time* terhadap parameter lingkungan kritis seperti oksigen terlarut, pH, suhu, dan kekeruhan udara. Sensor cerdas yang terintegrasi dengan

Platform cloud computing dan kecerdasan buatan dapat menganalisis data lingkungan dengan cepat dan memberikan rekomendasi otomatis untuk penyesuaian operasional, mengurangi kebutuhan akan pengawasan manusia dan meningkatkan efisiensi produksi secara dramatis (Dayiolu & Trker, 2021). Sistem pemberian pakan otomatis (*automatic feeders*) yang menggunakan *computer vision* dapat mengoptimalkan jumlah pakan yang diberikan berdasarkan respon ikan secara *real-time*, mengurangi pemborosan pakan dan meningkatkan efisiensi konversi pakan hingga 20-30 persen.

Teknologi *deep learning* dan *computer vision* telah merevolusi pemantauan kesehatan ikan dan deteksi penyakit. Sistem kamera dengan analisis berbasis AI dapat mendeteksi perubahan perilaku ikan yang mengindikasikan penyakit, stres, atau kualitas udara yang buruk, memungkinkan intervensi dini sebelum terjadi mortalitas massal. *Drone* dan sistem *imaging* lainnya dapat memetakan kondisi kolam secara presisi, mengidentifikasi area dengan kualitas udara yang buruk atau konsentrasi ikan yang tidak merata. Teknologi kembar digital, yang menciptakan representasi virtual dari sistem fisik akuakultur, memungkinkan simulasi dan optimalisasi proses sebelum implementasi, mengurangi risiko kesalahan dan meningkatkan efisiensi perencanaan operasional (Peladarinos et al., 2023).

1.5.2 Peluang Bisnis dalam Ekosistem Digital Akuakultur

Transformasi digital akuakultur telah membuka peluang bisnis yang luas di berbagai segmen ekosistem industri. Perusahaan

startup teknologi yang fokus pada solusi akuakultur digital telah menarik investasi modal ventura yang signifikan, menciptakan ekosistem inovasi yang dinamis. Peluang bisnis mencakup: pengembangan platform manajemen pertanian berbasis cloud yang mengintegrasikan data dari berbagai sumber untuk memberikan intelijen bisnis yang dapat ditindaklanjuti; manufaktur sensor dan perangkat IoT yang dirancang khusus untuk akuakultur; pengembangan algoritma AI dan *machine learning* untuk prediksi panen, manajemen penyakit, dan optimalisasi nutrisi; dan menyediakan layanan konsultasi dan dukungan teknis untuk implementasi teknologi (Arajo et al., 2023).

Peluang bisnis juga muncul di segmen akuakultur pakan, di mana teknologi memungkinkan pengembangan formula pakan yang lebih presisi dan efisien. Penggunaan alternatif pakan berprotein tinggi, seperti tepung serangga, mikroalga, dan produk sampingan industri yang diproses, membuka peluang bagi perusahaan yang dapat mengembangkan teknologi produksi dan produksi yang hemat biaya dan terukur. Platform *marketplace* digital yang menghubungkan petani akuakultur dengan pembeli, penyedia input, dan layanan pendukung telah mengurangi asimetri informasi dan biaya transaksi, menciptakan efisiensi ekonomi yang signifikan.

1.5.3 Teknologi *Blockchain* dan Transparansi Rantai Pasokan

Implementasi teknologi *blockchain* dalam akuakultur menawarkan solusi inovatif untuk meningkatkan transparansi, keamanan, dan efisiensi rantai pasokan. Teknologi buku besar terdistribusi memungkinkan pencatatan transaksi yang tidak dapat

diubah, menciptakan jejak audit yang komprehensif dari sumber produksi hingga konsumsi akhir. Dalam konteks akuakultur, *blockchain* dapat digunakan untuk memverifikasi kontaminasi, melacak asal-usul produk, memastikan kepatuhan terhadap standar internasional, dan mencegah pemalsuan produk premium (Handra et al., 2024). Aplikasi *blockchain* juga memfasilitasi pembayaran langsung kepada petani melalui *kontrak pintar*, mengeliminasi perantara yang tidak perlu dan meningkatkan margin keuntungan petani.

Implementasi *blockchain* di tingkat petani kecil di negara berkembang memang menghadapi tantangan teknis dan operasional, tetapi pengembangan solusi *blockchain* yang sederhana dan ramah pengguna terus berlanjut. Kemitraan antara organisasi internasional, perusahaan teknologi, dan asosiasi petani lokal sedang mengembangkan platform *blockchain* yang disesuaikan dengan konteks lokal dan kebutuhan spesifik industri akuakultur regional. Manfaat potensi dari transparansi *blockchain*, termasuk akses ke pasar premium dan pengurangan risiko penipuan, memberikan insentif yang kuat dari penerapan teknologi ini dalam rantai pasokan akuakultur global.

1.5.4 Model Bisnis Baru Transformasi Industri Akuakultur

Disrupsi teknologi telah mendorong munculnya model bisnis baru yang mengubah struktur industri akuakultur tradisional. Model *platform economy* dalam akuakultur menghubungkan berbagai pemangku kepentingan—petani, pembeli, penyedia layanan, dan investor—dalam ekosistem digital yang terdesentralisasi,

menciptakan nilai melalui fasilitas pertukaran dan kolaborasi daripada melalui produksi langsung. Perusahaan-perusahaan yang beroperasi dalam model ini mengalami pertumbuhan eksponensial dan valuasi yang tinggi karena kemampuan mereka untuk menskalakan tanpa harus mengelola aset fisik yang besar. Model *as-a-service* juga berkembang pesat, di mana penyedia teknologi menawarkan solusi akuakultur digital dengan model pembayaran berdasarkan penggunaan atau hasil, mengurangi hambatan masuk bagi petani kecil yang tidak memiliki modal investasi besar.

Investasi ventura dan *private equity* dalam akuakultur teknologi meningkat signifikan dalam lima tahun terakhir, mencerminkan keyakinan pasar terhadap potensi pertumbuhan sektor ini. Startup yang fokus pada solusi spesifik seperti pemantauan otomatis, sistem pemberian pakan cerdas, manajemen penyakit berbasis AI, dan platform *e-commerce* akuakultur telah menarik pendanaan jutaan dolar. Konsolidasi industri juga terjadi, dengan perusahaan akuakultur besar mengakuisisi startup teknologi untuk mengintegrasikan inovasi digital ke dalam operasi mereka. Transformasi ini menciptakan peluang karir baru dalam industri akuakultur, mulai dari data *scientist*, *engineer* IoT, hingga spesialis pengembangan bisnis yang memahami baik aspek teknis maupun bisnis akuakultur modern.

Bab 2: Sains Perairan: Fondasi Ekosistem Budidaya

Robby Maulana Putra, S.Si., M.Pi.

2.1 Anatomi dan Fisiologi Organisme Akuatik

2.1.1 Struktur Dasar Organisme Akuatik

Organisme akuatik menunjukkan kompleksitas anatomi yang luar biasa dalam adaptasi mereka terhadap lingkungan udara. Pemahaman mendalam tentang struktur fisik dan fungsi fisiologis organisme ini adalah kunci fundamental dalam mengembangkan praktik budidaya yang berkelanjutan (Evans et al., 2010). Berbagai spesies ikan dan krustasea memiliki karakteristik morfologi yang unik, yang telah berkembang selama jutaan tahun evolusi untuk memaksimalkan efisiensi kehidupan di dalam air. Struktur organisme akuatik dirancang khusus untuk mengatasi tekanan fisik dan kimia yang terdapat dalam lingkungan perairan, termasuk viskositas udara, tekanan hidrostatik, dan variasi suhu (Evans et al., 2010).

Sistem pernapasan pada ikan dirancang dengan luar biasa efisien melalui proses pertukaran gas di insang. Insang tersusun dari lamela-lamela tipis yang meningkatkan luas permukaan untuk penyerapan oksigen terlarut dalam air (Cabillon & Lazado, 2019). Berbeda dengan organisme terestrial, ikan harus mengatasi

tantangan khusus dalam mengekstraksi oksigen dari udara yang memiliki kapasitas penyimpanan oksigen jauh lebih rendah dibandingkan udara. Selain itu, kulit ikan berfungsi lebih dari sekedar penghalang; Struktur ini mengandung sel-sel imun penting dan lapisan lendir yang melindungi dari patogen eksternal (Cabillon & Lazado, 2019).

2.1.2 Regulasi Osmoregulasi dan Ionik

Salah satu tantangan fisiologis terbesar bagi organisme akuatik adalah mempertahankan keseimbangan udara dan ion dalam tubuh mereka. Pada ikan air tawar, osmolalitas internal lebih tinggi daripada lingkungan eksternal, sehingga udara cenderung masuk ke dalam tubuh secara osmosis. Sebaliknya, pada ikan laut, osmolalitas internal lebih rendah, dan udara cenderung keluar (Dildar et al., 2025). Mekanisme osmoregulasi yang canggih melibatkan sel-sel khusus dalam insang yang disebut ionosit, yang secara aktif mengangkut ion untuk menjaga keseimbangan internal. Proses ini memerlukan energi metabolik yang signifikan, dan efisiensinya sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti salinitas dan pH perairan (Dildar et al., 2025).

Respon fisiologis terhadap tekanan salinitas menunjukkan plastisitas luar biasa pada beberapa spesies. Organisme *euryhalin* mampu bertahan dalam kisaran salinitas yang luas melalui penyesuaian hormonal dan perubahan permeabilitas membran (Dildar et al., 2025). Kemampuan adaptasi ini mempunyai makna penting untuk budidaya, terutama dalam pemilihan lokasi dan desain sistem pemeliharaan. Pemahaman tentang mekanisme

osmoregulasi membantu para petani akuakultur mengidentifikasi spesies yang paling sesuai dengan kondisi perairan tertentu.

2.1.3 Metabolisme dan Kebutuhan Energi

Metabolisme organisme akuatik sangat dipengaruhi oleh suhu lingkungan, karena sebagian besar spesies bersifat ektotermik, artinya suhu tubuh mereka ditentukan oleh suhu lingkungan (Ren et al., 2021). Laju metabolisme meningkat secara eksponensial dengan peningkatan suhu dalam kisaran tertentu, yang memiliki pengaruh langsung terhadap kebutuhan pakan dan produksi limbah. Perubahan suhu yang cepat atau ekstrem dapat menyebabkan stres fisiologis yang signifikan, mengurangi efisiensi pakan dan meningkatkan kerentanan terhadap penyakit (Ren et al., 2021).

Kebutuhan nutrisi organisme akuatik meliputi protein, lipid, karbohidrat, vitamin, dan mineral dalam proporsi yang tepat. Penelitian menunjukkan bahwa mikrobiota memainkan peran krusial dalam mencerna nutrisi kompleks dan mensintesis metabolit esensial (Rai et al. usus, 2025). Pola makan yang dioptimalkan tidak hanya meningkatkan pertumbuhan tetapi juga memperkuat sistem kekebalan, memungkinkan organisme untuk lebih baik mengatasi stres lingkungan dan penyakit. Pemahaman tentang fisiologi pencernaan dan nutrisi telah membimbing pengembangan pakan budidaya yang lebih efisien dan berkelanjutan.

2.1.4 Respon Adaptif terhadap Stres Lingkungan

Organisme akuatik memiliki mekanisme kompensasi fisiologis yang canggih untuk mengatasi stres lingkungan. Ketika terpapar kondisi suboptimal seperti amoniak tinggi atau rendahnya

oksigen terlarut, ikan menunjukkan perubahan dalam aktivitas enzim antioksidan dan jalur metabolisme (Jin et al., 2025). Hati, sebagai organ metabolisme utama, menunjukkan perubahan struktural dan biokimia sebagai respon terhadap stres, yang dapat diamati melalui analisis histopatologi dan profil metabolomik (Jin et al., 2025). Kapasitas adaptif ini berbeda-beda antar spesies, dengan beberapa organisme yang menunjukkan toleransi yang jauh lebih tinggi terhadap kondisi ekstrem daripada yang lain.

Regulasi *neurohumoral* memainkan peran sentral dalam mengkoordinasikan respons fisiologis terhadap stres (Honcharova, 2023). Hormon seperti kortisol dan katekolamin dilepaskan sebagai respon terhadap stres akut, mengaktifkan mekanisme pertahanan dan mobilisasi energi. Pemahaman tentang sistem regulasi ini memungkinkan para peneliti untuk mengidentifikasi biomarker yang dapat digunakan untuk menilai kesejahteraan dan status kesehatan organisme budidaya dalam kondisi yang berbeda-beda.

2.2 Dinamika Ekosistem dan Daya Dukung Perairan

2.2.1 Konsep Daya Dukung Perairan

Daya dukung perairan mengacu pada jumlah biomassa organisme yang dapat dipertahankan dalam sistem perairan tanpa menyebabkan degradasi lingkungan yang signifikan. Konsep ini bersifat dinamis dan dipengaruhi oleh berbagai faktor termasuk ketersediaan nutrisi, kapasitas sistem pemurnian diri, luas

permukaan perairan, dan volume udara. Dalam konteks budidaya, daya dukung ditentukan tidak hanya oleh kondisi fisik perairan tetapi juga oleh beban limbah yang dihasilkan dari kegiatan budidaya itu sendiri, terutama melalui pakan yang tidak dimakan dan ekskresi organisme budidaya.

Evaluasi daya dukung memerlukan pendekatan holistik yang mempertimbangkan interaksi antara komponen biotik dan abiotik dalam ekosistem. Studi dinamika populasi ikan dalam sistem sungai-danau menunjukkan bahwa konektivitas hidrologi memainkan peran penting dalam mempertahankan populasi dan keragaman spesies. Pengurangan aliran udara atau fragmentasi habitat dapat menyebabkan penurunan drastis dalam pengungkapan ikan dan struktur komunitas, dengan implikasi serius bagi keingintahuan ekonomi budidaya perairan di kawasan tersebut.

2.2.2 Siklus Nutrisi dan Rantai Makanan Akuatik

Nutrisi dalam ekosistem perairan mengalami siklus kompleks yang melibatkan proses abiotik dan biotik. Nitrogen dan fosfor, dua elemen paling penting dalam pertumbuhan organisme akuatik, mengikuti jalur transformasi yang melibatkan sedimen, kolom udara, dan biota. Mikroorganisme benthik memainkan peran transformatif utama dalam siklus nutrisi, melakukan proses seperti denitrifikasi, nitrifikasi, dan mobilisasi fosfor dari sedimen. Pemahaman tentang dinamika ini sangat penting untuk memprediksi sistem respons terhadap masukan nutrisi dari budidaya dan merancang strategi mitigasi yang efektif.

Rantai makanan akuatik menghubungkan produsen primer (fitoplankton dan tumbuhan udara) dengan konsumen pada berbagai tingkat trofik. Dalam sistem budidaya intensif, pakan tambahan mengubah dinamika alami rantai makanan, meningkatkan produktivitas tetapi juga meningkatkan risiko eutrofikasi. Pengetahuan hubungan tentang predator-mangsa dan efisiensi transfer energi antar tingkat trofik membantu dalam merancang sistem budidaya yang lebih efisien dan berkelanjutan, dengan meminimalkan pemborosan pakan dan limbah nutrisi.

2.2.3 Mekanisme Selbstreinigung dan Kapasitas Asimilasi

Kapasitas sistem perairan untuk membersihkan diri dari kontaminasi bergantung pada berbagai proses fisik, kimia, dan biologi yang terjadi secara bersamaan. Oksigen terlarut berfungsi sebagai katalis utama dalam proses dekomposisi aerobik, memungkinkan mikroorganisme untuk mengubah bahan organik menjadi bentuk yang kurang berbahaya. Ketika masukan bahan organik melebihi kapasitas sistem asimilasi, terjadi deplesi oksigen yang dapat mengakibatkan kondisi anaerob dan terbentuknya zat beracun seperti amonia dan sulfida.

Lahan basah dan area terumbu karang membentuk filter alami yang sangat efektif dalam menghilangkan kelebihan nutrisi dari perairan. Vegetasi terestrial dan akuatik di sepanjang tepi sungai dan danau berperan sebagai penyangga yang signifikan, menyerap nutrisi sebelum mencapai badan air utama. Dalam desain sistem budidaya terintegrasi multi-trofik (*Integrated Multi-Trophic Aquaculture/IMTA*), prinsip-prinsip pemurnian diri ini dimanfaatkan

dengan menggabungkan spesies pada tingkat trofik yang berbeda untuk memaksimalkan pemanfaatan nutrisi dan mengurangi limbah.

2.2.4 Keanekaragaman Hayati dan Stabilitas Ekosistem

Keragaman spesies dalam ekosistem perairan memberikan kontribusi langsung terhadap stabilitas dan ketahanan sistem terhadap gangguan. Komunitas akuatik yang lebih beragam menunjukkan ketahanan lebih besar terhadap perubahan lingkungan dan memiliki kapasitas pemulihan yang lebih cepat setelah gangguan. Dalam konteks budidaya, pengurangan keanekaragaman hayati melalui praktik monokultur meningkatkan risiko penyakit dan membuat sistem lebih rentan terhadap ekologi lingkungan yang tidak disengaja.

Spesies endemik dan spesies asli yang memiliki peran ekologis khusus yang telah berkembang selama evolusi jangka panjang, dan penempatan mereka dengan spesies budidaya dapat mengakibatkan perubahan mendasar dalam struktur komunitas. Prinsip-prinsip ekologi menunjukkan bahwa ekosistem dengan struktur struktural dan fungsional yang lebih tinggi mampu mendukung tingkat produktivitas yang lebih tinggi sambil mempertahankan kualitas udara dan sistem kesehatan yang lebih baik.

2.3 Indeks Kualitas Udara dan Standar Budidaya

2.3.1 Parameter Fisika Udara

Parameter fisik udara, termasuk suhu, kejernihan, dan kedalaman, merupakan faktor fundamental yang mengatur fungsi ekosistem perairan dan kesehatan organisme budidaya (Srinivas et al., 2024). Suhu mempengaruhi hampir semua proses biokimia di udara, mulai dari kelarutan gas terlarut hingga laju metabolisme organisme (Srinivas et al., 2024). Fluktuasi suhu yang cepat dapat menyebabkan stres terhadap organisme dan mengurangi efisiensi konversi pakan hingga 20-30 persen dalam beberapa spesies ikan (Ren et al., 2021).

Kejernihan udara, yang diukur melalui transparansi atau turbiditas, mempengaruhi penetrasi cahaya dan produksi primer dalam kolom air. Udara yang terlalu keruh membatasi fotosintesis plankton, mengurangi produksi pakan alami dan kapasitas sistem self-purification. Sebaliknya, udara yang sangat jernih mungkin menunjukkan produktivitas rendah atau konsentrasi nutrisi yang tidak seimbang. Standar budidaya internasional umumnya memberikan transparansi antara 25-50 cm untuk sistem budidaya intensif.

2.3.2 Parameter Kimia Udara dan Indeks Kualitas

Oksigen terlarut (DO) adalah parameter kimia paling kritis untuk kesehatan sistem perairan budidaya, dengan standar minimum 5 mg/L untuk kebanyakan spesies ikan (Srinivas et al., 2024). Konsentrasi DO dipengaruhi oleh suhu, tekanan atmosfer, salinitas,

dan keseimbangan antara fotosintesis dan respirasi. Dalam sistem budidaya intensif, pemantauan DO *real-time* dan sistem aerasi otomatis sangat penting untuk mencegah kondisi hipoksia yang dapat menyebabkan kematian organisme (Dewanto et al., 2026).

Potensi hidrogen (*pH*) mengontrol ketersediaan berbagai nutrisi dan tingkat toksisitas kontaminan tertentu, dengan rentang optimal untuk kebanyakan sistem budidaya antara 6.5-8.5. Konsentrasi amonia, yang berasal dari metabolisme protein organisme budidaya, merupakan kontaminasi paling berbahaya dalam sistem budidaya intensif, dengan standar maksimum berkisar antara 0.02-1.0 mg/L tergantung pada spesies dan pH udara (Jin et al., 2025). Nutrisi makro seperti nitrogen total dan fosfor total harus dipantau secara teratur karena konsentrasi berlebih dapat menyebabkan eutrofikasi dan *Blooming Alga*.

2.3.3 Indeks Kualitas Udara Terstandarisasi

Berbagai indeks kualitas udara telah dikembangkan untuk mengintegrasikan beberapa parameter menjadi satu nilai yang mudah dipahami oleh pengelola budidaya. Indeks Kualitas Air (*WQI*) merupakan alat yang paling banyak digunakan secara global, menggabungkan parameter seperti DO, BOD, pH, amonia, nitrat, fosfor, dan koliform. Setiap parameter diberi bobot berdasarkan kepentingan relatifnya terhadap keselamatan penggunaan udara untuk budidaya, dengan nilai akhir berkisar dari 0 hingga 100, di mana nilai lebih tinggi menunjukkan kualitas udara lebih baik.

Indeks kualitas tambahan seperti *Trophic State Index (TSI)* digunakan untuk menilai tingkat eutrofikasi suatu badan udara,

dengan nilai berkisar dari oligotrofik (nilai rendah) hingga hipertrofik (nilai tinggi). Indonesia menggunakan standar Indeks Pencemaran yang mengklasifikasikan status pencemaran udara menjadi lima kategori, dari tercemar ringan hingga tercemar berat, berdasarkan konsentrasi parameter utama. Pemilihan indeks yang tepat sangat penting karena berbagai indeks mungkin memberikan interpretasi berbeda tentang kualitas udara yang sama, khususnya di daerah dengan karakteristik limnologis unik.

2.3.4 Standar Internasional dan Regulasi Budidaya

Organisasi internasional seperti FAO dan WHO telah menetapkan pedoman komprehensif untuk kualitas budidaya udara yang mencerminkan pengetahuan terbaik tentang kebutuhan berbagai spesies budidaya. Standar-standar ini berbeda berdasarkan sistem budidaya (air tawar versus air laut), spesies yang dibudidayakan, dan tingkat intensifikasi. Standar untuk organisme udara dingin, misalnya memerlukan konsentrasi oksigen terlarut yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesies ikan tropis.

Banyak negara telah mengadopsi standar kualitas air nasional yang disesuaikan dengan kondisi lokal dan praktik budidaya yang dominan. Peraturan ini sering mencakup nilai batas maksimal untuk parameter tertentu, jadwal pemantauan wajib, dan protokol respon ketika parameter tertentu melebihi ambang batas kritis. Kepatuhan terhadap standar ini tidak hanya penting untuk kesehatan organisme budidaya tetapi juga untuk melindungi ekosistem penerima dan kesehatan masyarakat lokal yang bergantung pada sumber air yang sama.

2.4 Pemantauan Parameter Lingkungan Secara *Real-Time*

2.4.1 Teknologi Sensor dan Perangkat Pemantauan

Revolusi digital dalam budidaya perairan telah dimungkinkan oleh pesatnya perkembangan teknologi sensor yang dapat memberikan pengukuran secara *real-time* untuk berbagai parameter kualitas udara (Dewanto et al., 2026). Sensor *Internet of Things (IoT)* yang berbasis mikrokontroler modern seperti ESP32 memungkinkan pengumpulan data kontinyu dengan interval sampling yang dapat disesuaikan, memberikan resolusi temporal yang belum pernah ada sebelumnya. Sensor pH, suhu (*DS18B20*), oksigen terlarut, dan *Total Dissolved Solids (TDS)* dapat terintegrasi dalam satu sistem yang kompak dan berbiaya rendah, memberikan akses kepada petani skala kecil untuk teknologi pemantauan yang sebelumnya hanya tersedia untuk operasi berskala besar (Boumehrez et al., 2025).

Akurasi sensor modern telah meningkat signifikan, dengan sensor komersial mencapai akurasi 95-98 persen dalam kondisi lapangan (M et al., 2024). Namun, kalibrasi rutin dan pemeliharaan sensor sangat penting untuk mempertahankan akurasi ini, terutama dalam lingkungan budidaya yang dapat menyebabkan pengotoran biologis dan deposisi mineral pada permukaan sensor. Teknologi sensor optik dan elektrokimia terbaru menunjukkan ketahanan yang meningkat terhadap kondisi lingkungan ekstrem yang sering dijumpai dalam sistem budidaya intensif (Molla, 2025).

2.4.2 Sistem Komunikasi Data dan Cloud Computing

Transmisi data dari sensor lapangan ke platform penyimpanan dan analisis memerlukan infrastruktur komunikasi yang kuat (Dewanto et al., 2026). Protokol *MQTT* (*Message Queuing Telemetry Transport*) telah menjadi standar de facto untuk *IoT* dalam budidaya, menawarkan *overhead* komunikasi minimal yang cocok untuk perangkat bertenaga baterai. Sistem berbasis GSM dan LoRaWAN menyediakan konektivitas jarak jauh dengan konsumsi daya rendah, memungkinkan pemantauan lokasi budidaya yang terpencil tanpa memerlukan infrastruktur jaringan seluler yang mahal (Bates et al., 2021).

Platform cloud seperti Adafruit IO, ThingSpeak, dan solusi lokal berbasis Raspberry Pi memungkinkan akses data *real-time* dari mana saja, meningkatkan responsivitas pengelola terhadap perubahan kondisi kritis (M et al., 2024). Integrasi dengan basis data lokal memberikan keraguan untuk analisis offline dan pengembangan model prediktif yang dapat digunakan bahkan dalam kondisi konektivitas internet yang terbatas. Keamanan data menjadi pertimbangan penting, terutama dengan meningkatnya skenario serangan *cyber* terhadap sistem pertanian digital, sehingga implementasi enkripsi ringan seperti SPECK-128-CBC menjadi semakin penting (Shete et al., 2025).

2.4.3 Data Analitik dan Sistem Peringatan Otomatis

Pengumpulan data secara *real-time* tanpa analisis yang tepat memiliki nilai terbatas; Oleh karena itu, pengembangan algoritma analitik yang canggih adalah komponen krusial dari sistem

monitoring modern (Taghizadeh & FardArani, 2024). Model *Machine Learning* seperti *Random Forest*, *Linear Regression*, dan *AdaBoost* dapat dibor menggunakan data historis untuk memprediksi parameter kualitas udara masa depan dengan akurasi tinggi, mencapai $R^2 = 0.999$ dalam beberapa aplikasi (Baena-Navarro et al., 2025). Model-model ini dapat berjalan di perangkat komputasi edge seperti Raspberry Pi, memungkinkan prediksi *real-time* tanpa bergantung pada konektivitas cloud yang mungkin tidak selalu tersedia (Taghizadeh & FardArani, 2024).

Sistem peringatan otomatis (*Automated Alert Systems*) menggunakan logika *fuzzy* dan aturan berbasis ambang untuk mengidentifikasi kondisi anomali dan memberi tahu pengelola secara *real-time* (Boumehez et al., 2025). Sistem ini dapat dikonfigurasi untuk merespons tidak hanya nilai parameter absolut tetapi juga laju perubahan, memungkinkan deteksi dini masalah yang mungkin tidak terlihat jika hanya memperhatikan nilai instan. Integrasi dengan sistem kontrol otomatis memungkinkan respon langsung terhadap kondisi kritis, seperti aktivasi aerator otomatis ketika oksigen terlarut jatuh di bawah ambang kritis (Dewanto et al., 2026).

2.4.4 Integrasi Monitoring Multisensor dan *Digital Twin*

Sistem pemantauan modern menggabungkan data dari berbagai sensor dan sumber untuk memberikan gambaran holistik tentang kondisi budidaya (Ding & Lin, 2025). Teknologi *Digital Twin* menggunakan replika virtual dari sistem budidaya fisik untuk simulasi dan optimalisasi operasional, memungkinkan petani untuk

menguji skenario manajemen yang berbeda sebelum diimplementasikan di lapangan (Ubina et al., 2023). Pendekatan ini telah menunjukkan peningkatan efisiensi konversi pakan hingga 22 persen dan pengurangan insiden penyakit hingga 30 persen dalam percobaan lapangan terkendali (Ding & Lin, 2025).

Integrasi *computer vision* dengan sensor tradisional memungkinkan estimasi biomassa secara *real-time* dan mendeteksi perilaku ikan abnormal yang mungkin mengindikasikan kondisi kesehatan yang buruk atau kehadiran penyakit (Jais et al., 2025). Model *YOLOv8* yang telah dioptimalkan dapat mencapai presisi 42.2 persen lebih tinggi dalam estimasi biomassa dibandingkan dengan model umum, menunjukkan pentingnya optimasi domain-spesifik dalam aplikasi akuakultur (Jais et al., 2025). Kombinasi dari parameter kualitas udara *real-time*, estimasi biomassa visual, dan model prediktif menciptakan sistem manajemen yang benar-benar cerdas, meningkatkan pengambilan keputusan pengelola budidaya.

2.5 Perubahan Iklim dan Adaptasi Budidaya

2.5.1 Dampak Perubahan Iklim pada Parameter Perairan

Perubahan iklim global mengakibatkan peningkatan suhu udara yang signifikan, dengan proyeksi menunjukkan peningkatan 1-4°C dalam suhu permukaan laut pada akhir abad ini tergantung skenario emisi. Peningkatan suhu tidak hanya meningkatkan laju metabolisme organisme tetapi juga mengurangi kelarutan oksigen dalam udara, menciptakan kondisi "penekanan termal" di mana

organisme terbentuk pada kebutuhan metabolik yang meningkat sambil menahan ketersediaan oksigen yang menurun (Mehrim & Refaey, 2023). Dampak ini sangat parah bagi spesies yang sudah hidup di batas atas toleransi termal mereka, seperti ikan trout yang berudara dingin di daerah-daerah yang sudah mengalami pemanasan (Mehrim & Refaey, 2023).

Perubahan pola presipitasi mengakibatkan perubahan signifikan dalam ketersediaan air tawar dan salinitas perairan pesisir. Bangladesh, sebagai negara delta yang rentan, mengalami intrusi air asin yang progresif, mengancam kelangsungan budidaya ikan air tawar tradisional di daerah-daerah yang sebelumnya stabil. Frekuensi dan intensitas kejadian cuaca ekstrem seperti badai dan banjir meningkat, menyebabkan hilangnya perekonomian akut melalui kerusakan infrastruktur budidaya dan kematian massal organisme budidaya.

Perubahan iklim juga mengakibatkan deoksigenasi laut, dengan perluasan zona oksigen minimum di wilayah pesisir dan terbuka. Proses ini secara langsung mengurangi habitat yang dapat ditinggalkan oleh banyak spesies komersial dan dapat mengubah struktur komunitas di seluruh ekosistem perairan. Dalam sistem budidaya intensif yang sudah mengalami tekanan dari beban organik yang tinggi, penurunan oksigen alami ini dapat menciptakan kondisi yang sangat berbahaya, memerlukan investasi yang signifikan dalam sistem aerasi untuk mempertahankan kondisi minimum yang dapat diterima.

2.5.2 Strategi Adaptasi Teknis dalam Budidaya

Untuk menghadapi tantangan perubahan iklim, para petani akuakultur telah mengembangkan dan mengadopsi berbagai strategi teknis adaptasi. Diversifikasi spesies budidaya menjadi pendekatan yang semakin populer, dengan petani monokultur sebelumnya beralih ke polikultur yang menggabungkan spesies dengan toleransi suhu dan salinitas yang berbeda. Praktik ini tidak hanya meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim tetapi juga meningkatkan produktivitas sistem secara keseluruhan, karena spesies yang berbeda memanfaatkan ceruk ekologi yang berbeda dalam sistem budidaya.

Sistem resirkulasi akuakultur (RAS) yang mengendalikan semua parameter lingkungan secara ketat menggunakan teknologi filter udara canggih telah terbukti mengurangi kerentanan terhadap perubahan iklim eksternal. Meskipun RAS memerlukan modal yang lebih tinggi dan konsumsi energi yang signifikan, sistem ini memungkinkan produksi lokalisasi spesies yang sebelumnya tidak dapat dibudidayakan di wilayah tertentu karena kondisi iklim. Integrasi energi terbarukan seperti panel surya dan pembangkit angin dengan sistem RAS merupakan pengembangan terbaru yang membuat teknologi ini lebih berkelanjutan dari perspektif lingkungan.

Praktik akuaponik dan IMTA (*Integrated Multi-Trophic Aquaculture*) merepresentasikan pendekatan inovatif yang menggabungkan budidaya ikan dengan tanaman atau organisme lain untuk menciptakan sistem yang lebih tangguh dan produktif. Dalam

sistem IMTA, limbah nutrisi dari ikan digunakan oleh alga atau tanaman udara untuk pertumbuhan, yang kemudian dapat dipanen atau digunakan sebagai pakan, menciptakan loop produksi yang lebih tertutup dan tahan terhadap gangguan eksternal. Penelitian menunjukkan bahwa IMTA dapat meningkatkan kapasitas daya dukung perairan hingga 22 persen sambil meningkatkan diversitas spesies yang dapat diproduksi.

2.5.3 Manajemen Risiko dan Asuransi Parametrik

Meningkatkan pemahaman yang melekat dalam menghadapi perubahan iklim, pengembangan mekanisme manajemen risiko menjadi semakin penting bagi keberlanjutan sektor budidaya. Asuransi parametrik, yang membayarkan jumlah yang telah ditentukan sebelumnya ketika parameter lingkungan melampaui ambang batas tertentu (misalnya suhu udara melebihi 35°C selama lebih dari tiga hari berturut-turut), menawarkan solusi inovatif untuk mengelola risiko yang terkait dengan kejadian iklim ekstrem. Pendekatan ini mengurangi biaya administratif asuransi tradisional dan memungkinkan pembayaran cepat tanpa perlu penyelidikan klaim yang panjang.

Prediksi dan pemantauan lingkungan yang canggih menjadi kunci untuk memprisisifikasi parametrik asuransi secara akurat dan mengidentifikasi risiko yang muncul. Sistem peringatan dini berbasis data iklim dan hidrologi memungkinkan petani untuk mengambil tindakan mitigasi proaktif sebelum kondisi kritis tercapai, mengurangi parahnya dampak negatif. Pendekatan terintegrasi yang menggabungkan peramalan iklim lokal,

pemantauan kualitas udara secara *real-time*, dan model prediktif budidaya menciptakan keputusan lingkungan yang lebih baik bagi petani dalam menangani penyiaran iklim.

2.5.4 Kebijakan dan Dukungan Institusional

Adaptasi terhadap perubahan iklim memerlukan dukungan kebijakan dan kelembagaan yang kuat di tingkat nasional dan internasional. Kerangka kerja iklim nasional yang mencakup target spesifik untuk adaptasi sektor budidaya, alokasi anggaran yang jelas, dan mekanisme koordinasi antar pemangku kepentingan yang sangat penting untuk keberhasilan transisi. Banyak negara telah mempertimbangkan iklim dalam regulasi budidaya, tetapi implementasi sering kali tertinggal di belakang niat, dengan hambatan finansial dan kemampuan teknis yang menghalangi penerapan praktik adaptif.

Program pelatihan dan transfer pengetahuan memainkan peran krusial dalam memfasilitasi adopsi praktik adaptif oleh petani-petani. Petani kecil sering kali kurang memiliki akses terhadap informasi terbaru tentang strategi adaptasi dan teknologi, sehingga program pembelajaran berbasis komunitas dan dukungan teknis yang dipersonalisasi sangat berharga. Integrasi pengetahuan lokal dan tradisional dengan teknologi modern menciptakan pendekatan hibrida yang lebih dapat diterima secara budaya dan lebih efektif dalam konteks lokal yang spesifik.

Bab 3: Teknologi Pembenihan: Rekayasa Produksi Berkualitas

Lilis Nurbaiti, S.Pi., M.Si.

Teknologi pembenihan merupakan fondasi penting dalam industri akuakultur modern yang menentukan keberhasilan budidaya ikan pada tingkat pemeliharaan berikutnya. Perkembangan teknologi pembenihan telah mengalami transformasi signifikan dengan integrasi berbagai pendekatan ilmiah dan aplikasi praktis untuk meningkatkan produksi benih berkualitas tinggi. Bab ini menguraikan tentang teknologi pembenihan, mencakup seleksi genetik, induk manajemen, teknik pemijahan, pemeliharaan larva, pendederan, serta rekayasa kelamin yang menjadi kunci dalam menciptakan benih unggul untuk industri akuakultur berkelanjutan.

3.1 Seleksi Genetik dan Manajemen Induk

3.1.1 Prinsip Dasar Seleksi Genetik

Seleksi genetik merupakan proses mendasar dalam meningkatkan kualitas genetik populasi ikan melalui pemilihan induk dengan sifat-sifat unggul untuk direproduksi. Prinsip seleksi genetik dalam akuakultur didasarkan pada pemahaman mendalam tentang pewarisan sifat dan kemampuan untuk mengidentifikasi individu-individu unggul dalam suatu

populasi (Rasal et al., 2024). Peningkatan kualitas genetik dapat dicapai melalui berbagai metode termasuk *pemuliaan selektif*, penggunaan *penanda molekuler*, dan pendekatan genomik modern. Dalam praktiknya, seleksi klasik telah terbukti efektif meningkatkan pertumbuhan ikan hingga 10-20% per generasi pada spesies tertentu seperti ikan nila. Kemajuan teknologi *DNA sequencing* dan *genomic tools* telah merevolusi pendekatan seleksi dengan memungkinkan identifikasi gen-gen yang mengontrol sifat-sifat ekonomi penting seperti laju pertumbuhan, resistensi penyakit, dan efisiensi konversi pakan (Rasal et al., 2024).

3.1.2 Identifikasi dan Evaluasi Induk Unggul

Identifikasi induk yang unggul memerlukan pengamatan sistematis terhadap berbagai parameter fenotipik dan genotipik untuk memastikan induk memiliki potensi genetik yang optimal. Proses evaluasi meliputi pengukuran karakter pertumbuhan, morfologi, kesehatan fisik, dan kemampuan reproduksi dalam kondisi terkontrol. Penelitian pada ikan seabream merah menunjukkan bahwa melalui seleksi massal pada periode awal budidaya, dapat diperoleh ikan-ikan dengan laju pertumbuhan yang jauh lebih cepat dibandingkan populasi kontrol (Kato, 2023). Evaluasi genetik menggunakan teknologi penugasan orang tua dan pencatatan silsilah membantu dalam mengidentifikasi hubungan kerabatan dan memastikan keragaman genetik dalam populasi induk. Aplikasi prediksi tak bias linier terbaik (BLUP) dan analisis estimasi nilai pemuliaan (EBV) memungkinkan seleksi yang lebih akurat

dengan mempertimbangkan informasi fenotipik dari berbagai individu dan keluarga dalam populasi (Lhorente et al., 2019).

3.1.3 Manajemen Kesehatan Indukan

Kesehatan induk ikan merupakan faktor kritis yang mempengaruhi kualitas telur dan sperma yang dihasilkan serta tingkat keberhasilan reproduksi. Manajemen kesehatan meliputi pemberian pakan berkualitas tinggi, kontrol terhadap kondisi lingkungan, dan program vaksinasi preventif untuk mencegah penyakit. Induk yang sehat secara fisik dan reproduktif akan menghasilkan telur dengan ukuran lebih besar, kadar nutrisi lebih tinggi, dan tingkat pembuahan yang lebih baik. Pemantauan rutin terhadap kondisi tubuh induk, tingkat lemak tubuh, dan tahap kematangan gonad menjadi prosedur standar dalam manajemen induk modern. Pemberian pakan khusus yang diperkaya dengan nutrisi lengkap termasuk asam lemak tak jenuh ganda (HUFA), vitamin E, dan mineral esensial telah terbukti meningkatkan kualitas gamet dan kinerja reproduksi (Kato, 2023).

3.1.4 Pencegahan Inbreeding dan Keanekaragaman Genetik

Pemeliharaan genetika dalam populasi induk sangat penting untuk mencegah penurunan kebugaran akibat perkawinan sedarah dan menjaga potensi adaptasi populasi terhadap perubahan lingkungan. Strategi pencegahan *inbreeding* dapat dilakukan melalui pengelolaan struktur populasi piramida, pencatatan silsilah yang akurat, dan rotasi penggunaan induk dari kelompok keluarga yang berbeda. Teknologi kriopreservasi untuk penyimpanan sperma jangka panjang atau jaringan germinal memungkinkan konservasi

materi genetik yang berharga dan memperluas jarak waktu yang tersedia untuk perencanaan persilangan. Penelitian pada spesies salmon dan trout menunjukkan bahwa dengan penerapan *kerangka pengelolaan genetik* yang optimal, dapat dipertahankan heterozigositas minimal 90% dalam populasi budidaya (Lhorente et al., 2019). Perhitungan koefisien *inbreeding* secara periodik menjadi bagian integral dalam pengambilan keputusan seleksi untuk memastikan perbedaan genetik yang cukup dalam setiap generasi.

3.2 Pemijahan Terinduksi dan Teknologi Reproduksi

3.2.1 Teknik Hormonal dalam Pemijahan

Pemijahan terinduksi menggunakan hormon merupakan teknologi yang sangat penting untuk mengatasi kegagalan reproduksi alami ikan dalam kondisi budidaya intensif. Teknik hormonal dalam pemijahan biasanya melibatkan pemberian hormon gonadotropin-releasing *hormone agonist* (GnRHa) yang dikombinasikan dengan antagonis dopamin, atau *human chorionic gonadotropin* (hCG), serta kombinasi hormon lainnya sesuai dengan karakteristik spesies. Penelitian ekstensif pada berbagai spesies ikan budidaya menunjukkan bahwa penerapan teknologi hormonal dapat meningkatkan tingkat pemijahan hingga 80-95% dengan waktu dan dosis yang tepat (Awal et al., 2025). Pemahaman mendalam tentang profil reproduksi hormonal setiap spesies sangat penting karena respon terhadap perlakuan hormonal dapat berbeda secara signifikan

antar spesies. Protokol injeksi biasanya meliputi dua tahap: dosis *priming* untuk mempersiapkan sistem reproduksi, diikuti dengan dosis akhir untuk merangsang pelepasan gamet dalam waktu tertentu (Awal et al., 2025).

3.2.2 Kondisi Lingkungan untuk Pemijahan

Kondisi lingkungan optimal menjadi pendukung penting untuk keberhasilan pemijahan baik secara alami maupun dengan induksi hormonal. Parameter kunci meliputi suhu udara, fotoperiode, kualitas udara terutama kadar oksigen terlarut, pH, dan tingkat pencahayaan yang sesuai dengan kebutuhan spesies. Penelitian menunjukkan bahwa suhu udara merupakan faktor lingkungan paling kritis dengan rentang optimal yang spesifik untuk setiap spesies, misalnya 22-26°C untuk beberapa spesies cyprinid dan 18-20°C untuk ikan air dingin (Awal et al., 2025). Manipulasi fotoperiode melalui pencahayaan terkontrol dapat mempercepat kematangan gonad dan sinkronisasi pemijahan dalam waktu yang direncanakan. Kualitas udara yang optimal dengan oksigen terlarut minimal 6 mg/L, pH netral hingga sedikit basa (7.0-8.0), dan amonia serta nitrit mendekati nol merupakan kondisi minimum yang harus dipenuhi dalam fasilitas pemijahan (Aya et al., 2023).

3.2.3 Pengumpulan dan Evaluasi Telur

Pengumpulan telur dilakukan dengan hati-hati untuk menghindari kerusakan mekanis yang dapat mengurangi viabilitas. Evaluasi telur mencakup penentuan kualitas secara visual melalui pengamatan warna, transparansi, dan keberadaan butiran minyak yang normal. Telur berkualitas tinggi umumnya menunjukkan

transparansi sempurna, butiran minyak tunggal dan berukuran seragam, serta tidak menunjukkan tanda-tanda degenerasi. Mengukur diameter telur juga penting karena ukuran telur kekurangan nutrisi larva dan tingkat kelangsungan hidup awal (Aya et al., 2023). Volume dan jumlah telur yang diperoleh dipengaruhi oleh faktor induk seperti umur, ukuran tubuh, kondisi nutrisi, dan riwayat reproduksi sebelumnya. Analisis fekunditas (jumlah telur per induk betina) dan fekunditas relatif (telur per kilogram berat tubuh) memberikan informasi penting tentang produktivitas reproduksi induk. Penyimpanan telur sebelum pembuahan harus dilakukan pada suhu rendah (4-8°C) dengan periode maksimal beberapa jam untuk mempertahankan viabilitas.

3.2.4 Peningkatan Fertilisasi dan Daya Tetas

Tingkat pembuahan dan daya tetas merupakan indikator penting keberhasilan pemijahan yang dipengaruhi oleh kualitas gamet, teknik pemijahan, dan kondisi lingkungan selama inkubasi. Tingkat pemupukan rata-rata yang dianggap baik berkisar 70-90% untuk ikan budidaya modern, sedangkan daya tetas optimal mencapai 80-95% (Awal et al., 2025). Peningkatan fertilisasi dapat dicapai melalui optimalisasi rasio induk jantan terhadap betina, timing yang tepat antara ovulasi dan aktivasi sperma, serta penghindaran polispermia. Teknik aktivasi telur menggunakan udara dengan osmolalitas tertentu dan suhu optimal mempengaruhi tingkat penetrasi sperma dan perkembangan embrio normal. Selama inkubasi, manajemen faktor lingkungan seperti suhu stabil, aliran udara konstan untuk aerasi dan pembuangan telur mati, serta

pencegahan kontaminasi jamur melalui pengobatan dengan antiseptik ringan menjadi krusial untuk memaksimalkan daya tetas (Aya et al., 2023).

3.3 Pemeliharaan Larva dan Optimalisasi Kelangsungan Hidup

3.3.1 Tahap Perkembangan Larva

Perkembangan larva merupakan periode kritis yang terdiri dari beberapa tahap dengan karakteristik fisiologis dan kebutuhan nutrisi yang berbeda-beda. Tahap pertama adalah larva kantung kuning telur (prelarvae) dimana larva masih bergantung pada nutrisi dari kantung kuning telur untuk kelangsungan hidupnya, periode ini berlangsung hingga penyerapan kantung kuning telur selesai yang biasanya 3-7 hari tergantung spesies dan suhu (Aya et al., 2023). Tahap berikutnya adalah larva lepas (post-larva) ketika larva sudah harus mencari makanan eksogen, mulut dan anus telah berfungsi, dan laju pertumbuhan mulai meningkat pesat. Tahap remaja dicapai ketika bentuk tubuh sudah menyerupai ikan dewasa meskipun masih dalam ukuran kecil. Pemahaman rinci tentang morfologi dan fisiologi setiap tahap perkembangan penting untuk menentukan manajemen yang tepat, terutama dalam hal penyediaan pakan, kepadatan ternak, dan kondisi lingkungan (S. & Joseph, 2024).

3.3.2 Pemberian Pakan Awal (Pemberian Makan Pertama)

Pemberian pakan awal merupakan momen penting yang menentukan tingkat kelangsungan hidup dan pertumbuhan larva

sejak fase paling rentan. Pakan awal harus memiliki ukuran partikel yang sesuai dengan bukaan mulut larva, biasanya dimulai dengan pakan hidup seperti *rotifer* (*Brachionus* sp.) dan *Artemia nauplii* yang dilengkapi dengan nutrisi esensial melalui proses pengayaan (S. & Joseph, 2024). Nutrisi awal larva sangat penting mencakup protein tinggi (50-60%), lemak esensial terutama HUFA seperti EPA dan DHA, vitamin, dan mineral dalam proporsi yang sesuai. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan pakan hidup yang diperkaya dan dikombinasikan dengan pakan buatan dalam jadwal tertentu dapat meningkatkan tingkat kelangsungan hidup hingga 75-90% pada berbagai spesies (S. & Joseph, 2024). Transisi dari pakan hidup ke pakan buatan harus dilakukan secara bertahap untuk menghindari mortalitas akibat kegagalan adaptasi pakan. Penggunaan teknologi biofloc dalam pemeliharaan larva telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dengan meningkatkan tingkat kelangsungan hidup dan mengurangi kebutuhan akan pakan buatan sekaligus meningkatkan kualitas nutrisi pemeliharaan udara (S. & Joseph, 2024).

3.3.3 Manajemen Kualitas Air pada Hatchery

Kualitas udara pada fasilitas hatchery harus dipantau dan dikelola dengan ketat karena larva sangat sensitif terhadap perubahan parameter lingkungan. Parameter kunci yang harus dikontrol meliputi suhu udara dengan ketinggian minimal $\pm 1^{\circ}\text{C}$ sesuai optimal untuk spesies, oksigen terlarut minimal 5-6 mg/L, pH antara 7,0-8,0, dan amonia serta nitrit mendekati nol (Aya et al., 2023). Sistem sirkulasi udara dengan nilai tukar air yang tepat

penting untuk menghilangkan limbah dan menjaga konsentrasi nutrisi dalam udara, terutama dalam sistem intensif. Pencegahan kontaminasi biologi melalui peralatan dan fasilitas sterilisasi serta pemantauan rutin terhadap keberadaan patogen perlu dilakukan secara preventif. Penggunaan sistem *biofloc* atau teknik air hijau telah terbukti meningkatkan kelangsungan hidup larva dengan menyediakan pakan alami tambahan dan menjaga kualitas udara melalui aktivitas mikroba (S. & Joseph, 2024). Pengukuran transparansi udara menjadi indikator penting kualitas penetasan udara dengan transparansi optimal berkisar 30-50 cm (Aya et al., 2023).

3.3.4 Pencegahan Kematian dan Kelainan Larva

Kematian larva di tempat penetasan dapat mencapai 50-70% tanpa manajemen yang optimal, dengan penyebab utama meliputi kelaparan, penyakit, dan kanibalisme. Pencegahan mortalitas memerlukan pendekatan holistik yang mencakup penyediaan pakan berkualitas dan berukuran sesuai, manajemen kualitas udara optimal, dan kontrol kepadatan stocking yang tepat (Aya et al., 2023). Kejadian kanibalisme terutama pada spesies dengan perbedaan pertumbuhan tinggi dapat dikurangi melalui pemberian pakan sering (4-6 kali sehari), pemilihan jenis pakan yang tepat, dan penyeleksian ukuran larva secara berkala. Kelainan larva seperti memutar mulut, mata buta, serta kelainan tulang dapat terjadi akibat defisiensi nutrisi, terutama vitamin C, E, dan selenium, serta kondisi lingkungan yang kurang optimal. Pencegahan kelainan larva dilakukan melalui penggunaan pakan berkualitas tinggi dengan

nutrisi lengkap, kondisi lingkungan stabil, dan menghindari penanganan yang berlebihan (S. & Joseph, 2024). Pemantauan kesehatan larva melalui pengamatan perilaku, morfologi, dan tingkat pertumbuhan dilakukan setiap hari untuk mendeteksi dini masalah yang dapat ditangani dengan cepat.

3.4 Pendederan Cerdas dan Logistik Benih

3.4.1 Teknologi Pembibitan Modern

Pendederan merupakan fase penting antara larva dan benih siap tebar yang memerlukan teknologi khusus untuk memastikan pertumbuhan optimal dan kualitas benih yang konsisten. Teknologi pembibitan modern mengintegrasikan sistem manajemen kepadatan tebar yang dinamis, sistem pemberian pakan otomatis, dan pemantauan kualitas udara secara *real-time*. Sistem pembibitan dapat berupa hapa dalam kolam, sistem resirkulasi (RAS), atau sistem *flow-through* tergantung spesies dan tujuan produksi. Penelitian pada ikan seabass menunjukkan bahwa penggunaan kepadatan stocking optimal (400-425 ekor per m²) dan sistem penjarangan berkala dapat meningkatkan tingkat kelangsungan hidup hingga 85-90% sambil mempertahankan pertumbuhan seragam (Aya et al., 2023). Aplikasi teknologi sensor otomatis untuk memantau oksigen, suhu, dan pH memungkinkan respons cepat terhadap perubahan kondisi lingkungan. Penggunaan pakan khusus pembibitan dengan kandungan protein 40-42% dan lemak 8-10%

sesuai dengan kebutuhan pertumbuhan benih dalam fase ini (Aya et al., 2023).

3.4.2 Sistem Penilaian (*Grading*) Benih

Penjarangan benih merupakan praktik penting untuk mengurangi mortalitas akibat kanibalisme yang disebabkan oleh pertumbuhan diferensial dalam populasi. Sistem penjarangan melibatkan pemisahan benih berdasarkan ukuran tubuh ke dalam kelompok yang lebih homogen menggunakan penyortir mekanis atau manual. Penjarangan pertama biasanya dilakukan pada hari ketiga pemeliharaan, kemudian diulangi setiap 7-10 hari tergantung laju pertumbuhan dan tingkat mortalitas yang terdeteksi. Penelitian menunjukkan bahwa penjarangan regular dapat mengurangi mortalitas akibat diferensial pertumbuhan hingga 10-15% dan meningkatkan keseragaman ukuran benih yang dihasilkan (Aya et al., 2023). Frekuensi penjarangan harus disesuaikan dengan karakteristik spesies dan kondisi budidaya untuk mencegah stres yang berlebihan. Teknologi penyortiran otomatis berbasis *computer vision* telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi stres penanganan pada benih yang bersifat sensitif terhadap perlakuan mekanis.

3.4.3 Transportasi dan Logistik Benih Unggul

Transportasi benih dari *hatchery* ke lokasi pemeliharaan selanjutnya merupakan fase kritis yang dapat mempengaruhi tingkat kelangsungan hidup dan kinerja pertumbuhan. Benih harus diangkut dalam kondisi yang meminimalkan stres dengan parameter udara sesuai dengan habitat asal, kadar oksigen terlarut tinggi (>6 mg/L),

suhu stabil, dan kepadatan pengepakan yang tidak melebihi kapasitas penipisan oksigen. Penggunaan plastik khusus yang dirancang untuk transportasi dengan sistem oksigenasi internal atau penambahan aerator menjadi standar dalam logistik benih modern. Waktu transportasi harus diminimalkan dengan perencanaan rute yang efisien untuk mengurangi periode stres pada benih. Pemilihan waktu transportasi yang tepat, terutama menghindari periode pagi hari dengan suhu tinggi, dapat meningkatkan kelangsungan hidup selama transportasi. Standar kualitas benih untuk transportasi meliputi ukuran seragam ($\pm 10\%$ variasi), kesehatan optimal tanpa tanda-tanda penyakit, dan cadangan energi yang cukup dalam bentuk lemak tubuh (Aya et al., 2023).

3.4.4 Standardisasi Kualitas Benih

Standardisasi kualitas benih merupakan aspek penting untuk menjamin konsistensi kinerja di lokasi pemeliharaan dan kepuasan konsumen pengguna benih. Parameter kualitas benih meliputi ukuran tubuh (panjang dan berat), kondisi fisik (deformitas, luka), tingkat kelangsungan hidup ($>85\%$ pada saat panen), pertumbuhan seragam, dan status kesehatan bebas dari patogen (Aya et al., 2023). Sistem grading benih mengklasifikasikan berdasarkan ukuran ke dalam kategori *size 0* (paling kecil) hingga *ukuran* tertentu sesuai standar industri spesies. Pengujian kualitas benih dapat dilakukan melalui observasi visual, pengukuran biometrik, analisis ketahanan cekaman terhadap perubahan salinitas atau suhu, dan pengujian kesehatan melalui uji tantangan dengan patogen. Sertifikasi kualitas benih dari lembaga independen memberikan jaminan kepada

pembeli tentang standar yang terpenuhi. Dokumentasi lengkap tentang asal benih, manajemen yang diterapkan, dan hasil pemeriksaan kualitas menjadi bagian dari sistem penelusuran dalam logistik benih modern.

3.5 Rekayasa Kelamin dan Budidaya Monosex

3.5.1 Mekanisme Penentuan Jenis Kelamin pada Ikan

Mekanisme penentuan jenis kelamin pada ikan sangat beragam, berbeda dengan mekanisme pada mamalia, dengan beberapa sistem genetik dan lingkungan yang berbeda antar spesies. Sistem penentuan gender dapat bersifat genetik murni dengan terdiferensiasi jenis kelamin kromosom (seperti sistem XX-XY atau ZW), poligenik dengan kontribusi banyak lokus, atau lingkungan dimana faktor eksternal seperti suhu menentukan jenis kelamin yang berkembang (Martnez et al., 2014). Pada beberapa spesies seperti *Cynoglossus semilaevis* (ikan lidah), sistem penentuannya adalah ZW dimana betina heterogametik (ZW) dan jantan homogametik (ZZ), namun faktor lingkungan terutama suhu dapat menginduksi pembalik jenis kelamin dari fenotipe betina ke jantan (Zhou & Chen, 2016). Penelitian genetika modern menggunakan alat genomik telah mengidentifikasi wilayah penentu jenis kelamin (SDRs) dan gen penentu jenis kelamin pada berbagai spesies dengan hasil yang menunjukkan kompleksitas sistem penentuan jenis kelamin yang jauh lebih rumit daripada yang dipahami sebelumnya (Martnez et al., 2014). Pemahaman mendalam

tentang mekanisme ini penting untuk mengembangkan strategi produksi monosex yang efektif dan stabil.

3.5.2 Teknik Pembalik Kelamin (Sex Reversal)

Teknik pembalik genetik merupakan manipulasi yang diterapkan selama periode perkembangan gonad untuk mengubah jenis fenotipik genetik dari yang ditentukan secara genetik atau lingkungan awal. Metode umum pembalik genital yang paling digunakan adalah perlakuan hormonal melalui pemberian hormon androgen (terutama *17- α -methyltestosterone*) untuk menghasilkan populasi jantan, atau estrogen (*17- β -estradiol*) untuk menghasilkan populasi betina. Dosis, timing, durasi, dan rute pemberian hormon harus optimal karena terlalu dosis atau timing yang tidak tepat dapat menyebabkan hasil yang tidak konsisten atau kelainan fisik pada ikan (Zhou & Chen, 2016). Penelitian pada ikan seabream merah menunjukkan bahwa penggunaan *17-methyltestosterone* pada konsentrasi 50 mg/kg pakan selama 30-60 hari pada periode pemeliharaan spesifik dapat menghasilkan populasi *all-male* dengan persentase >85% (Kato, 2023). Metode alternatif seperti manipulasi fotoperiode, suhu, atau kepadatan *stocking* juga dapat mempengaruhi diferensiasi jenis kelamin pada spesies tertentu (Zhou & Chen, 2016).

3.5.3 Produksi Populasi Monosex Jantan dan Betina

Produksi populasi monosex (semua jantan atau semua betina) memiliki aplikasi komersial penting karena banyak spesies ikan menunjukkan dimorfisme seksual dengan salah satu jenis kelamin memiliki pertumbuhan lebih cepat, ukuran lebih besar, atau

kualitas daging lebih baik. Produksi semua populasi rata-rata jantan menghasilkan pertumbuhan lebih cepat dan seragam dibandingkan populasi normal karena berkurangnya alokasi energi untuk pematangan reproduksi pada betina, dengan peningkatan pertumbuhan rata-rata 10-30% tergantung spesies (Mei & Gui, 2015). Produksi semua populasi betina juga penting pada beberapa spesies dimana betina tumbuh lebih besar atau memiliki kualitas daging yang unggul. Metode produksi monosex mencakup kombinasi antara pembalik kelamin dengan seleksi, penyilangan terplaning antara ikan dengan latar belakang genetik berbeda yang menghasilkan keturunan dengan bias jenis kelamin, atau penggunaan individu yang mengalami *sex-reversed* sebagai induk untuk persilangan tertentu (Mei & Gui, 2015). Stabilitas jenis kelamin pada generasi berikutnya perlu dilakukan melalui observasi berkepanjangan dan pengujian genetik untuk memastikan tidak terjadinya pengembalian rasio jenis kelamin ke normal.

3.5.4 Aplikasi Komersial Monosex dalam Budidaya

Aplikasi komersial budidaya monosex telah memberikan dampak signifikan pada produktivitas dan efisiensi industri akuakultur dengan peningkatan output dan penurunan rasio konversi pakan. Penggunaan benih monosex jantan pada budidaya ikan nila telah meningkatkan kinerja pertumbuhan hingga 25% dan menurunkan rasio konversi pakan dari 1.8 menjadi 1.5 atau lebih rendah (Mei & Gui, 2015). Aplikasi monosex juga mengurangi masalah rekrutmen yang tidak terkontrol pada spesies dengan pematangan reproduksi yang dini, menjaga kualitas air, dan

meningkatkan ukuran panen yang seragam. Infrastruktur produksi monosex memerlukan investasi awal yang lebih tinggi, khususnya untuk fasilitas manajemen hormonal dan pemantauan yang ketat, namun laba atas investasi biasanya dicapai dalam 1-2 tahun pengoperasian melalui peningkatan pendapatan dan efisiensi produksi. Kekhawatiran keberlanjutan terhadap penggunaan hormon sintetik telah mendorong pengembangan metode alternatif seperti pembiakan selektif untuk sifat-sifat tertaut seks dan seleksi genom untuk mengidentifikasi ikan dengan kecenderungan tinggi untuk berkembang menjadi kelamin tertentu tanpa perlakuan hormonal eksternal (Mei & Gui, 2015).

Bab 4: Sistem Budidaya

Pintar: Intensifikasi

Berkelanjutan

Ita Apriani, S.Pi., M.Si.

4.1 Budidaya Presisi dan Kecerdasan Buatan

4.1.1 Konsep Budidaya Presisi dalam Akuakultur

Budidaya presisi merupakan pendekatan inovatif yang mengintegrasikan teknologi cerdas untuk mengoptimalkan setiap aspek produksi akuakultur (Kao & Chen, 2024). Konsep ini fokus pada penggunaan data *real-time* dan analitik prediktif untuk membuat keputusan manajemen yang lebih akurat dan efisien. Dalam konteks akuakultur modern, budidaya melibatkan pemantauan presisi terus menerus terhadap parameter lingkungan seperti kualitas udara, perilaku ikan, dan asupan pakan dengan menggunakan sensor canggih dan sistem otomasi. Pendekatan ini memungkinkan petani untuk mengidentifikasi masalah secara dini, mengoptimalkan penggunaan sumber daya, dan meningkatkan hasil produksi secara signifikan. Teknologi *Internet of Things* (IoT) menjadi tulang punggung implementasi budidaya secara presisi, memungkinkan pengumpulan data masif dari berbagai titik dalam

sistem budidaya dan transmisi data tersebut ke pusat analisis untuk memproses lebih lanjut (Liu et al., 2025).

4.1.2 Aplikasi Kecerdasan Buatan dalam Manajemen Budidaya

Aplikasi kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) dalam akuakultur telah membuka peluang baru untuk meningkatkan efisiensi produksi dan pembuangan lingkungan. Pembelajaran mesin algoritma dapat dilatih untuk menganalisis pola kompleks dalam data budidaya, memprediksi hasil produksi, mengidentifikasi penyakit, dan mengoptimalkan jadwal pemberian pakan (Singhal et al., 2023). Sistem berbasis AI dapat memproses jutaan titik data dari sensor untuk memberikan rekomendasi *real-time* kepada petani tentang kapan dan berapa banyak pakan yang harus diberikan, kondisi lingkungan optimal untuk spesies yang dibudidayakan, dan tanda-tanda awal penyakit atau stres pada ikan. Implementasi AI juga memungkinkan otomatisasi penuh dari sistem budidaya, mengurangi kebutuhan akan tenaga kerja manual dan meningkatkan konsistensi manajemen budidaya.

4.1.3 Sistem identifikasi Otomatis Berbasis Visi Komputer

Teknologi visi komputer dan *deep learning* telah menghasilkan sistem identifikasi otomatis yang dapat mengenali individu ikan, mendeteksi morfologi, dan mengklasifikasi kesehatan dengan akurasi tinggi (Kao & Chen, 2024). Sistem ini menggunakan jaringan saraf konvolusi untuk menganalisis gambar ikan secara *real-time* dan memberikan informasi tentang ukuran, kondisi fisik, dan tanda-tanda penyakit. Teknologi seleksi jenis kelamin yang berbasis AI telah terbukti mengurangi kebutuhan akan pengalaman

manual dan meningkatkan akurasi hingga 95 persen dalam identifikasi karakteristik seksual sekunder pada ikan. Sistem ini tidak hanya meningkatkan efisiensi program peternakan tetapi juga mengurangi stres pada ikan dan meningkatkan kesejahteraan hewan.

4.1.4 Prediksi dan Pencegahan Penyakit Menggunakan Data Analytics

Data analitik prediktif memungkinkan petani untuk mengantisipasi wabah penyakit sebelum terjadi, berdasarkan analisis pola historis faktor-faktor lingkungan yang berkontribusi terhadap penyebaran penyakit (Liu et al., 2025). Model prediktif dapat mengidentifikasi kombinasi faktor risiko yang meningkatkan kemungkinan penyakit, seperti kualitas udara yang menurun, kepadatan stocking yang tinggi, atau perubahan suhu yang drastis. Dengan mengenalkan dini ini, petani dapat mengambil tindakan preventif seperti penyesuaian parameter lingkungan, pemberian suplemen nutrisi, atau penggunaan probiotik sebelum penyakit benar-benar muncul. Pendekatan proaktif ini secara signifikan mengurangi mortalitas ikan, meningkatkan rasio konversi pakan, dan mengurangi penggunaan antibiotik, dengan demikian mendukung keberlanjutan dalam akuakultur.

4.2 Kolam, Keramba, dan Sistem Jaring Apung

4.2.1 Pemilihan Lokasi dan Desain Kolam Intensif

Kolam intensif merupakan sistem budidaya tradisional yang terus dikembangkan dengan peningkatan teknologi dan manajemen

yang lebih baik. Pemilihan lokasi kolam sangat penting untuk keberhasilan budidaya, dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti ketersediaan kualitas udara, topografi lahan, akses pasar, dan kondisi sosial ekonomi masyarakat setempat (Rodrguez-Hernndez et al., 2025). Desain kolam modern harus mengintegrasikan sistem drainase yang efisien, kontrol kualitas udara yang lebih baik, dan kemudahan akses untuk kegiatan pemeliharaan. Kolam intensif dengan tebar tinggi yang padat memerlukan sistem aerasi yang kuat untuk memastikan ketersediaan oksigen terlarut yang optimal, mencegah akumulasi limbah organik, dan menjaga stabilitas parameter lingkungan lainnya.

4.2.2 Pengelolaan Kualitas Air dalam Sistem Kolam

Manajemen kualitas air merupakan faktor penting dalam keberhasilan budidaya kolam intensif. Parameter penting yang perlu dipantau secara kontinyu meliputi oksigen terlarut, total amonia, nitrit, nitrat, pH, alkalinitas, dan salinitas (Rodrguez-Hernndez et al., 2025). Dalam sistem kolam dengan kepadatan tinggi, akumulasi limbah organik dari pakan yang tidak dikonsumsi dan kotoran ikan dapat dengan cepat menurunkan kualitas udara. Penerapan sistem filtrasi mekanis dan biologi, serta penggunaan teknologi aerasi yang efisien, dapat membantu menjaga keseimbangan kimia udara. Pemantauan secara *real-time* menggunakan sensor dan sistem IoT memungkinkan deteksi dini perubahan parameter kualitas udara sehingga tindakan korektif dapat segera dilakukan.

4.2.3 Keramba dan Sistem Jaring Apung di Perairan Terbuka

Keramba dan jaring apung merupakan sistem budidaya yang memanfaatkan perairan alami seperti danau, waduk, atau laut untuk pemeliharaan ikan (Rodrguez-Hernndez et al., 2025). Keunggulan sistem ini adalah memanfaatkan aliran udara alami untuk pengayaan oksigen dan pengenceran limbah organik, serta biaya konstruksi yang lebih rendah dibandingkan kolam. Namun, sistem ini lebih rentan terhadap faktor eksternal seperti arus yang tidak konsisten, perubahan salinitas, dan serangan predator atau penyakit dari populasi ikan pembohong. Desain keramba harus mempertimbangkan daya tahan terhadap gelombang dan arus, kemudahan akses untuk pemberian pakan dan pemanenan, serta penempatan yang tidak mengganggu ekosistem perairan sekitarnya.

4.2.4 Manajemen Padat Tebar dan Daya Dukung

Tebar yang optimal adalah faktor kunci dalam memaksimalkan produktivitas sambil menjaga kualitas lingkungan dan kesehatan ikan. Daya dukung perairan atau kolam menentukan jumlah maksimum ikan yang dapat dibudidayakan dengan tetap mempertahankan parameter kualitas udara dalam kisaran optimal (Rodrguez-Hernndez et al., 2025). Penelitian menunjukkan bahwa tebar padat yang terlalu tinggi dapat menyebabkan peningkatan mortalitas, penurunan rasio konversi pakan, dan meningkatkan risiko penyakit. Sebaliknya, tebar padat yang terlalu rendah menghasilkan kurang dimanfaatkannya ruang dan sumber daya. Pengelolaan lahan yang ketat baik mempertimbangkan spesies

ikan, ukuran individu, kualitas pakan, sistem aerasi, dan kemampuan pemeliharaan petani.

4.3 Sistem Resirkulasi dan Budidaya Tanpa Limbah

4.3.1 Prinsip Dasar Sistem Budidaya Perikanan Resirkulasi (RAS)

Sistem resirkulasi akuakultur (*Recirculatory Aquaculture System* atau RAS) merupakan teknologi budidaya yang paling maju dalam hal pengendalian lingkungan dan efisiensi sumber daya. RAS berdasarkan pada prinsip siklus tertutup dimana udara yang telah digunakan untuk budidaya diproses melalui serangkaian filter untuk menghilangkan padatan tersuspensi, mengubah limbah nitrogen menjadi bentuk yang kurang toksik melalui nitrifikasi biologi, dan kemudian diedarkan kembali ke tangki budidaya (Lal et al., 2024). Sistem ini memungkinkan pengurangan penggunaan udara hingga 99 persen dibandingkan dengan sistem budidaya konvensional, yang menjadikannya sangat relevan dalam konteks kelangkaan air global. RAS juga mengurangi risiko penularan penyakit dari populasi pembongkang, meminimalkan kontaminasi lingkungan, dan memungkinkan kontrol lingkungan yang presisi untuk mengoptimalkan pertumbuhan ikan.

4.3.2 Komponen Utama dan Fungsinya dalam RAS

RAS terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara sinergis untuk mempertahankan kualitas udara optimal.

Tangki produksi (*production tank*) merupakan wadah utama tempat ikan dibudidayakan dengan padat tebar tinggi dan sistem aerasi yang kuat (Lal et al., 2024). Filter mekanis (*mechanical filter*) seperti drum filter atau tereteran berperan dalam menghilangkan padatan tersuspensi berukuran relatif besar dari air buangan kolam. Filter biologi (*biofilter*) berbasis pada media pembawa (*media pembawa*) atau reaktor biofilm memelihara komunitas bakteri nitrifikasi yang mengubah amonia dan nitrit yang bersifat toksik menjadi nitrat yang relatif aman. Sistem degassing membantu menghilangkan karbon dioksida yang terakumulasi dari respirasi ikan dan aktivitas bakteri. Heater atau sistem pendingin (*chiller*) menjaga suhu udara dalam kisaran optimal untuk spesies yang dibudidayakan.

4.3.3 Mengatasi Akumulasi Limbah Nitrogen melalui Nitrifikasi Biologis

Nitrifikasi biologi merupakan proses penting dalam RAS yang mengubah amonia, produk sampingan metabolisme protein ikan, menjadi nitrat yang kurang beracun. Proses ini melibatkan dua kelompok bakteri autotrof: bakteri *Nitrosomonas* yang mengoksidasi amonia menjadi nitrit, dan bakteri *Nitrobacter* yang selanjutnya mengoksidasi nitrit menjadi nitrat (Lal et al., 2024). Efisiensi nitrifikasi sangat dipengaruhi oleh kesehatan biofilm, ketersediaan substrat, dan kondisi lingkungan seperti pH dan suhu. Dalam sistem yang dikelola dengan baik, tingkat konversi amonia dapat mencapai efisiensi lebih dari 99 persen. Pemantauan konsentrasi amonia total (*Total Ammonia Nitrogen* atau TAN) dan

nitrit merupakan aspek penting dalam operasional RAS untuk memastikan kualitas udara tetap dalam kisaran aman bagi ikan.

4.3.4 Strategi Pengeluaran Limbah dan Daur Ulang Nutrisi

Meskipun RAS merupakan sistem budidaya yang sangat efisien dalam hal penggunaan udara, akumulasi nitrat dan padatan terlarut lainnya masih memerlukan penanganannya. Beberapa strategi yang digunakan untuk mengatasi masalah ini, termasuk penempatan udara parsial secara berkala, dentrifikasi biologis untuk mengubah nitrat menjadi gas nitrogen, dan integrasi dengan sistem akuaponik untuk memanfaatkan nutrisi yang mengalir dalam budidaya udara bagi pertumbuhan tanaman (Lal et al., 2024). Strategi pengeluaran limbah yang inovatif juga meliputi penggunaan tanaman *halophyte* dalam sistem RAS kelautan dan integrasi dengan sistem bioflok untuk meningkatkan nilai nutrisi limbah yang dihasilkan. Pendekatan holistik terhadap manajemen limbah ini mendukung prinsip ekonomi sirkular dalam akuakultur berkelanjutan.

4.4 Integrasi Bioflok-Akuaponik dan Multi-Trofik

4.4.1 Prinsip Teknologi Bioflok dan Integrasi dengan Sistem Lain

Teknologi bioflok (*Biofloc Technology* atau BFT) berdasarkan prinsip manipulasi rasio karbon-nitrogen (*carbon-to-nitrogen ratio* atau C:N) dalam sistem budidaya untuk mendorong

pertumbuhan bakteri heterotrofik yang membentuk bioflok (Li et al., 2025). Bioflok merupakan agregat mikroba yang terdiri dari bakteri heterotrofik, alga, protozoa, dan partikel organik terurai yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber pakan alami bagi ikan, sehingga mengurangi kebutuhan pakan komersial. Integrasi BFT dengan teknologi lain seperti akuaponik, film biologi (*biofilm*), sistem akuakultur multi-trofik terintegrasi (*Integrated Multi-Trophic Aquaculture* atau IMTA), dan RAS menciptakan sistem komposit yang mengatasi keterbatasan teknis dari masing-masing sistem individu (Li et al., 2025).

4.4.2 Sistem Akuaponik Terintegrasi dengan Bioflok

Akuaponik merupakan integrasi antara akuakultur dan hidroponik yang memanfaatkan limbah dari budidaya ikan sebagai sumber nutrisi untuk pertumbuhan tanaman, sementara tanaman membantu penyaringan dan penyaluran udara kembali untuk ikan (Hwang et al., 2025). Ketika akuaponik diintegrasikan dengan bioflok, terjadi sinergi yang berperan memperkuat masing-masing komponen sistem. Bioflok dalam akuaponik-BFT memberikan nutrisi tambahan yang tersuspensi dalam udara, meningkatkan bioavailabilitas nutrisi bagi tanaman, dan meningkatkan produktivitas kedua komponen produksi (ikan dan tanaman) secara bersamaan (Hwang et al., 2025). Penelitian menunjukkan bahwa integrasi ini dapat meningkatkan tingkat pertumbuhan ikan hingga 20-30 persen dan biomassa tanaman hingga 15-25 persen dibandingkan dengan sistem akuaponik konvensional tanpa bioflok.

4.4.3 Akuakultur Multi-Trofik Terintegrasi (IMTA)

Sistem akuakultur multi-trofik terintegrasi (IMTA) memperluas konsep akuaponik dengan mengintegrasikan spesies ikan herbivora, omnivora, dan predator dalam satu sistem produksi terintegrasi (Li et al., 2025). IMTA memanfaatkan hubungan trofik alami di mana limbah yang dihasilkan oleh spesies di tingkat trofik atas dapat dimanfaatkan oleh spesies di tingkat trofik yang lebih rendah. Misalnya, limbah organik dari budidaya ikan karnivora dapat dipanen sebagai pupuk untuk alga atau dimanfaatkan oleh filter feeder seperti kerang atau teripang. Model IMTA yang dirancang dengan baik dapat mencapai tingkat efisiensi nutrisi yang sangat tinggi, dengan 80-90 persen limbah yang dihasilkan oleh satu spesies dapat dimanfaatkan atau dikurangi oleh komponen lain dalam sistem.

4.4.4 Manajemen Komunitas Mikroba dan Keseimbangan Sistem

Kesuksesan sistem terintegrasi seperti bioflok-akuaponik dan IMTA sangat bergantung pada manajemen yang tepat terhadap komunitas mikrobial dalam sistem. Komunitas mikroba yang sehat dan beragam mendukung nitrifikasi yang efisien, produksi bioflok yang optimal, stabilitas kualitas udara, dan kesehatan ikan (Li et al., 2025). Faktor-faktor yang mempengaruhi komunitas mikroba meliputi rasio C:N, suhu, pH, konsentrasi oksigen terlarut, dan keberadaan probiotik atau inokulan mikroba. Pemantauan komunitas mikroba dapat dilakukan melalui analisis metagenomik yang mengidentifikasi komposisi dan keanekaragaman bakteri dalam

sistem. Manajemen proaktif komunitas mikroba melalui optimalisasi kondisi lingkungan dan inokulasi probiotik yang tepat memastikan stabilitas jangka panjang dan produktivitas sistem.

4.5 Budidaya Vertikal dalam Ruangan dan Pertanian Kota

4.5.1 Konsep Budidaya Vertikal dan Teknologi Lingkungan Terkendali Pertanian

Budidaya vertikal (*vertical farming*) merupakan sistem pertanian inovatif yang menumbuhkan tanaman atau ikan dalam struktur berlapis secara vertikal, mengoptimalkan penggunaan ruang horizontal yang terbatas di perkotaan (Mohapatra et al., 2023). Sistem ini mengintegrasikan teknologi *Controlled Environment Agriculture* (CEA) yang meliputi pencahayaan buatan menggunakan LED (*light-emitting diode*), kontrol suhu, kelembaban, dan konsentrasi CO₂ untuk menciptakan kondisi lingkungan optimal bagi pertumbuhan tanaman dan ikan (Widowati et al., 2025). Budidaya vertikal dalam ruangan memungkinkan produksi pangan sepanjang tahun tanpa tergantung pada musim, dapat ditempatkan di tengah kota dekat dengan konsumen, mengurangi biaya transportasi, dan meminimalkan penggunaan pestisida karena lingkungan terkontrol mengurangi risiko serangan hama dan penyakit.

4.5.2 Sistem Hidroponik dan Akuaponik dalam Pertanian Vertikal

Sistem hidroponik, di mana tanaman ditanam tanpa media tanah dengan nutrisi yang diberikan melalui larutan udara, menjadi teknologi pilihan dalam budidaya vertikal modern (Mohapatra et al., 2023). Teknik-teknik hidroponik seperti *Deep Water Culture* (DWC), *Nutrient Film Technique* (NFT), dan *Drip Irrigation System* dapat dikombinasikan dengan struktur vertikal untuk memaksimalkan produktivitas per satuan luas. Akuaponik vertikal menggabungkan budidaya ikan dengan pertumbuhan tanaman dalam susunan vertikal, menciptakan sistem yang lebih efisien dalam penggunaan udara dan nutrisi (Widowati et al., 2025). Integrasi teknologi IoT dan AI dalam budidaya vertikal memungkinkan pemantauan *real-time* terhadap semua parameter lingkungan, penyesuaian sistem otomatis untuk kondisi optimal, dan prediksi hasil panen dengan akurasi tinggi.

4.5.3 Integrasi Teknologi IoT dan Otomasi dalam Budidaya Indoor

Implementasi teknologi *Internet of Things* dalam budidaya vertikal memungkinkan pengumpulan data masif dari berbagai sensor yang menggabungkan parameter lingkungan seperti suhu, kelembaban, konsentrasi CO₂, nilai pH, dan intensitas cahaya (Widowati et al., 2025). Data-data ini ditransmisikan ke sistem pusat untuk analisis dan pengambilan keputusan otomatis yang mengontrol sistem pencahayaan, irigasi, pemanasan/pendinginan, dan ventilasi. Sistem otomasi ini mengurangi kebutuhan tenaga kerja

manual dan meningkatkan konsistensi manajemen, sehingga hasil produksi menjadi lebih dapat diprediksi dan stabil. *Dashboard monitoring* berbasis web memungkinkan petani untuk memantau kondisi pertanian dari mana saja, menerima peringatan otomatis jika parameter melampaui batas optimal, dan melakukan penyesuaian sistem secara jarak jauh.

4.5.4 Keberlanjutan Ekonomi dan Lingkungan Budidaya Vertikal

Keberlanjutan ekonomi budidaya vertikal masih menjadi tantangan utama mengingat tingginya biaya investasi awal dan biaya operasional terutama untuk energi pencahayaan dan pengendalian iklim (Mohapatra et al., 2023). Namun, keuntungan-keuntungan jangka panjang ekonomi meliputi produktivitas lahan yang hingga 20 kali lebih tinggi dibandingkan pertanian konvensional, pengurangan penggunaan udara hingga 95 persen, tidak adanya kebutuhan akan pestisida, dan nilai tambah produk yang lebih tinggi karena kesegaran dan kualitas yang unggul. Keberlanjutan lingkungan meningkat melalui penggunaan energi terbarukan untuk mendukung sistem budidaya vertikal, integrasi dengan sistem daur ulang udara dan nutrisi, dan kontribusi dalam mengurangi jarak tempuh pangan (*food miles*) dan jejak karbon terkait transportasi. Untuk meningkatkan kelayakan ekonomi, diperlukan inovasi dalam teknologi pencahayaan LED yang lebih efisien, optimalisasi sistem desain untuk mengurangi biaya konstruksi, dan pendampingan bisnis untuk meningkatkan penerapan teknologi di kalangan petani kecil dan menengah.

Bab 5: Budidaya Air Tawar:

Optimalisasi Produksi

Ita Apriani, S.Pi., M.Si.

5.1 Spesies Unggulan Ekonomi Tinggi

Budidaya air tawar di Indonesia telah berkembang pesat sebagai sektor pertanian yang strategis untuk meningkatkan ketahanan pangan dan pendapatan petani. Spesies ikan air tawar unggulan dengan nilai ekonomi tinggi menjadi fokus utama pengembangan budidaya perikanan modern di seluruh wilayah. Pemilihan spesies yang tepat sangat menentukan keberhasilan usaha budidaya dalam mencapai produktivitas dan profitabilitas maksimal.

5.1.1 Ikan Patin dan Lele sebagai Spesies Prioritas

Ikan patin (*Pangasianodon hypophthalmus*) merupakan salah satu spesies unggulan yang telah terbukti menguntungkan secara ekonomis bagi petani akuakultur di Indonesia. Spesies ini memiliki pertumbuhan yang cepat dengan tingkat konversi pakan yang efisien, memungkinkan produktivitas tinggi dalam waktu singkat. Penelitian terhadap ekonomi dan kinerja produksi ikan patin menunjukkan bahwa dengan manajemen yang tepat, hasil panen dapat mencapai keuntungan bersih yang signifikan dengan sistem budidaya intensif (Sharif et al., 2026). Ikan lele (*Clarias batrachus*) juga menunjukkan potensi yang sama besar sebagai komoditas

unggulan karena kemampuannya beradaptasi terhadap kondisi lingkungan yang beragam dan ketahanan terhadap penyakit.

5.1.2 Ikan Mas dan Kepala Timah untuk Pasar Lokal

Ikan mas (*Cyprinus carpio*) tetap menjadi spesies utama dalam budidaya air tawar Indonesia dengan permintaan pasar yang konsisten. Spesies ini sangat cocok untuk sistem budidaya tradisional maupun modern dengan berbagai skala usaha. Kepala timah (*Hypophthalmichthys molitrix*) dan ikan carp lainnya merupakan komponen penting dalam sistem polikultur karena dapat memanfaatkan berbagai jenis makanan alami di kolam. Kombinasi spesies ini dalam sistem kolam terpadu telah menunjukkan hasil yang menguntungkan dengan peningkatan produksi secara keseluruhan dibandingkan monokultur.

5.1.3 Teknik Pemijahan Buatan dan Produksi Benih

Pengembangan teknologi pemijahan buatan menjadi kunci dalam meningkatkan ketersediaan benih berkualitas tinggi untuk komoditas unggulan. Teknik induksi pemijahan menggunakan hormon seperti *Ovaprim* dan *Ovatide* telah terbukti efektif dalam meningkatkan tingkat pembuahan dan penetasan pada ikan-ikan penting secara komersial (Ganesh et al., 2026). Manajemen induk yang baik, meliputi pemberian pakan bernutrisi seimbang dan pemeliharaan kondisi lingkungan yang optimal, sangat penting untuk menghasilkan induk-induk yang berkualitas tinggi dengan kapasitas reproduksi maksimal.

5.1.4 Manajemen Benih dan Fase Pertumbuhan Awal

Fase pemeliharaan benih dan ikan juvenil sangat menentukan tingkat kelulusan hidup dan pertumbuhan selanjutnya. Pemberian pakan dengan formulasi khusus yang kaya asam amino esensial dan protein tinggi selama fase awal pertumbuhan mendukung perkembangan optimal. Sistem intensifikasi budidaya benih dengan teknologi perifiton dan sistem resirkulasi telah meningkatkan tingkat kelangsungan hidup hingga 85-90% dengan pertumbuhan yang seragam dan cepat.

5.2 Ikan Lokal dan Industri Ikan Hias

Pengembangan ikan lokal dan industri ikan hias menjadi tren penting dalam diversifikasi produk akuakultur Indonesia. Ikan-ikan spesies asli menawarkan keunggulan adaptasi terhadap lingkungan lokal dan preferensi pasar yang unik, baik untuk konsumsi maupun akuarium.

5.2.1 Ikan Lokal Indonesia dan Konservasi Keragaman Hayati

Indonesia memiliki kekayaan spesies ikan air tawar lokal yang belum dimanfaatkan secara optimal dalam budidaya komersial. Spesies seperti ikan betutu (*Osteochilus hasselti*) dan ikan tambakan (*Helostoma temminckii*) menunjukkan potensi tinggi untuk pengembangan budidaya berkelanjutan. Upaya domestikasi spesies lokal menjadi penting tidak hanya untuk meningkatkan produksi pangan, tetapi juga untuk menjaga kelestarian keanekaragaman hayati akuatik Indonesia (Ogunji et al., 2024). Berbagai penelitian

menunjukkan bahwa ikan lokal memiliki toleransi yang tinggi terhadap parameter lingkungan dan lebih tahan terhadap penyakit dibandingkan spesies eksotis.

5.2.2 Akuarium Ikan Hias sebagai Komoditas Bernilai Tinggi

Industri ikan hias akuarium mengalami pertumbuhan pesat dengan nilai ekonomi yang sangat menguntungkan dibandingkan budidaya ikan konsumsi. Ikan hias lokal seperti arwana, maskoki, dan ikan cupang memiliki harga jual yang sangat tinggi di pasar ekspor. Teknologi pemeliharaan ikan hias memerlukan standar kualitas udara yang lebih ketat dengan sistem filtrasi dan aerasi yang canggih. Pemilihan saluran distribusi yang tepat, baik melalui ekspor langsung maupun melalui pasar domestik, sangat mempengaruhi keuntungan yang diperoleh petani pembudidaya ikan hias.

5.2.3 Praktik Budidaya Ikan Lokal Berkelanjutan

Sistem budidaya ikan lokal di kolam-kolam semen atau kolam tanah telah dikembangkan dengan menerapkan prinsip-prinsip akuakultur berkelanjutan. Penggunaan pakan alami dan pakan buatan dengan formulasi yang disesuaikan dengan kebutuhan nutrisi spesies tertentu menjadi kunci kemiskinan ekonomi. Manajemen udara kolam dengan teknologi biofilter dan sistem pengalihan udara sebagian membantu mempertahankan kualitas udara optimal untuk pertumbuhan ikan (Lili et al., 2022). Program pelatihan kepada petani tentang teknik budidaya modern dan manajemen penyakit sangat diperlukan untuk meningkatkan penerapan teknologi.

5.2.4 Pemasaran dan Nilai Tambah Produk Ikan Lokal

Strategi pemasaran ikan lokal dapat dikembangkan melalui pendekatan branding dan sertifikasi kualitas yang menunjukkan keunggulan produk lokal. Pengembangan produk olahan ikan hias seperti *frozen fillet*, ikan asin kering, dan produk lainnya menambah nilai jual dan memperluas target pasar. Kolaborasi dengan industri pariwisata dan restoran khusus dapat meningkatkan permintaan terhadap ikan lokal berkualitas premium, menciptakan peluang usaha yang lebih menguntungkan bagi pengusaha skala kecil dan menengah.

5.3 Desain Polikultur dan Kompatibilitas Spesies

Sistem polikultur merupakan pendekatan inovatif dalam akuakultur yang menggabungkan beberapa spesies dalam satu kolam dengan memanfaatkan komplementaritas ekologis antar spesies. Desain sistem polikultur yang baik dapat meningkatkan produktivitas dan efisiensi penggunaan sumber daya secara signifikan.

5.3.1 Prinsip Dasar Polikultur dan Komplementaritas Spesies

Polikultur adalah praktik memelihara lebih dari satu spesies ikan dalam satu kolam dengan memanfaatkan habitat dan makanan yang berbeda. Kombinasi ideal dalam polikultur air tawar biasanya melibatkan ikan yang menempati zona kolam berbeda dan memiliki preferensi makanan yang komplementer (Munir & Chowdhury,

2025). Misalnya, kombinasi ikan mas (*Cyprinus carpio*), tawes (*Puntius javanicus*), dan karper (*Cyprinus carpio*) dalam rasio tertentu telah terbukti meningkatkan total produksi hingga 40-56% dibandingkan monokultur. Studi tentang desain polikultur menunjukkan bahwa keberhasilan sistem sangat bergantung pada pemilihan spesies yang tepat, kepadatan penebaran yang optimal, dan manajemen pakan yang baik.

5.3.2 Kombinasi Spesies dan Parameter Optimal

Penentuan rasio dan kepadatan penebaran yang optimal untuk setiap kombinasi spesies memerlukan penelitian mendalam tentang kinerja biologi dan ekologi masing-masing spesies. Penelitian mendokumentasikan bahwa kombinasi ikan mas, tawes, dan karper kepala dalam rasio 40:20:30:10 memberikan hasil produksi yang optimal dengan tingkat kelangsungan hidup yang tinggi (Ganesh et al., 2026). Parameter lingkungan seperti pH, kadar oksigen terlarut, dan beban organik kolam harus dipantau secara teratur untuk memastikan kondisi optimal bagi semua spesies yang dibudidayakan. Teknologi aerasi dan sistem sirkulasi udara membantu menjaga kualitas lingkungan yang sesuai untuk polikultur.

5.3.3 Manajemen Pakan dan Nutrisi dalam Sistem Polikultur

Manajemen pakan dalam polikultur berbeda dengan monokultur karena setiap spesies memiliki kebutuhan nutrisi dan preferensi makanan yang unik. Dalam polikultur, pakan tambahan biasanya diberikan kepada spesies yang dominan dan memiliki laju pertumbuhan cepat, sementara spesies lain memanfaatkan pakan

alami kolam (Ganesh et al., 2025). Pemberian pakan buatan dengan formulasi seimbang yang menyesuaikan kebutuhan protein dan energi berbagai spesies sangat penting untuk efisiensi penggunaan pakan dan pertumbuhan optimal. Teknologi perifiton, yang melibatkan pemasangan substrat untuk pertumbuhan mikroorganisme yang menjadi pakan alami, telah meningkatkan rasio konversi pakan hingga 13% lebih baik dibandingkan sistem konvensional.

5.3.4 Pemantauan dan Pengelolaan Kesehatan dalam Polikultur

Sistem polikultur memerlukan pemantauan kualitas udara yang lebih intensif karena kehadiran beberapa spesies mengakibatkan beban organik yang lebih tinggi. Penyakit dan parasit yang menyerang satu spesies dapat menyebar dengan cepat ke spesies lain jika tidak dikelola dengan baik. Penerapan protokol biosekuriti yang ketat, termasuk isolasi benih baru dan pengujian rutin terhadap patogen, sangat penting untuk menjaga kesehatan pokok populasi ikan dalam sistem polikultur.

5.4 Integrasi Padi-Ikan dan Pertanian Terpadu

Sistem integrasi padi-ikan merupakan pendekatan pertanian berkelanjutan yang menggabungkan budidaya padi dengan budidaya ikan dalam satu kawasan yang sama, menciptakan sinergi produktif dan ekonomis.

5.4.1 Konsep dan Keuntungan Sistem Padi-Ikan

Sistem integrasi padi-ikan (*mina padi*) merupakan praktik pertanian kuno yang kini dikembangkan dengan teknologi modern untuk meningkatkan produktivitas dan keinginan. Ikan yang dipelihara di sawah selama masa tanam padi tidak hanya menghasilkan protein tambahan tetapi juga memberikan manfaat ekologis penting seperti pengendalian hama alami, aerasi tanah, dan pemupukan organik (Kumar, 2025). Data menunjukkan bahwa sistem padi-ikan dapat meningkatkan hasil padi sebesar 8-25% dibandingkan padi monokultur, sekaligus menghasilkan ikan dengan produktivitas 500-1000 kg/ha per tahun. Keuntungan ekonomi dari sistem ini sangat signifikan dengan rasio manfaat-biaya mencapai 2,31-2,36 untuk model terpadu yang mencakup hortikultura.

5.4.2 Teknik Penerapan dan Manajemen Sistem Padi-Ikan

Implementasi sistem padi-ikan memerlukan desain infrastruktur khusus termasuk pembuatan parit dan kolam-kolam kecil di sekitar petakan padi. Spesies ikan yang digunakan biasanya adalah ikan yang toleran terhadap kondisi udara dangkal dan berlumpur, seperti ikan mas, ikan mas kepala, atau ikan nila (Fernandez-Zatrata et al., 2025). Penebaran ikan dilakukan sekitar 20-30 hari setelah tanam padi untuk menghindari kerusakan bibit tanaman. Kepadatan penebaran yang optimal berada pada kisaran 1000-2000 ekor/ha tergantung spesies dan kondisi lokal. Manajemen udara harus mempertahankan ketinggian udara yang sesuai untuk pertumbuhan padi sambil tetap memberikan lingkungan yang optimal untuk ikan.

5.4.3 Nutrisi dan Produktivitas Padi dalam Sistem Terintegrasi

Ekskresi ikan dan sisa pakan yang mengendap di dasar kolam dan petakan padi menjadi pupuk organik alami yang kaya nitrogen dan fosfor. Penelitian menunjukkan bahwa sistem padi-ikan dapat mengurangi kebutuhan pupuk kimia hingga 25% sambil tetap mempertahankan atau bahkan meningkatkan hasil panen (Rautaray et al., 2025). Proses mineralisasi bahan organik dari ikan memberikan nutrisi tersedia untuk tanaman padi sepanjang musim tanam. Penerapan teknologi azolla atau tanaman lain yang dapat menambat nitrogen memperkuat efek pemupukan alami dalam sistem terintegrasi.

5.4.4 Dampak Lingkungan dan Keberlanjutan Jangka Panjang

Sistem padi-ikan telah terbukti memberikan dampak positif terhadap kelestarian lingkungan dengan mengurangi penggunaan pestisida dan pupuk kimia sintetis. Berkurangnya input kimia berarti mengurangi polusi udara dan tanah, sekaligus menjaga kualitas keanekaragaman hayati di agroekosistem sawah. Penelitian jangka panjang tentang kerinduan sistem padi-ikan menunjukkan bahwa praktik ini dapat mempertahankan atau bahkan meningkatkan kesehatan tanah dalam jangka panjang melalui akumulasi bahan organik dan peningkatan aktivitas mikroorganisme tanah (Sathoria & Roy, 2022). Adopsi luas sistem padi-ikan di Asia Tenggara telah menunjukkan kontribusi nyata terhadap pencapaian target Tujuan Pembangunan Berkelanjutan khususnya dalam hal ketahanan pangan dan kelestarian lingkungan.

5.5 Budidaya Udang Galah dan Lobster Air Tawar

Udang galah (*Macrobrachium rosenbergii*) dan lobster air tawar merupakan komoditas budidaya perikanan bernilai ekonomi tinggi dengan permintaan pasar global yang terus meningkat. Pengembangan teknologi budidaya spesies-spesies ini membuka peluang bisnis besar bagi petani akuakultur Indonesia.

5.5.1 Biologi dan Karakteristik Udang Galah

Udang galah (*Macrobrachium rosenbergii*) adalah spesies krustasea air tawar yang terbesar dan paling bernilai ekonomis di dunia. Spesies ini memiliki pertumbuhan yang cepat dengan mencapai ukuran konsumsi (20-25 gram) dalam waktu 4-6 bulan dalam sistem budidaya intensif. Keunggulan udang galah dibandingkan spesies budidaya lainnya adalah daya tahan tubuh yang baik, toleransi terhadap suhu lingkungan, dan nilai protein tinggi dalam daging (Rana et al., 2025). Karakteristik karakteristik udang galah yang memungkinkan kelangsungan hidup di lingkungan air tawar murni tanpa memerlukan fase larva air payau membuat budidayanya lebih praktis dibandingkan udang laut.

5.5.2 Teknologi Pemijahan dan Produksi Benih

Pemijahan buatan udang galah memerlukan teknologi khusus yang melibatkan manipulasi hormonal untuk merangsang ovulasi induk betina. Teknik tradisional menggunakan ablasi eyestalk telah menunjukkan efektivitas tetapi menimbulkan pertanyaan etika yang serius dalam kesejahteraan hewan. Penelitian

terbaru telah mengidentifikasi hormon alternatif dan teknologi manipulasi seks yang lebih humanis, termasuk penggunaan faktor insulin-like (*LAG*) untuk kontrol seks pada udang (Iskandar et al., 2025). Teknologi perifiton dan sistem resirkulasi telah meningkatkan efisiensi budidaya larva dengan tingkat izin hidup mencapai 95-99%, jauh lebih tinggi dibandingkan sistem konvensional.

5.5.3 Sistem Budidaya Intensif dan Semi Intensif

Sistem budidaya udang galah dapat dilakukan dengan intensitas berbeda sesuai modal dan target pasar. Sistem tradisional menggunakan kolam tanah dengan produktivitas rendah (100-200 kg/ha) tetapi memerlukan investasi minimal dan pemeliharaan yang mudah. Sistem intensif menggunakan kolam semen atau tangki dengan aerasi dan pengendalian lingkungan yang presisi, menghasilkan produktivitas tinggi 5-40 ton/ha/tahun (Voznyuk & Bekh, 2025). Sistem berbasis perifiton menggunakan substrat khusus untuk pertumbuhan biofilm yang menjadi pakan alami, mengurangi ketergantungan pada pakan buatan sambil mempertahankan kualitas udara yang baik.

5.5.4 Lobster Air Tawar dan Prospek Pengembangannya

Lobster air tawar (*Cherax quadricarinatus*) merupakan spesies krustasea yang menunjukkan potensi tinggi untuk pengembangan budidaya perikanan di Indonesia. Spesies ini memiliki nilai pasar yang sangat tinggi, terutama di pasar ekspor premium, dengan harga mencapai 200-300 ribu rupiah per ekor untuk ukuran konsumsi (Iskandar et al., 2025). Teknologi budidaya

lobster air tawar masih dalam tahap pengembangan dengan banyak tantangan yang perlu diselesaikan, termasuk optimalisasi nutrisi, manajemen sanitasi, dan pengendalian penyakit. Penelitian terhadap komposisi pakan optimal yang menggabungkan bahan lokal dan aditif nutraceutical telah menunjukkan peningkatan laju pematangan gonad dan kualitas telur yang signifikan.

Bab 6: Budidaya Laut:

Ekspansi Ekonomi Biru

Ahmad Shifa Uka, S.Si., M.Si.

6.1 Budidaya Udang Intensif dan Pencegahan Penyakit

6.1.1 Sistem Budidaya Udang Vaname Intensif

Budidaya udang vaname (*Litopenaeus vannamei*) secara intensif telah menjadi tren utama dalam industri akuakultur Indonesia dengan pertumbuhan yang signifikan. Sistem budidaya intensif memungkinkan peningkatan produktivitas melalui manajemen yang terstruktur dan pengendalian lingkungan yang ketat (Putra et al., 2024). Kesuksesan budidaya udang vaname bergantung pada aspek teknis dan finansial yang matang, termasuk pengelolaan biosekuriti, pemilihan bibit unggul, dan pemantauan kualitas air yang rutin (Wiradana et al., 2024). Dalam sistem intensif dengan tebar tinggi yang padat, tingkat kelangsungan hidup udang dapat mencapai 75-85% dengan tingkat konversi pakan antara 1,2-1,8.

Aspek krusial dalam budidaya intensif adalah manajemen kualitas air yang optimal. Pengukuran parameter seperti suhu, pH, oksigen terlarut, dan amoniak harus dilakukan secara berkala untuk

memastikan kondisi perairan tetap mendukung pertumbuhan udang (Iskandar et al., 2025). Dinamika kualitas air pada periode budidaya berlangsung menunjukkan fluktuasi yang signifikan, terutama pada DOC 43-50 (hari ke-43 hingga 50), saat produktivitas primer meningkat drastis.

Pada perkembangan terkini, intensifikasi budidaya udang vaname tidak lagi semata bertumpu pada peningkatan padat tebar, melainkan pada integrasi sensor cerdas dan analitik data. Adopsi teknologi *Artificial Intelligence of Things* (AIoT) di sentra produksi seperti Riau dan Jawa, melalui platform AquaEasy dan ESG, telah menunjukkan hasil nyata dalam mitigasi risiko budidaya. Stasiun cuaca yang terintegrasi dengan data satelit memungkinkan pembudidaya menerima peringatan dini curah hujan tinggi yang dapat memicu guncangan termal dan salinitas dalam jeda waktu 30-60 menit, sehingga tindakan preventif seperti aplikasi kapur, mineral, atau penghentian pemberian pakan dapat dilakukan tepat waktu (USSEC, 2024)

6.1.2 Identifikasi dan Pengendalian Penyakit Utama

Penyakit merupakan tantangan utama dalam budidaya udang intensif yang dapat menyebabkan kematian massal dan kerugian ekonomi yang signifikan. Penyakit-penyakit utama yang menyerang udang vaname antara lain *White Spot Syndrome Virus* (WSSV), *Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease* (AHPND), dan *Enterocytozoon hepatopenaei* (EHP) (Afandy et al., 2025). Deteksi dini WSSV menggunakan teknik *Polymerase Chain Reaction* (PCR) menunjukkan sensitifitas yang tinggi dan dapat mengidentifikasi

infeksi pada fase subklinis sebelum munculnya gejala klinis (Rahmiza et al., 2026).

Protozoa ektoparasit seperti *Zoothamnium* sp., *Vorticella* sp., dan *Epistylis* sp. juga menjadi masalah serius yang dapat menyebabkan penyakit EHP (Renitasari et al., 2025). Penelitian menunjukkan prevalensi ektoparasit pada tambak intensif mencapai 95,56%, jauh lebih tinggi dibandingkan tambak tradisional dengan 56,6%. Hasil pengamatan kualitas air pada tambak intensif menunjukkan nilai alkalinitas, nitrit, amonia, dan Total Organic Matter yang lebih tinggi, menciptakan kondisi ideal untuk pertumbuhan parasit (Renitasari et al., 2025).

Selain teknik molekuler PCR, deteksi penyakit udang juga mulai dibantu oleh teknologi visi komputer (*computer vision*). Analisis citra dari kamera bawah air dengan interval pengambilan gambar setiap 30 menit memungkinkan algoritma kecerdasan buatan memantau kondisi kesehatan usus udang serta perilaku makan secara *real-time*, memberikan gambaran yang lebih akurat dibandingkan metode sampling manual. Deteksi anomali pergerakan, lesi eksternal, dan pola berenang asimetris dapat diidentifikasi berminggu-minggu sebelum mortalitas massal terjadi, sehingga intervensi pengobatan dapat dilakukan secara presisi pada level petak budidaya tertentu.

6.1.3 Strategi Biosekuriti dan Manajemen Pencegahan

Strategi pengelolaan pencegahan penyakit mencakup penerapan biosekuriti yang ketat dengan otoritas akses ke lokasi budidaya, penggunaan bibit bebas penyakit, dan pemantauan

kualitas air yang konsisten (Afandy et al., 2025). Rekomendasi strategi dari analisis SWOT menunjukkan perlunya pendekatan agresif melalui strategi SO (*Strength-Opportunity*) untuk memperkuat biosekuriti berbasis risiko.

Penggunaan probiotik sinbiotik sebagai alternatif pengendalian penyakit telah terbukti efektif meningkatkan kelangsungan hidup udang vaname. Pemberian *Artemia* yang dibioenkapsulasi dengan sinbiotik menghasilkan tingkat kelangsungan hidup benih sebesar $92,0\% \pm 9\%$ dan laju pertumbuhan spesifik $18,44 \pm 2,01\%$ (Astiana et al., 2024). Aplikasi probiotik pada media budidaya dapat menurunkan parameter kandungan amoniak dan nitrit secara signifikan sambil tetap aman digunakan.

Pendekatan biosekuriti tingkat lanskap juga semakin mendapat perhatian. Implementasi model silvofishery yang mengintegrasikan tegakan mangrove dengan tambak udang ekstensif mampu memulihkan fungsi hidrologis penyerap sedimen dan polutan secara alami sekaligus berfungsi sebagai zona penyangga biosekuriti. Studi kasus Kalimantan Mangrove Shrimp Project (KMSP) di Delta Sungai Sesayap seluas 150.000 hektar menunjukkan bahwa metode budidaya udang windu (*Penaeus monodon*) tanpa input pakan buatan dan antibiotik dapat berjalan secara berkelanjutan dengan harga jual premium dari sertifikasi organik (Bennett et al., 2023). Pada model intensif konvensional, integrasi teknologi pendamping yang berkelanjutan tercatat mampu

meningkatkan produktivitas dari 0,6 ton menjadi hingga 40 ton per hektar per siklus tanam (Wibowo et al., 2023).

6.1.4 Manajemen Pakan dan Nutrisi Udang

Manajemen pakan merupakan komponen paling penting dalam efisiensi budidaya udang, mengingat biaya pakan mencapai 60-70% dari total biaya operasional. Program pemberian pakan harus disesuaikan dengan fase pertumbuhan udang, mulai dari *blind feeding* pada bulan pertama hingga program berbasis *anco control* (Sawiya et al., 2025). Analisis hasil pakan yang baik dapat menghasilkan Survival Rate (SR) mencapai 70% dengan Feed Conversion Ratio (FCR) sebesar 1,2.

Kombinasi pakan tambahan yang memanfaatkan bahan lokal seperti probiotik, rempah-rempah, dan suplemen alami dapat meningkatkan nafsu makan dan imunitas udang (Aisyah et al., 2023). Penggunaan sinbiotik dalam pakan mampu meningkatkan ketahanan udang terhadap stresor umum dalam akuakultur dan mendukung praktik budidaya yang lebih berkelanjutan (Yudiati & Azhar, 2024; Astiana et al., 2024).

Inovasi teknologi pakan cerdas (smart feeding) memberikan terobosan signifikan dalam efisiensi pakan udang. Sistem seperti iFeeder menggunakan sensor akustik bawah air untuk mendeteksi intensitas aktivitas makan udang; ketika sinyal akustik melemah dan menandakan udang telah kenyang, distribusi pakan dihentikan secara otomatis (Pratama et al., 2024). Sistem ini terbukti menurunkan FCR sebesar 5-20% dan secara langsung mengurangi akumulasi limbah organik di dasar tambak yang berpotensi memicu

lonjakan amonia. Dengan otomatisasi tersebut, biaya tenaga kerja operasional dapat berkurang hingga 35% dan tingkat kesalahan pencatatan data turun dari kisaran 18-40% pada metode manual menjadi mendekati nol.

6.2 Kepiting Bakau, Rajungan, dan Lobster Laut

6.2.1 Budidaya Kepiting Bakau (*Scylla* spp.)

Kepiting bakau (*Scylla* spp.) merupakan komoditas perikanan dengan nilai ekonomi tinggi yang dapat dibudidayakan untuk mendukung perekonomian lokal. Penelitian tentang pengembangan budidaya kepiting bakau menunjukkan bahwa sementara produksi masih mengandalkan hasil tangkapan alam (75-85%), potensi budidaya masih sangat besar dengan kontribusi hanya 15-25% dari total produksi (Andayani et al., 2022). Tantangan utama adalah keterbatasan ketersediaan benih yang sulit diperoleh pada bulan-bulan tertentu, menyebabkan gangguan kegiatan budidaya.

Pembenihan kepiting bakau perlu dikembangkan sebagai solusi berkelanjutan. Kematangan gonad induk betina kepiting bakau menunjukkan tingkat kematangan bervariasi dari Tingkat Kematangan Gonad (TKG) I hingga IV, dengan banyak ditemukan pada TKG II (Sari et al. 2022). Fekunditas kepiting bakau pada TKG IV menunjukkan jumlah telur yang akan memijah berkisar 1.348.666-4.922.500 butir. Dengan terbukanya peluang budidaya,

masyarakat pesisir dapat memperoleh mata pencaharian alternatif yang berkelanjutan.

6.2.2 Budidaya Rajungan (*Portunus pelagicus*)

Rajungan (*Portunus pelagicus*) merupakan komoditas penting perikanan Indonesia dengan permintaan pasar tinggi baik domestik maupun ekspor. Nisbah kelamin rajungan di berbagai lokasi menunjukkan proporsi bervariasi, dengan penelitian di perairan Senggarang menunjukkan rasio 1,41:1 (jantan:betina) (Mughni et al., 2022). Hubungan bobot dan lebar karapas rajungan bersifat alometrik positif, dengan nilai koefisien pertumbuhan sekitar 3,34-3,51 (Iksanti et al., 2022).

Pola pertumbuhan rajungan bervariasi tergantung lokasi dan musim. Di perairan Senggarang, rajungan betina memiliki pertumbuhan lebih cepat dibandingkan jantan, dengan faktor kondisi menunjukkan badan yang montok (Mughni et al., 2022). Status pertumbuhan bersifat alometrik positif pada 14 karakter morfometrik yang dianalisis (Mughni et al., 2022). Distribusi ukuran rajungan yang ditangkap berkisar dari lebar karapas 64-172 mm, dengan fase muda mencapai hampir setengah tangkapan total (Tahmid, 2015).

Pengelolaan rajungan berkelanjutan memerlukan pemahaman mendalam tentang biologi dan pola musiman. Musim pemijahan rajungan telah diketahui oleh nelayan, namun penangkapan masih terus dilakukan tanpa batasan (Triyanti et al., 2021). Untuk pengelolaan berkelanjutan, diperlukan kebijakan berbasis masyarakat melalui sosialisasi status sumber daya,

pelatihan diversifikasi alat tangkap, dan pengembangan mata pencaharian alternatif (Triyanti et al., 2021).

6.2.3 Budidaya Lobster Laut

Lobster (*Panulirus* spp.) merupakan komoditas ekspor unggulan dengan permintaan tinggi di pasar internasional. Indonesia sebagai salah satu negara penghasil lobster terbesar dunia memiliki tanggung jawab besar dalam menjaga kelestarian sumber daya ini. Status konservasi lobster kini termasuk dalam apendiks II dan dibatasi dalam perdagangan internasional (Erlania et al., 2017). Perairan Indonesia, khususnya Pulau Lombok, memiliki potensi sumber daya lobster yang sangat besar untuk pengembangan budidaya melalui sistem pembesaran dalam keramba jaring apung (Witomo & Nurlaili, 2015).

Pusat operasi marikultur lobster di Indonesia terkonsentrasi di sepanjang perairan terlindung Pulau Lombok, Nusa Tenggara Barat, terutama di Teluk Awang, Teluk Gerupuk, dan Teluk Ekas (Petersen et al., 2018). Aktivitas budidaya berbasis keramba jaring apung di kawasan ini awalnya berkembang sebagai efek samping dari budidaya rumput laut, di mana larva *puerulus* lobster liar menempel pada tali tambang dan ditampung untuk dibesarkan. Saat ini, kegiatan tersebut menopang perekonomian lebih dari 1.000 unit usaha berskala mikro dengan fokus pada Lobster Pasir (*Panulirus homarus*) dan Lobster Mutiara (*Panulirus ornatus*). Spesies *ornatus* dipanen setelah melewati periode pemeliharaan panjang hingga melampaui bobot satu kilogram untuk meraih harga ekuilibrium tertinggi di pasar ekspor (Petersen et al., 2018).

Kebijakan pengelolaan benih lobster mengalami evolusi, dimulai dari PERMEN KP No. 1 Tahun 2015 yang melarang penangkapan ukuran tertentu, hingga Permen KP No. 17 Tahun 2021 yang menerapkan kebijakan ekspor benih dengan regulasi ketat (Furqan et al., 2018). Implementasi kebijakan ini menunjukkan hasil positif dalam perlindungan sumber daya, namun memerlukan pendampingan berkelanjutan terhadap masyarakat pesisir yang mengandalkan penangkapan benih sebagai mata pencaharian utama (Furqan et al., 2018).

Penerapan teknologi *bio-atriktor* untuk perlindungan puerulus (benih laut) menunjukkan sekitar 139-154 individu per perjalanan, menjadi prototipe konservasi yang menjaga kelangsungan siklus hidup di perairan (Purnama et al., 2022). Strategi pengelolaan bibit lobster perlu mengintegrasikan pendekatan sosial-ekonomi dengan tujuan melestarikan sumber daya untuk generasi mendatang (Witomo & Nurlaili, 2015).

Modernisasi infrastruktur lobster juga sedang berlangsung secara bertahap. Transisi dari konstruksi keramba berbahan bambu yang rentan menuju anjungan lepas pantai berbahan polimer atau sistem insulasi ganda yang lebih kuat memberikan ketahanan operasional yang lebih baik terhadap gelombang dan korosi (Petersen et al., 2018). Studi percontohan di Sulawesi Tenggara merekomendasikan pembentukan konsorsium pelaku rantai pasok berbasis desa (*chain champions*) yang merancang kemitraan investasi untuk mengadopsi Praktik Manajemen Terbaik (Better

Management Practices/BMP) secara sistemik, sebagai prasyarat menembus pasar elit yang menuntut keberlanjutan proses hulu.

6.2.4 Teknik Pemeliharaan dan Nutrisi Kepiting, Rajungan, dan Lobster

Nutrisi dan manajemen pakan merupakan faktor penting dalam budidaya krustasea laut. Penelitian efek dietari protein pada rajungan menunjukkan bahwa kadar protein 40% dengan rasio energi 9,5 kkal memberikan pertumbuhan harian terbaik (Serang et al., 2007). Pemberian pakan buatan berbentuk gel berbasis bahan lokal telah dikembangkan sebagai solusi berkelanjutan, menghasilkan pakan dengan tekstur menyerupai daging udang dan ketahanan air hingga 24 jam (Ihsan et al., 2020).

Efek perbedaan pakan pada kinerja lobster sunu menunjukkan bahwa pemberian pakan komersial (I) menghasilkan tingkat kelangsungan hidup 54,17% dan biomassa 141,7 gram, lebih tinggi dibandingkan pakan alami (Rivaie et al., 2023). Manajemen pemberian pakan perlu mempertimbangkan kebiasaan makan alami dan nutrisi yang optimal untuk memastikan efisiensi pakan dan pertumbuhan ideal dalam sistem budidaya.

6.3 Ikan Laut Bernilai Tinggi

6.3.1 Budidaya Ikan Kerapu

Ikan kerapu (*Epinephelus* spp.) merupakan salah satu komoditas perikanan laut dengan nilai ekonomis tinggi, menjadi salah satu andalan ekspor Indonesia. Kerapu memiliki sifat-sifat

menguntungkan bagi marikultur dengan pertumbuhan cepat dan dapat diproduksi secara massal. Hasil penelitian lingkungan perairan untuk budidaya kerapu menunjukkan bahwa stasiun dengan lokasi keramba jaring tancap memberikan hasil tertinggi dibandingkan lokasi lain (Husin et al., 2023).

Teknik pembesaran kerapu cantang dalam sistem *Keramba Jaring Apung* (KJA) dimulai dengan persiapan jaring ukuran 4x4x2,5 m² yang dicuci dengan air tawar sebelum digunakan. Penebaran benih ukuran 10-13 cm dilanjutkan dengan pemeliharaan meliputi pemberian pakan, pengambilan sampel, grading, dan penanganan penyakit. Ikan dapat dipanen pada ukuran 600-800 g dengan umur 6 hingga 8 bulan, menghasilkan panjang mutlak 3,2 cm dan bobot mutlak 82 g (Febrianti, 2024).

Analisis kelayakan usaha budidaya kerapu sistem KJA di Teluk Pegamatan menunjukkan aspek finansial yang menguntungkan dengan nilai NPV positif, IRR lebih besar dari DF, dan Net B/C lebih besar dari satu (Yuspita & Felisha, 2025). Identifikasi bakteri patogen pada ikan kerapu menunjukkan bahwa *Vibrio parahaemolyticus* merupakan penyebab utama vibriosis dengan prevalensi tinggi (Ramanda et al., 2026).

6.3.2 Budidaya Ikan Bawal Bintang

Ikan bawal bintang (*Trachinotus blochii*) merupakan komoditas budidaya laut bernilai ekonomis dengan keunggulan mudah dibudidayakan, tidak memerlukan waktu lama untuk mencapai ukuran konsumsi, dan memiliki harga yang relatif tinggi (Azima, 2023). Teknik pembesaran ikan bawal bintang

menghasilkan pertumbuhan panjang mutlak 2,8 cm dan bobot 20 g dalam pemeliharaan 21 hari, dengan laju pertumbuhan spesifik 0,5% dan tingkat kelulushidupan 100% (Azima, 2023).

Parameter kualitas air untuk budidaya bawal bintang meliputi pH 8,14-8,4, salinitas 2,81-2,87‰, oksigen terlarut (DO) 4,6-5,2 mg/L, dan suhu 28,1-28,7°C (Azima, 2023). Ektoparasit menjadi ancaman signifikan dengan prevalensi rata-rata *Benedenia* sp. sebesar 70% dan *Pyrgraphorus hollisae* sebesar 80%, keduanya tergolong kategori infeksi sedang (Anggoro et al., 2025).

6.3.3 Budidaya Ikan Nila dan Kakap Putih

Ikan nila (*Oreochromis niloticus*) memiliki nilai ekonomi penting dengan budidaya yang relatif mudah, namun sering mengalami penyakit akibat kualitas air yang buruk. Pemanfaatan alga cokelat (*Sargassum cristaefolium*) sebagai *feed suplemen* menunjukkan potensi dalam meningkatkan sistem kekebalan tubuh ikan dan nafsu makan (Pratiwy et al., 2023). Pertumbuhan ikan nila dalam KJA dapat mencapai nilai FCR (Feed Conversion Ratio) 1,2-1,3 dengan tingkat kelangsungan hidup di atas 80% (Iskandar et al., 2025).

Ikan kakap putih (*Lates calcarifer*) merupakan ikan konsumsi bernilai ekonomis tinggi dengan nilai gizi yang tinggi. Teknik pendederan kakap putih dilakukan dalam bak fiber dengan persiapan wadah budidaya, penebaran benih, pemberian pakan, sampling dan grading (Rizvi & Uli, 2026). Suhu optimal untuk pemeliharaan kakap putih berkisar 28-30°C dengan salinitas 29-33 ppt (Rizvi & Uli, 2026).

Selain spesies di atas, ikan bandeng (*Chanos chanos*) memegang peranan strategis sebagai komoditas budidaya pesisir. Kabupaten Gresik, Jawa Timur, merupakan salah satu sentra produksi terbesar di Indonesia dengan output sekitar 98.000 ton per tahun. Program Kampung Bandeng yang diinisiasi oleh KKP berfokus pada intensifikasi produksi melalui korporatisasi pembudidaya (*corporate farming*) untuk mengatasi ketergantungan tradisional pembudidaya pada juragan dalam pendanaan pakan dan akses pasar. Intervensi teknologi berupa standarisasi digital melalui sertifikasi Cara Budidaya Ikan yang Baik (CBIB) memungkinkan pembudidaya menyajikan bukti ketertelusuran produk yang dipersyaratkan oleh pembeli global, sehingga membuka akses ke skema pembiayaan formal berbasis data performa produksi (Riany et al., 2023).

6.3.4 Pencegahan Penyakit dan Manajemen Kesehatan

Kesehatan ikan merupakan faktor krusial dalam keberhasilan budidaya laut. Megalocytivirus merupakan ancaman serius bagi budidaya kerapu di beberapa lokasi, namun hasil pemeriksaan PCR menunjukkan status negatif dengan kondisi air tetap sesuai untuk budidaya. Implementasi protokol biosekuriti ketat dan pemeriksaan rutin menggunakan PCR sangat direkomendasikan untuk mencegah wabah penyakit dalam sistem budidaya intensif (Hutapea et al., 2025).

Pengelolaan kesehatan ikan dalam KJA memerlukan pemahaman faktor-faktor yang mempengaruhi kesehatan, identifikasi ikan sehat dan sakit, serta upaya pencegahan dan

pengobatan. Pelatihan penanggulangan dan pengendalian hama penyakit dapat meningkatkan pemahaman budidaya dan menurunkan tingkat kematian ikan secara signifikan (Agustina et al., 2025).

Pendekatan diagnostik berbasis visi komputer (machine vision) telah menambah dimensi baru pada manajemen kesehatan ikan laut. Pemindaian citra termal dan optik beresolusi tinggi memungkinkan algoritma kecerdasan buatan mendeteksi kelainan tekstur kulit, pergerakan operkulum yang tidak wajar, lesi eksternal, anomali pigmentasi, serta pola berenang asimetris yang menjadi indikasi infeksi patogenik atau serangan parasit. Sistem ini juga memungkinkan estimasi biomassa secara non-invasif tanpa harus mengangkat ikan dari air, sehingga mengurangi stres dan risiko infeksi sekunder yang sering terjadi pada metode sampling konvensional.

6.4 Rumput Laut, Kerang, dan Budidaya Lepas Pantai

6.4.1 Budidaya Rumput Laut (*Gracilaria* dan *Kappaphycus*)

Rumput laut merupakan salah satu komoditas ekonomi pesisir dengan potensi tinggi untuk dikembangkan di seluruh wilayah pesisir Indonesia. Pengembangan agribisnis rumput laut meliputi subsistem input (*hulu*), subsistem budidaya (*onfarm*), subsistem hilir, dan aspek kelembagaan. Pemanfaatan potensi

budidaya rumput laut masih baru mencapai sekitar 50% dari seluruh potensi areal yang tersedia (Nurcomariah et al., 2021).

Budidaya rumput laut (*Gracilaria* sp.) dengan metode IMTA (*Integrated Multi Trophic Aquaculture*) menunjukkan laju pertumbuhan spesifik tertinggi pada perlakuan kontrol 12,72%, sementara dengan integrasi abalon menghasilkan 4,00%. Parameter kualitas air berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan rumput laut, dengan tersedianya nutrisi menjadi faktor utama pembentukan sel baru (Yudiastuti et al., 2017).

Kappaphycus alvarezii menunjukkan pertumbuhan yang responsif terhadap manajemen budidaya dengan faktor pengelolaan yang mempengaruhi produksi antara lain jarak antar tali, jarak antar rumpun, hama, penyakit, dan cemaran (Ratnawati et al., 2016). Untuk meningkatkan produksi, perlu dilakukan peningkatan bobot bibit antara 36,9-100,0 g/rumpun, penggunaan bibit yang tidak diangkut terlalu lama, dan penanaman berdasarkan kalender musim tanam.

Indonesia merupakan salah satu pengekspor utama genus *Kappaphycus* dan *Eucheuma* yang ekstrak selulernya diolah menjadi karagenan, hidrokoloid esensial bagi industri pangan, farmasi, dan kosmetik global. Namun, capaian volume tersebut masih dibayangi oleh defisit transfer teknologi di tingkat petani serta lemahnya posisi tawar terhadap pembeli multinasional. Studi komparatif dengan kasus rumput laut Zanzibar (Tanzania) menemukan bahwa margin yang diperoleh pembudidaya akar rumput sangat tipis akibat kuatnya struktur monopsoni pembeli, sehingga rekomendasi strategis

mendesak investasi riset terapan untuk mendirikan fasilitas pascapanen (*value-added products*) di dalam negeri, alih-alih mengeksport bahan mentah (The Nature Conservancy, 2018).

Rumput laut juga semakin diakui sebagai komponen penting dalam mitigasi perubahan iklim. Melalui fotosintesis, rumput laut menyerap karbon dioksida dari air laut dan mengonversinya menjadi biomassa, dengan sebagian karbon tersebut tersimpan secara permanen dalam sedimen laut dalam sebagai blue carbon (Duarte et al., 2017; Froehlich et al., 2019). Selain berfungsi sebagai penyerap karbon (*Carbon Dioxide Removal/CDR*), biomassa rumput laut dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku bioplastik biodegradable yang membutuhkan energi produksi lebih rendah dibandingkan plastik berbahan baku petrokimia (The Nature Conservancy, 2023). Dengan demikian, intensifikasi budidaya rumput laut secara langsung mendukung dua pilar Ekonomi Biru: pertumbuhan ekonomi dan mitigasi iklim.

Pengelolaan budidaya rumput laut yang tersebar pada kawasan luas mendapat dukungan dari teknologi penginderaan jauh. Satelit Sentinel-2 (optik) dan PlanetScope memberikan data spasial mengenai variabilitas suhu permukaan laut dan konsentrasi klorofil-a yang krusial untuk penentuan lokasi tanam optimal (Wijesekara et al., 2023). Penelitian yang dipimpin Griffith University memanfaatkan citra satelit dan *computer vision* untuk membangun ketahanan iklim petani rumput laut Indonesia, terutama dalam memetakan risiko penyakit ice-ice yang sangat dipengaruhi anomali curah hujan dan suhu. Sistem peringatan dini berbasis data satelit ini

memungkinkan intervensi kolektif sebelum terjadinya kematian massal di komunitas pesisir.

6.4.2 Budidaya Kerang dan Abalon

Kerang hijau (*Perna viridis*) dapat dibudidayakan dalam sistem polikultur dengan rumput laut, memberikan dampak positif pada kualitas agar yang dihasilkan. Peningkatan kepadatan kerang positif dengan peningkatan rendemen agar, berkisar antara 13,05% hingga 15,68% (Sari & Rahim, 2025). Pengelolaan kepadatan kerang hijau dapat meningkatkan lingkungan budidaya dan mengurangi kemungkinan akumulasi logam berat di dasar perairan (Sari & Rahim, 2025).

Abalon (*Haliotis* spp.) merupakan produk laut yang paling mahal dengan permintaan tinggi di pasar internasional. Sistem budidaya abalon di Asia terbesar dikembangkan dengan metode berbasis darat dan laut, dengan penyesuaian inovasi untuk menghasilkan produk berkualitas tinggi (Nur, 2020). Benih abalon biasanya dipelihara pada kolam-kolam yang dilengkapi lembaran plastik bergelombang, polythene, atau pipa PVC yang ditumbuhi lapisan diatom sebagai pakan alami (Nur, 2020).

Budidaya abalon melalui IMTA menunjukkan laju pertumbuhan spesifik tertinggi pada kepadatan 40 individu abalon dengan 10 rumpun rumput laut 100 gram per unit (0,76%/hari), diikuti kepadatan 50 individu (0,71%/hari). Tingkat kelangsungan hidup pada sistem integrasi mencapai 97,5%, jauh lebih tinggi dari kontrol 94,5% (Hayati et al., 2017).

Konsep *Integrated Multi-Trophic Aquaculture* (IMTA) dengan integrasi spesies fed (ikan) dan ekstraktif (kerang dan rumput laut) merupakan implementasi paling konkret dari prinsip ekonomi sirkular dalam akuakultur. Dalam sistem ini, limbah organik dan nutrisi anorganik (amonia, fosfat) dari budidaya ikan diserap oleh rumput laut, sementara partikel pakan tersuspensi dimanfaatkan oleh kerang sebagai pakan filter feeder (Yudiastuti et al., 2017; Hayati et al., 2017). Pendekatan ini secara signifikan menurunkan beban polutan menuju perairan terbuka serta menghasilkan diversifikasi pendapatan dari multi-komoditas, sekaligus mengurangi ketergantungan pada pakan eksternal.

6.4.3 Budidaya Lepas Pantai (*Offshore Aquaculture*)

Budidaya lepas pantai merupakan solusi mengembangkan akuakultur di perairan yang lebih dalam dan jauh dari garis pantai. Penentuan kesesuaian lokasi marikultur ikan kerapu memerlukan pertimbangan parameter ekosistem seperti keberadaan klorofil-a, Suhu Permukaan Laut (SPL), Muatan Padat Tersuspensi (MPT), dan batimetri. Analisis menggunakan penginderaan jauh dan GIS dapat mengidentifikasi area dengan akurasi kesesuaian mencapai 80% (Rijal & Bayuaji, 2021).

Kondisi oseanografi dan kesesuaian lokasi budidaya lobster di perairan Teluk Pidada menunjukkan 78,8% perairan termasuk kategori sangat sesuai dan 21,2% sesuai untuk budidaya. Hampir sebagian besar wilayah teluk berpotensi untuk budidaya, meskipun beberapa titik lokasi menjauh dari daratan akibat tingginya nutrisi dan limpasan yang kurang sesuai (Hartanto et al., 2024).

Pengawasan budidaya lepas pantai memerlukan instrumen yang berbeda dari budidaya pesisir konvensional. Satelit Sentinel-1 dengan teknologi Synthetic Aperture Radar (SAR) memungkinkan pemantauan infrastruktur keramba pada kondisi tertutup awan maupun malam hari, sehingga deteksi anomali seperti tumpahan minyak, kerusakan jaring, atau aktivitas penangkapan ikan ilegal di sekitar zona budidaya dapat dilakukan secara berkelanjutan (Liu et al., 2023). Algoritma deep learning yang diaplikasikan pada citra resolusi tinggi (*PlanetScope*) telah berhasil menghitung jumlah keramba secara individual dan memperkirakan luas area produktif dengan akurasi tinggi. Pendekatan ini mendukung pengelolaan tata ruang laut berbasis data dan penegakan kesesuaian zonasi.

Tantangan operasional terbesar dari budidaya lepas pantai adalah ketersediaan konektivitas data berkecepatan tinggi. Layanan internet satelit orbit rendah (*Low Earth Orbit/LEO*) seperti Starlink Maritime menawarkan kecepatan unduh hingga 200-350 Mbps dengan latensi rendah, tanpa memerlukan pembangunan menara BTS di tengah laut. Integrasi konektivitas LEO dengan sensor IoT bawah air dan kamera AI memungkinkan transfer data video monitoring secara *real-time*, kontrol jarak jauh terhadap aktuator pakan, serta pembaruan perangkat lunak sensor dari pusat komando di darat. Untuk wilayah dengan biaya akses lebih rendah, layanan VSAT *High Throughput Satellite* (HTS) seperti Ubiqu yang berbasis Nusantara Satu juga tersedia dengan kecepatan hingga 50 Mbps.

6.4.4 Kelembagaan dan Pemasaran Rumput Laut

Pengembangan klaster rumput laut di Kabupaten Bombana menunjukkan tiga zona pengembangan bisnis yang layak yaitu Rumbia, Poleang, dan Kabaena (Annaastasia et al., 2024). Rantai pasok rumput laut dimulai dari petani dengan margin produksi 9,55%, kelompok pembudidaya 0,28%, koperasi/BUMDES 11,61%, hingga agroindustri dengan margin 50,67%. Produk olahan rumput laut yang direkomendasikan adalah ATC (*Alkali Treated Cottoni*), SRC (*Semi Refined Carrageenan*), dan RC (*Refined Carrageenan*) untuk mendukung pengembangan industri (Annaastasia et al., 2024).

Pemberdayaan berbasis masyarakat kelompok pembudidaya rumput laut memerlukan pendampingan budidaya, bantuan sarana dan permodalan, pelatihan manajemen usaha, dan penguatan kelembagaan. Pengetahuan dan teknik budidaya rumput laut serta penguatan kelembagaan mampu meningkatkan produktivitas dengan kualitas tinggi dan membuka akses pasar bagi pemasaran hasil panen (Fatimah & Samsul, 2024).

6.5 Keramba Jaring Apung dan Teknologi Laut Dalam

6.5.1 Desain dan Konstruksi Keramba Jaring Apung (KJA)

Keramba Jaring Apung (KJA) merupakan sistem budidaya laut yang paling banyak digunakan untuk pemeliharaan berbagai jenis ikan konsumsi. Teknologi KJA memungkinkan budidaya ikan dalam lingkungan laut terbuka sambil mempertahankan kontrol

terhadap biota yang dipelihara. Sistem KJA standar memiliki ukuran jaring $4 \times 4 \times 2,5 \text{ m}^2$ dengan kerangka dari kayu besi dan pelampung dari drum plastik (Febrianti, 2024). Pemilihan lokasi yang tepat untuk KJA sangatlah penting, mempertimbangkan parameter fisik seperti suhu, kecepatan arus, salinitas, pH, oksigen terlarut, dan kedalaman perairan (Nurjanah et al., 2024).

Analisis kesesuaian perairan untuk budidaya menggunakan KJA memerlukan pendekatan geospasial yang mengintegrasikan berbagai parameter oseanografi. Studi di perairan Pulau Menjangan menunjukkan area sangat sesuai seluas 56,15 ha untuk budidaya ikan kerapu macan dengan KJA (Nurjanah et al., 2024). Pertimbangan faktor gelombang melalui pemodelan kemiringan lereng menunjukkan penurunan luas layak hingga 71%, dari 9.939 ha menjadi 296,8 ha setelah integrasi aspek keterlindungan (Tarunamulia et al., 2016).

Perkembangan teknologi KJA dan akuakultur secara umum dapat dipetakan dalam empat generasi paradigma yang menggambarkan eskalasi intervensi teknologi. Akuakultur 1.0 adalah era tradisional yang mengandalkan tenaga manusia, observasi visual, dan pemberian pakan manual dengan risiko gagal panen yang sangat tinggi. Akuakultur 2.0 ditandai oleh mekanisasi seperti aerator dan pakan pelet, yang meningkatkan padat tebar namun memicu tantangan eutrofikasi dan wabah penyakit. Akuakultur 3.0 fokus pada keberlanjutan ekologis, biosekuriti, dan sistem filtrasi seperti *Recirculating Aquaculture Systems* (RAS). Akuakultur 4.0 merupakan konvergensi sistem biologi dengan sistem siber-fisik

yang mengadopsi sensor cerdas, analitik mahadata, pakan otomatis berbasis AI, *computer vision*, dan telemetri satelit (Ratan, 2026). Tujuan akhir dari paradigma 4.0 adalah menciptakan fasilitas budidaya yang mampu memantau, mendiagnosis, dan mengeksekusi koreksi secara mandiri tanpa intervensi manual yang konstan.

6.5.2 Inovasi Teknologi Otomatis dan Pemantauan

Pengembangan teknologi KJA pintar dengan sistem pemantauan kualitas air dan pemberian pakan otomatis merupakan langkah signifikan dalam meningkatkan efisiensi budidaya. Sistem pengendalian alat pakan ikan otomatis berbasis aplikasi Android menggunakan modul LoRa mampu mengirim data hingga jarak 310 m dengan tingkat kegagalan 12,9% (Yudamson et al., 2024). Sensor ultrasonik HCSR-04 dapat memonitor ketersediaan pakan dengan akurasi error 1,22%.

Implementasi teknologi KJA otomatis di desa ekowisata menunjukkan peningkatan produktivitas ikan dan efisiensi dalam pengelolaan budidaya (Dwijayanti et al., 2025). KJA yang dilengkapi sensor suhu dan pH serta sistem pemberian pakan otomatis mampu meningkatkan kapasitas masyarakat dalam memanfaatkan teknologi untuk kelestarian lingkungan.

Arsitektur teknologi Smart Aquaculture 4.0 ditopang oleh konstelasi pilar yang saling terhubung. Pilar pertama adalah *Internet of Things* (IoT) yang berfungsi sebagai sistem saraf perifer: jaringan sensor mikro-nano memantau parameter fisika-kimia secara berkesinambungan, meliputi oksigen terlarut (DO), pH, suhu, salinitas, kekeruhan, dan kadar amonia. Data ditransmisikan melalui

modul nirkabel jarak jauh menuju repositori awan (*Cloud*) (Dupont et al., 2018). Algoritma kontrol Proportional-Integral-Derivative (PID) dan logika *fuzzy* memungkinkan sistem mengaktifkan aerator secara otomatis ketika DO turun di bawah ambang batas kritis, sehingga mortalitas akibat hipoksia menjelang fajar dapat dicegah (Ma & Ding, 2018).

Pilar kedua adalah Kecerdasan Buatan (AI) dan *Computer vision* yang berperan sebagai korteks pengambil keputusan. Kamera optik bawah air yang dipadukan dengan algoritma pembelajaran mesin mampu melakukan estimasi biomassa secara non-invasif (segmentasi morfometrik), deteksi dini penyakit melalui analisis tekstur kulit dan pola berenang, serta optimalisasi pemberian pakan berbasis sinyal visual dan akustik aktivitas makan ikan. Karena pakan menyerap 50-70% biaya operasional, sistem intelligent auto-feeder berdampak langsung pada efisiensi finansial budidaya.

Pada tingkat kematangan tertinggi, konsep Kembaran Digital (*Digital Twin*) menyajikan replika virtual dari kondisi tambak atau KJA yang divalidasi oleh aliran data sensor secara simultan. Manajer perikanan dapat mensimulasikan dampak skenario seperti gelombang panas laut (*marine heatwaves*) terhadap pertumbuhan biomassa tanpa perlu menggunakan organisme hidup sebagai eksperimen (Kruk et al., 2024). Untuk mengatasi keengganan berbagi data antar entitas, metodologi *Federated Learning* memungkinkan model prediksi dilatih lintas lokasi tambak tanpa mentransmisikan data mentah keluar dari server lokal. Ketika dipadukan dengan teknologi blockchain, kerangka ini menghasilkan

sistem ketertelusuran rantai pasok (*supply chain traceability*) yang menopang akses ke pasar ekspor premium yang menuntut jaminan keberlanjutan.

6.5.3 Daya Dukung dan Manajemen Lingkungan

Analisis daya dukung perairan laut untuk KJA menunjukkan bahwa pada zona dengan kriteria sangat sesuai, dapat menampung 404 unit KJA per hektar (Soemarjati et al., 2021). Zona II dengan kriteria sesuai dapat menampung 343 unit KJA, sementara Zona III dapat menampung 217 unit KJA. Pengembangan KJA harus mempertimbangkan daya dukung untuk mencegah kelebihan kapasitas yang berdampak pada kualitas air dan keberlanjutan budidaya.

Tingkat stok ikan yang ada masih jauh di bawah kapasitas maksimum perairan, terutama pada Zona I dan III (Soemarjati et al., 2021). Penataan ulang KJA di Zona II perlu dilakukan untuk menghindari konsentrasi di satu area dan memastikan pengawasan agar peningkatan KJA tidak melebihi daya dukung perairan. Pengelolaan lingkungan harus mencakup pengelolaan limbah organik dari sisa pakan dan metabolisme yang terbuang ke perairan (Warsa et al., 2023).

Investasi pada teknologi Akuakultur 4.0 awalnya membutuhkan belanja modal yang tidak kecil, namun analisis ekonomi jangka menengah menunjukkan keuntungan yang kompetitif. Otomatisasi pemantauan dan pemberian pakan dapat menurunkan biaya tenaga kerja hingga 35% dan menekan tingkat kesalahan pencatatan data dari kisaran 18-40% pada metode manual

menjadi mendekati nol. Penurunan FCR sebesar 5-20% melalui smart feeder berdampak signifikan pada margin keuntungan, dan pada sistem intensif seperti *In-Pond Raceway Systems* (IPRS), produksi dapat meningkat hingga tiga kali lipat dibandingkan metode tradisional dengan pengurangan biaya produksi per kilogram hingga 30%. Indikator-indikator ini menunjukkan bahwa investasi teknologi cerdas berpotensi menjadi mesin produktivitas baru bagi sektor KJA nasional.

6.5.4 Keberlanjutan dan Ekonomi Biru

Penerapan prinsip ekonomi biru pada budidaya KJA mencakup kemajuan ekonomi, perbaikan kesejahteraan sosial, dan penjagaan ekosistem laut. Penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar petani belum mengenal istilah "ekonomi biru", namun beberapa prinsipnya telah diimplementasikan seperti tidak membuang sampah sembarangan dan menggunakan pakan sesuai padat tebar optimal (Pribadie et al., 2025). Diperlukan bimbingan teknis intensif untuk memperkuat penerapan prinsip ekonomi biru pada budidaya laut.

Produktivitas KJA SMART (sistem KJA dengan jaring ganda, penampung limbah, dan filtrasi dengan tumbuhan air) mencapai 5,3 kali dari bobot total benih yang ditebar, menunjukkan efisiensi unggul (Warsa et al., 2023). Ikan mas dan nila dalam KJA SMART menghasilkan laju pertumbuhan masing-masing 2,44 g/hari dan 2,06 g/hari dengan FCR 1,73. Penerapan teknologi ramah lingkungan dapat mengurangi dampak budidaya terhadap ekosistem laut sekaligus meningkatkan produktivitas dan ketahanan ekonomi.

Keberhasilan transisi diukur melalui *Indonesia Blue Economy Index* (IBEI) yang dikembangkan bersama Uni Eropa dan institusi akademik global, serta *Blue Food Assessment* (BFA). Indeks komposit IBEI berdiri di atas tiga pilar: pilar ekonomi yang mengukur kontribusi akuakultur, pariwisata bahari, dan pelayaran terhadap PDB; pilar lingkungan yang menyoroti tutupan terumbu karang, daya serap karbon mangrove, dan pengendalian eutrofikasi; serta pilar sosial yang menilai pemerataan lapangan kerja dan akses pendanaan formal bagi masyarakat pesisir (Bappenas, 2024). IBEI berfungsi sebagai proksi obyektif terhadap pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan, terutama SDG 14 (Ekosistem Lautan) dan SDG 1 (Pengentasan Kemiskinan).

Pada level operasional, Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP) menjabarkan visi tersebut melalui Lima Program Prioritas Berbasis Ekonomi Biru: (1) perluasan kawasan konservasi laut hingga 30% dari total perairan Indonesia; (2) Penangkapan Ikan Terukur (PIT) berbasis kuota yang menggantikan paradigma open-access dengan estimasi PNBPNP Rp 41,15 triliun per tahun; (3) pengembangan perikanan budidaya berkelanjutan dengan fokus pada lima komoditas unggulan yaitu udang, lobster, kepiting, rumput laut, dan nila salin; (4) pengawasan dan pengendalian wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil; serta (5) pembersihan sampah plastik di laut melalui program Bulan Cinta Laut (KKP, 2024a; KKP, 2024b).

Tantangan tata kelola juga menjadi pelajaran penting bagi ekosistem investasi akuakultur cerdas Indonesia. Skandal manipulasi laporan keuangan pada salah satu perusahaan rintisan

unicorn di sektor aquatech yang berakhir dengan vonis pengadilan pada 2026 menunjukkan risiko sistemik yang dapat merusak kepercayaan investor pendanaan biru (*blue finance*). Kasus ini memperlihatkan bahwa klaim adopsi perangkat smart feeder dapat dikonstruksi secara berlebihan apabila tidak diverifikasi melalui audit fisik di lapangan (Integrity Indonesia, 2026; Business Times, 2026). Pelajaran strategis bagi sektor ini adalah perlunya mekanisme due diligence fisik yang ketat, transparansi data produksi, serta keterlibatan auditor independen dalam memvalidasi metrik adopsi teknologi yang menjadi dasar pengambilan keputusan investasi.

Konvergensi antara teknologi cerdas dan kerangka kelembagaan yang inklusif menjadi prasyarat agar prinsip Ekonomi Biru benar-benar membumi di tingkat pembudidaya. Tanpa fondasi infrastruktur digital, jaminan energi, dan SDM yang memadai, perangkat keras tercanggih sekalipun tidak akan menghasilkan dampak optimal. Sebaliknya, tanpa diiringi proteksi sosial dan tata kelola yang adil, akselerasi teknologi berisiko menciptakan eksklusi baru bagi nelayan tradisional. Dengan demikian, pengembangan KJA dan akuakultur laut ke depan harus dipandu oleh integrasi tiga elemen: (1) inovasi teknis yang relevan dengan kondisi lokal, (2) kebijakan publik yang menjamin kesetaraan akses, dan (3) instrumen verifikasi yang menjaga integritas klaim keberlanjutan.

Bab 7: Inovasi Pakan:

Nutrigenomik dan Masa Depan

Resmi Rahmawati, S.Pd., M.Si.

7.1 Kebutuhan Nutrisi Spesifik per Spesies

7.1.1 Profil Nutrisi dan Kebutuhan Makronutrien Berbeda Spesies

Setiap spesies akuatik memiliki kebutuhan nutrisi yang unik dan spesifik, yang dipengaruhi oleh faktor biologis, ekologis, dan metabolisme individu. Ikan karnivor seperti salmon dan trout memerlukan kadar protein yang lebih tinggi (40-50 persen berat kering) dibandingkan dengan ikan omnivora atau herbivora seperti nila atau ikan mas (*carp*) yang hanya membutuhkan 25-35 persen. Kebutuhan lipid juga berbeda secara signifikan antar spesies, dengan ikan laut memerlukan asam lemak omega-3 rantai panjang (EPA dan DHA) yang lebih tinggi daripada ikan air tawar. Kebutuhan mineral dan vitamin juga bervariasi, terutama dalam hal kalsium, fosfor, dan rasio Ca:P yang optimal, yang dapat berbeda hingga 50 persen antara spesies yang berbeda (Mahmud et al., 2025). Pemahaman mendalam tentang profil nutrisi spesifik ini menjadi fondasi dalam formulasi pakan yang efisien dan berkelanjutan.

Penelitian nutrigenomik telah menunjukkan bahwa ekspresi gen dalam sistem pencernaan dan metabolisme ikan sangat responsif

terhadap komposisi pakan. Perubahan sumber protein, kadar lipid, dan rasio asam amino dapat mengubah pola ekspresi gen secara dramatis, mempengaruhi pertumbuhan, imunitas, dan efisiensi pakan secara keseluruhan. Studi pada ikan zebra (*Danio rerio*) sebagai model organisme akuakultur telah membuka wawasan tentang bagaimana jalur penginderaan nutrisi bekerja dalam ikan, memberikan fondasi ilmiah untuk optimalisasi spesies pakan (Ulloa, 2014). Teknologi RNA *sequencing* memungkinkan identifikasi gen-gen kunci yang mengubah perubahan nutrisi, memfasilitasi pengembangan pakan yang tidak hanya memenuhi kebutuhan nutrisi dasar tetapi juga mengoptimalkan fungsi fisiologis dan kesehatan.

7.1.2 Asam Amino Esensial dan Profil Asam Amino Optimal

Asam amino adalah blok pembangun protein dan memiliki signifikansi kritis dalam nutrisi akuakultur. Ikan memerlukan sepuluh asam amino esensial yang tidak dapat disintesis oleh tubuh mereka sendiri dan harus diperoleh dari pakan: arginin, fenilalanin, histidin, isoleusin, leusin, lisin, metionin, triptofan, treonin, dan valin. Kebutuhan relatif dari setiap asam amino sangat spesifik untuk setiap spesies ikan, dan ketidakseimbangan dalam profil asam amino dapat menyebabkan penurunan kinerja pertumbuhan bahkan jika kadar protein total mencukupi (Rudoy et al., 2024). Penelitian telah menunjukkan bahwa asam amino pembatas sering kali berbeda antara spesies—misalnya, lisin sering menjadi asam amino pembatas dalam diet berbasis tanaman, sementara metionin dapat menjadi pembatas dalam diet berbasis insek jika tidak diproses dengan baik.

Teknologi analisis asam amino modern, termasuk kromatografi cair kinerja tinggi (HPLC) dan penganalisis asam amino otomatis, memungkinkan karakterisasi presisi dari profil asam amino berbagai sumber pakan (Rudoy et al., 2024). Data ini sangat penting untuk formulasi pakan yang seimbang, terutama saat menggunakan bahan baku baru seperti protein serangga atau mikroalga. Metabolomik dan pendekatan *omics* lainnya mengungkapkan bahwa tidak hanya kuantitas asam amino tetapi juga rasio antara bahan baku yang penting, dengan beberapa rasio secara sinergis meningkatkan penyerapan dan pemanfaatan nutrisi oleh ikan (Roques et al., 2018). Misalnya, rasio optimal antara isoleusin dan leusin dapat mempengaruhi transportasi asam amino di usus dan penyerapannya pada epitel mukosa.

7.1.3 Kebutuhan Lipid, Asam Lemak Esensial, dan Manajemen Kolesterol

Lipid tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi tetapi juga sebagai komponen struktural membran sel, mediator *signaling* intraselular, dan prekursor hormon. Kebutuhan lipid total pada ikan berkisar antara 10-20 persen, dengan kebutuhan yang lebih tinggi pada ikan muda dan selama fase reproduksi. Dua asam lemak esensial yang tidak dapat disintesis oleh ikan harus diperoleh dari pakan: asam linoleat (omega-6) dan asam α -linolenat (omega-3) untuk ikan air tawar, sementara ikan laut juga membutuhkan EPA (*eicosapentaenoic acid*) dan DHA (*docosahexaenoic acid*) dalam bentuk yang sudah terbentuk (Evrendilek, 2024). Karakteristik lipid

dari bahan pakan alternatif menjadi faktor penting dalam ketersediaannya sebagai pengganti minyak ikan tradisional.

Pengelolaan kolesterol dalam pakan juga semakin dianggap sebagai aspek penting dari nutrisi akuakultur, terutama mengingat pengaruh kesehatan konsumen atas produk akuakultur. Penelitian terbaru telah menunjukkan bahwa komposisi pakan dapat mempengaruhi kadar Kolesterol dalam daging ikan yang dihasilkan, dengan diet yang kaya akan asam lemak tak jenuh ganda rantai panjang cenderung menghasilkan daging dengan profil lipid yang lebih sehat (Evrendilek, 2024). Formulasi pakan yang mengintegrasikan mikroalga kaya EPA dan DHA, atau protein serangga dengan profil lemak unik, dapat memberikan kesempurnaan dalam mengoptimalkan komposisi lipid produk akhir.

7.1.4 Senyawa Mineral, Vitamin, dan Bioaktif dalam Nutrisi Ikan

Mineral dan vitamin berperan penting dalam berbagai fungsi fisiologis ikan, mulai dari pembentukan tulang hingga fungsi kekebalan. Kebutuhan kalsium, fosfor, magnesium, dan unsur jejak seperti seng, tembaga, mangan, dan selenium sangat bervariasi antar spesies dan bahkan antar tahap kehidupan dalam spesies yang sama. Rasio kalsium-fosfor yang tidak tepat dapat menyebabkan gangguan tulang dan terhambatnya pertumbuhan, sementara kekurangan seng dapat menurunkan respon imun secara signifikan. Mineral dari bahan pakan alami sering kali dalam bentuk yang kurang *bioavailable* dibandingkan dengan mineral sintetis, menjadikan

optimalisasi bioavailabilitas mineral aspek penting dalam formulasi pakan (Muntean et al., 2024).

Vitamin, terutama vitamin C yang berfungsi sebagai antioksidan dan koenzim dalam berbagai reaksi metabolik, sangat penting untuk kesehatan ikan. Berbeda dengan manusia dan beberapa mamalia lain, ikan umumnya tidak dapat mensintesis vitamin C secara endogen dan bergantung sepenuhnya pada asupan pakan. Kehadiran senyawa bioaktif seperti karotenoid, polifenol, dan fisitosterol dalam bahan pakan alternatif sangat dihargai karena potensi sifat imunomodulator dan antioksidan yang dimilikinya (Evrendilek, 2024). Mikroalga dan serangga, khususnya, kaya akan berbagai senyawa bioaktif yang dapat meningkatkan kesehatan ikan dan kualitas produk secara keseluruhan.

7.2 Alternatif Protein dari Serangga dan Mikroalga

7.2.1 Serangga sebagai Sumber Protein Berkelanjutan: Komposisi Nutrisi dan Manfaat

Serangga, terutama lalat tentara hitam (*Black Soldier Fly*, *Hermetia illucens*), ulat bambu kuning (*Tenebrio molitor*), dan jangkrik (*Acheta domesticus*), telah muncul sebagai sumber protein yang paling menjanjikan untuk menggantikan tepung ikan dalam pakan akuakultur. Kandungan protein dari tepung larva BSF berkisar antara 48-65 persen, dengan profil asam amino yang sangat seimbang dan mirip dengan tepung ikan, menjadikannya pengganti

yang dapat diterima secara nutrisi. Selain itu, serangga mengandung kitin, komponen exoskeleton mereka, yang memiliki sifat prebiotik dan imunostimulatori yang dapat meningkatkan kesehatan usus dan respon imun ikan (Yadav et al., 2025). Kandungan lipid dalam serangga, meskipun bervariasi tergantung pemeliharaan substrat, biasanya mencakup asam lemak sehat seperti asam laurat dan asam miristat yang memiliki sifat antimikroba.

Keuntungan lingkungan dari penggunaan serangga sebagai sumber pakan sangat signifikan. Serangga dapat hidup pada substrat limbah organik seperti sisa makanan, limbah pertanian, dan limbah industri pangan, menciptakan bioekonomi sirkular di mana limbah ditransformasi menjadi protein bernilai tinggi (Mboya, 2025). Jejak lingkungan untuk memproduksi satu kilogram protein serangga jauh lebih rendah daripada protein ikan atau bahkan kedelai, dengan persyaratan udara, lahan, dan energi yang minimal. Studi siklus hidup menunjukkan bahwa produksi serangga untuk pakan menghasilkan emisi karbon 98 persen lebih rendah daripada produksi tepung daging (Yadav et al., 2025). Kapasitas serangga untuk mengkonversi limbah organik menjadi protein biomassa berkualitas tinggi dalam waktu singkat (3-4 minggu untuk BSF dan ulat bambu) menjadikannya teknologi produksi pangan yang revolusioner dalam konteks ketahanan pangan global.

7.2.2 Inkorporasi Serangga dalam Formulasi Pakan: Tingkat Substitusi dan Kinerja Ikan

Penelitian ekstensif telah menunjukkan bahwa tepung serangga dapat menggantikan 25-100 persen tepung ikan dalam

makanan berbagai spesies ikan tanpa mengurangi kinerja pertumbuhan, konversi pakan, atau kesehatan, tergantung pada spesies ikan dan tingkat substitusi (Liland et al., 2021). Pada ikan salmon, substitusi 50 persen atau lebih dari tepung ikan dengan tepung serangga telah menunjukkan hasil yang sebanding dengan kontrol diet dalam hal pertumbuhan dan efisiensi pakan. Pada ikan nila, penelitian menunjukkan toleransi yang bahkan lebih tinggi, dengan beberapa penelitian berhasil mengganti 100 persen tepung ikan tanpa berdampak negatif terhadap kinerja (Rahman et al., 2023). Pada ikan karp dan ikan mas, tepung larva BSF pada 100-200 gram/kilogram pakan menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam tingkat pertumbuhan spesifik dan efisiensi konversi pakan (Albayati et al., 2025).

Perbedaan dalam toleransi terhadap substitusi serangga antar spesies kemungkinan berkaitan dengan perbedaan dalam kemampuan pencernaan kitin dan kebiasaan makan alami spesies ikan. Ikan karnivor yang secara alami mengkonsumsi organisme berarthropoda dalam lingkungannya mungkin memiliki mekanisme pencernaan yang lebih baik untuk menangani kitin dan struktur protein serangga. Analisis histologis dari ikan yang diberi pakan serangga menunjukkan tingkat kesesuaian epitel yang minimal, bahkan pada tingkat substitusi tinggi, menunjukkan adaptasi yang baik terhadap komponen novel (Rimoldi et al., 2024). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penambahan enzim kitinase pada pakan serangga dapat meningkatkan daya cerna dan kinerja lebih

lanjut, terutama pada spesies yang kurang toleran terhadap kitin (Hasan et al., 2023).

7.2.3 Mikroalga sebagai Sumber Protein dan Lipid Multifungsional

Mikroalga seperti *Chlorella*, *Spirulina* (*Arthrospira*), *Nannochloropsis*, dan *Schizochytrium* menawarkan profil nutrisi yang sangat komprehensif untuk akuakultur. Kandungan protein dalam berbagai spesies mikroalga berkisar antara 30-70 persen berat kering, dengan asam amino esensial yang lengkap dan profil yang seimbang (Alaoui et al., 2026). Selain itu, mikroalga kaya akan EPA dan DHA, asam lemak omega-3 rantai panjang yang sama seperti yang ditemukan dalam minyak ikan, menjadikannya pengganti yang potensial untuk minyak ikan dalam diet ikan laut. Beberapa spesies seperti *Schizochytrium* dapat menghasilkan lebih dari 50 persen dari berat kering sebagai lipid kaya akan DHA, memberikan solusi untuk ketergantungan pada sumber minyak laut.

Keuntungan unik dari mikroalga adalah kemampuan mereka untuk diproduksi dengan input lahan dan udara yang minimal, dan bahkan dapat dikultivasi pada air limbah akuakultur, menciptakan sistem produksi yang tertutup dan berkelanjutan (Alaoui et al., 2026). Studi menunjukkan bahwa *Chlorella vulgaris* dan *Nannochloropsis oculata* yang dikultur pada air limbah akuakultur dapat menghilangkan 71-84 persen nitrogen dan fosfor dalam waktu satu minggu, sambil menghasilkan biomassa dengan kandungan protein hingga 47 persen berat kering (Song et al., 2024). Hal ini membuka peluang integrasi sistem produksi pakan dengan remediasi

lingkungan, menciptakan model ekonomi sirkular yang bermanfaat ganda. Mikroalga juga mengandung berbagai senyawa bioaktif seperti polisakarida, senyawa fenolik, dan pigmen yang dapat memiliki efek imunostimulatori dan antioksidan.

7.2.4 Keseimbangan Nutrisi dan Tantangan dalam Penggunaan Protein Alternatif

Meskipun serangga dan mikroalga menawarkan potensi besar, ada beberapa tantangan dalam mengintegrasikan mereka ke dalam formulasi pakan akuakultur. Ketersediaan hayati asam amino, terutama dalam protein berbasis tanaman dan beberapa spesies serangga, menjadi kurang optimal, memerlukan pemrosesan atau suplementasi tambahan (Mahmud et al., 2025). Faktor antinutrien seperti asam fitat, tanin, dan saponin dalam beberapa sumber protein dapat mengurangi pencernaan dan penyerapan nutrisi. Dalam kasus serangga, kitin, meskipun memiliki manfaat kesehatan, dapat mengurangi pencernaan protein dan bioavailabilitas mineral pada beberapa spesies ikan, memerlukan optimalisasi ukuran partikel, metode pengolahan, atau suplementasi enzim (Hasan et al., 2023).

Variabilitas nutrisi adalah hambatan praktis yang signifikan, terutama untuk serangga yang dipelihara pada berbagai substrat. Kandungan protein, lipid, dan mineral dalam larva BSF dapat bervariasi secara luas tergantung pada substrat makanan, kondisi pemeliharaan, dan tahap pengumpulan (Barth et al., 2025). Ini memerlukan kontrol kualitas yang ketat dan mungkin standarisasi nutrisi melalui pemrosesan atau suplementasi. Untuk mikroalga, tantangan utama adalah biaya produksi yang tinggi (USD 50-400 per

kilogram untuk biomassa kering), yang saat ini membuat mereka tidak kompetitif secara ekonomi dibandingkan dengan sumber konvensional dalam sebagian besar aplikasi akuakultur (Jimoh et al., 2025). Investasi dalam teknologi produksi inovatif dan skala ekonomi akan diperlukan untuk menjadikan sumber-sumber alternatif ini secara ekonomis layak untuk diterapkan secara luas dalam industri akuakultur.

7.3 Teknologi Pengolahan dan Rekayasa Pelet

7.3.1 Teknologi Ekstrusi dan Formulasi Pakan Modern

Teknologi ekstrusi pakan telah merevolusi cara pakan akuakultur diproses, memungkinkan kontrol presisi atas kepadatan pelet, kemampuan mengambang, stabilitas air, dan pencernaan (Rosle et al., 2024). Pabrik pakan budidaya modern menggunakan ekstruder sekrup kembar yang dapat mengendalikan suhu, tekanan, dan gaya geser dengan presisi tinggi, mengoptimalkan gelatinisasi pati, denaturasi protein, dan inaktivasi faktor antinutrisi secara bersamaan. Proses ini juga memungkinkan pemasukan dan distribusi seragam dari mikronutrien, vitamin, mineral, dan bahan tambahan pakan ke dalam pelet.

Formulasi pakan modern mengintegrasikan berbagai bahan alternatif dalam satu formulasi pakan yang seimbang, memerlukan perangkat lunak formulasi pakan yang canggih dan database nutrisi yang komprehensif. Algoritme formulasi berbiaya rendah tidak hanya mempertimbangkan harga bahan tetapi juga komposisi nutrisi,

ketersediaan hayati, dan metrik keberlanjutan (Rosle et al., 2024). Formulasi tingkat lanjut dapat menggunakan pemrograman linier atau jaringan saraf untuk mengoptimalkan komposisi nutrisi sambil meminimalkan biaya atau jejak lingkungan. Beberapa pabrik pakan modern juga mengimplementasikan kendali mutu secara *real-time* menggunakan spektroskopi NIR dan pembelajaran mesin untuk memastikan konsistensi komposisi nutrisi dan kualitas pakan sepanjang tahun.

7.3.2 Bioproses dan Fermentasi untuk Meningkatkan Kualitas Pakan

Fermentasi dan bioproses dari sumber protein alternatif telah menjadi kunci teknologi untuk meningkatkan bioavailabilitas nutrisi dan mengurangi faktor antinutrisi (Ajit et al., 2025). Fermentasi dengan bakteri asam laktat, spesies *Bacillus*, atau jamur seperti *Aspergillus* dapat meningkatkan pencernaan protein, menurunkan kandungan asam fitat, dan menghasilkan senyawa bioaktif seperti asam lemak rantai pendek dan peptida bioaktif yang memiliki efek imunostimulatori (Rosle et al., 2024). Penelitian pada bahan pakan yang berasal dari tumbuhan yang difermentasi menunjukkan peningkatan 15-30 persen dalam koefisien pencernaan nyata untuk protein dibandingkan dengan bahan fermentasi yang tidak melalui fermentasi (DAbramo, 2021).

Teknologi perawatan enzimatis adalah pendekatan komplementer yang menggunakan ketel enzim spesifik untuk memproses bahan-bahan alternatif. *Enzyme treatment* dapat mengurangi viskositas, meningkatkan pelepasan nutrisi, dan

menurunkan faktor antinutrisi. Khususnya, penggunaan selulase, hemiselulase, dan protease pada bahan tanaman dapat meningkatkan aksesibilitas nutrisi yang terikat dalam matriks serat. Perlakuan enzim juga dapat digunakan untuk meningkatkan pencernaan kitin dalam makanan serangga, dengan penambahan kitinase menghasilkan peningkatan signifikan dalam pencernaan protein dan kinerja pertumbuhan pada beberapa spesies ikan (Hasan et al., 2023). Kombinasi dari fermentasi dan perlakuan enzimatis dalam proses sekuensial dapat menghasilkan bahan berkualitas premium yang mendekati atau bahkan melampaui kualitas dari tepung ikan dalam hal bioavailabilitas nutrisi.

7.3.3 Suplementasi dan Formulasi dengan Aditif Fungsional

Suplementasi pakan dengan bahan tambahan fungsional telah menjadi strategi penting untuk mengkompensasi ketidakseimbangan nutrisi dalam formulasi berbasis bahan alternatif. Probiotik yang mengandung bakteri menguntungkan seperti spesies *Lactobacillus*, *Bacillus*, dan *Vibrio* terbukti meningkatkan daya cerna, mengurangi bakteri patogen dalam usus, dan meningkatkan respon imun (Hancz, 2024). Penambahan probiotik dalam pakan yang mengandung protein alternatif tingkat tinggi sering kali menunjukkan efek sinergis, dengan peningkatan kinerja pertumbuhan dan ketahanan terhadap penyakit dibandingkan dengan pakan tanpa probiotik.

Senyawa prebiotik seperti inulin, mannan oligosakarida (MOS), dan fruktooligosakarida (FOS) dapat meningkatkan proliferasi bakteri menguntungkan dalam usus, meningkatkan fungsi

barier usus, dan mengurangi kolonisasi patogen (Hancz, 2024). Aditif fitogenik yang mengandung minyak atsiri, ekstrak tumbuhan, dan polifenol memiliki sifat antimikroba dan dapat meningkatkan palatabilitas dari pakan. Mineral organik yang dikomplekskan dengan asam amino atau asam organik memiliki bioavailabilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan mineral anorganik konvensional, memungkinkan formulasi lebih optimal dengan kandungan mineral keseluruhan yang lebih rendah.

Suplementasi antioksidan juga semakin penting ketika menggunakan protein alternatif yang dapat memiliki stabilitas oksidatif yang lebih rendah. Penambahan vitamin E, vitamin C, dan antioksidan sintetik atau antioksidan alami dari ekstrak tumbuhan dapat mencegah oksidasi lipid dalam pakan dan meningkatkan kualitas daging dari ikan yang dihasilkan (Antache et al., 2025). Pakan modern akuakultur sering mengandung kombinasi kompleks dari berbagai aditif fungsional yang dipilih berdasarkan profil nutrisi spesifik dari bahan alternatif dan kriteria kinerja target.

7.3.4 Kontrol Kualitas dan Standardisasi Pakan Akuakultur

Penjaminan mutu dalam pakan akuakultur telah menjadi semakin canggih dengan penerapan berbagai metode pengujian dan parameter mutu. Analisis proksimat (protein, lipid, kadar air, abu, karbohidrat) masih menjadi standar pengujian dasar, namun saat ini ditambah dengan analisis yang lebih detail seperti profil asam amino, komposisi asam lemak, kandungan mineral, kadar vitamin, dan koefisien pencernaan (Rudoy et al., 2024). Pengujian pencernaan *in vitro* menggunakan simulasi cairan lambung dan usus dapat

memberikan informasi awal tentang bioavailabilitas nutrisi sebelum melakukan uji coba pemberian pakan in vivo yang mahal.

Pengujian mikotoksin telah menjadi keharusan dalam pengendalian kualitas, terutama untuk bahan yang disimpan atau diproduksi dalam kondisi dengan kelembapan tinggi, seperti biji-bijian dan beberapa sumber protein alternatif. Kehadiran aflatoksin, fumonisin, atau okratoksin dapat memiliki efek buruk pada kesehatan ikan dan respon imun. Pengujian logam berat seperti arsenik, kadmium, timbal, dan merkuri juga penting, terutama untuk serangga dan mikroalga yang dapat melakukan bioakumulasi kontaminan dari substrat atau media kultur mereka.

Pengujian mikrobiologi untuk mengetahui keberadaan bakteri patogen seperti *Salmonella*, *E. coli*, dan *Listeria* merupakan persyaratan standar dalam penjaminan mutu pakan (Hasan et al., 2023). Implementasi sistem HACCP dan sistem manajemen keamanan pangan ISO 22000 di pabrik pakan memastikan konsistensi keamanan dan kualitas. Sertifikasi internasional seperti sertifikasi pakan akuakultur dari ASC (*Aquaculture Stewardship Council*) semakin menjadi persyaratan dalam akuakultur modern, mendorong pabrik pakan untuk menerapkan praktik yang lebih ketat dan berkelanjutan dalam pengadaan dan pengolahan bahan pakan.

7.4 Kultur Pakan Alami dan Sistem Pemberian Otomatis

7.4.1 Teknologi Biofloc dan Sistem Produksi Pakan Ternak

Teknologi bioflok (BFT) telah merevolusi cara pakan alami dihasilkan dan dikonsumsi dalam sistem intensifikasi akuakultur. Dalam sistem bioflok, bakteri autotrofik dan heterotrofik, protozoa, dan alga membentuk flok organik yang tersuspensi dalam kolom air, menyediakan sumber pakan alami berkualitas tinggi untuk larva dan *juvenile* ikan (Rosle et al., 2024). Keuntungan dari BFT antara lain: (1) peningkatan total sistem produktivitas melalui fiksasi nitrogen dan perputaran bahan organik; (2) peningkatan rasio konversi pakan melalui konsumsi organisme pakan alami; (3) peningkatan kualitas air melalui serapan bakteri dari nitrogen dan produk limbah; dan (4) peningkatan respon imun melalui konsumsi senyawa bioaktif dalam flocs.

Manajemen BFT memerlukan kontrol yang presisi atas rasio C:N dalam sistem, biasanya melalui penambahan sumber karbohidrat seperti molase atau dedak padi. Pemantauan ukuran flok, komposisi, dan struktur komunitas bakteri semakin dapat dilakukan dengan teknik molekuler seperti sekuensing 16S rRNA, yang memungkinkan optimalisasi komposisi flok untuk spesies ikan target (Rosle et al., 2024). Sistem bioflok dapat dikombinasikan dengan sistem budidaya perikanan resirkulasi (RAS) untuk menciptakan sistem produksi *loop* tertutup yang sangat efisien yang meminimalkan penggunaan air dan dampak lingkungan.

Produksi pakan hidup, terutama artemia dan rotifer, masih sangat penting untuk pemeliharaan larva banyak spesies ikan laut, meskipun memerlukan infrastruktur khusus dan keahlian khusus. Teknologi dalam produksi *Artemia*, seperti pembiakan selektif untuk *strain* yang lebih produktif dan lebih padat nutrisi, serta metode kultur baru yang dioptimalkan, telah meningkatkan efisiensi produksi (Madkour et al., 2022). Pengayaan pakan hidup dengan asam lemak esensial dan mikronutrien sebelum pemberian pakan kepada larva ikan menjadi praktik standar, meningkatkan kinerja larva secara signifikan.

7.4.2 Sistem Pemberian Pakan Otomatis dan Teknologi Pemberian Pakan Presisi

Sistem otomasi pemberian pakan telah menjadi salah satu inovasi paling transformatif dalam akuakultur modern. Pengumpan otomatis yang dilengkapi dengan sensor dan algoritma cerdas dapat mengoptimalkan jumlah dan frekuensi pemberian pakan berdasarkan penilaian *real-time* dari respon ikan, suhu udara, dan kondisi lingkungan lainnya (Colombo & Turchini, 2021). Teknologi visi mesin memungkinkan *feeder* mendeteksi perilaku makan ikan, mengurangi jumlah pakan yang tidak dimakan (yang akan menjadi limbah dan polutan dalam sistem).

Sistem pemberian pakan presisi yang mengintegrasikan beberapa aliran data, termasuk distribusi ukuran ikan (diperoleh melalui analisis gambar atau estimasi berat), riwayat konsumsi pakan, laju pertumbuhan, dan proyeksi waktu panen, untuk mengoptimalkan formulasi pakan dan jadwal pemberian pakan

dinamis sepanjang siklus pertumbuhan (Colombo & Turchini, 2021). Pembelajaran mesin algoritma dapat memprediksi *feeding rate* optimal untuk memaksimalkan pertumbuhan dan efisiensi pakan, dengan potensi peningkatan 10-20 persen dalam rasio konversi pakan dan 5-15 persen peningkatan dalam pertumbuhan dibandingkan dengan *feeding* manual atau jadwal *feeding* tetap.

Sistem manajemen pakan berbasis *cloud* memungkinkan pemantauan dan pengendalian jarak jauh dari beberapa peternakan, dengan peringatan *real-time* untuk anomali dalam pola pemberian makan atau kondisi tangki. Analisis data dapat mengidentifikasi pola halus dalam perilaku ikan yang mengindikasikan penyakit tahap awal atau kekurangan nutrisi sebelum mereka menjadi masalah yang signifikan (Colombo & Turchini, 2021). Integrasi sistem pemberian pakan yang tepat dengan formulasi nutrisi yang dioptimalkan untuk protein alternatif menciptakan manfaat sinergis yang secara substansial dapat meningkatkan profitabilitas dan keberlanjutan dari operasi akuakultur.

7.4.3 Strategi Pemberian Makanan yang Disesuaikan untuk Spesies dan Sistem Berbeda

Strategi pemberian pakan yang dikustomisasi berdasarkan biologi spesifik dari spesies ikan, sistem budidaya, dan tujuan produksi telah menjadi praktik terbaik dalam akuakultur modern. Untuk ikan karnivor seperti salmon, strategi pemberian pakan dapat disesuaikan dengan siklus sirkadian alami mereka, dengan beberapa porsi makanan kecil sepanjang hari menunjukkan efisiensi pakan yang unggul dibandingkan dengan pemberian pakan sekali atau dua

kali per hari (Arago et al., 2022). Untuk ikan omnivora seperti nila, pendekatan pemberian pakan ganda dengan pakan komersial di pagi hari dan pakan hidup atau organisme makanan alami di sore hari dapat meningkatkan pemanfaatan nutrisi dan mengurangi biaya pakan.

Pemberian pakan khusus tangki dapat diimplementasikan dengan sistem otomatis yang dapat mengalokasikan pakan secara mandiri ke setiap tangki dalam fasilitas penetasan atau pembesaran, berdasarkan kepadatan ikan, distribusi ukuran, dan laju pertumbuhan. Strategi pemberian pakan berbasis kepadatan mengakui bahwa kepadatan ikan mempengaruhi persaingan untuk mendapatkan makanan dan tingkat stres sosial, dengan kepadatan ikan yang lebih tinggi memerlukan penyesuaian dalam laju pemberian pakan dan formulasi nutrisi untuk mempertahankan laju pertumbuhan yang sebanding (Colombo & Turchini, 2021). Strategi pemberian makan sementara, seperti program puasa atau program melewati makan, dapat meningkatkan kualitas air, mengurangi limbah, dan bahkan meningkatkan ketahanan terhadap penyakit melalui aktivasi jalur sistem kekebalan tubuh.

7.4.4 Integrasi dengan Pemantauan dan Analisis Data

Integrasi sistem pemberian pakan otomatis dengan infrastruktur pemantauan komprehensif telah membuka era "pertanian cerdas" dalam akuakultur. Sensor untuk memantau parameter kualitas air (pH, oksigen terlarut, amonia, nitrat, salinitas, suhu), perilaku ikan (aktivitas makan, pola pergerakan), dan kondisi tangki (intensitas cahaya, kecepatan arus) dapat dikombinasikan

dengan data aktivitas pemberian makan untuk menciptakan gambaran holistik dari kondisi tangki dan kesehatan ikan (Dayiolu & Trker, 2021).

Analisis tingkat lanjut menggunakan pembelajaran mesin dan kecerdasan buatan dapat mengidentifikasi pola yang sulit dideteksi melalui pengamatan manual. Misalnya, pola asupan pakan yang berubah dapat menjadi indikator pertama dari penyakit menular sebelum gejala klinis menjadi jelas, memungkinkan intervensi dini. Model prediksi pertumbuhan yang dikembangkan pada data historis pertanian dapat mengoptimalkan jadwal panen dan perencanaan ke depan untuk pemanfaatan kapasitas (Dayiolu & Trker, 2021). Teknologi *Blockchain* sedang dieksplorasi untuk membuat catatan transparan dari penggunaan pakan, data pertumbuhan, dan kejadian kesehatan, yang dapat meningkatkan ketertelusuran dan mendukung program sertifikasi untuk produk akuakultur berkelanjutan.

7.5 Optimalisasi Konversi Pakan dan Pemberian Presisi

7.5.1 Rasio Konversi Pakan (FCR) dan Efisiensi Pakan sebagai Metrik Kunci

Rasio konversi pakan (FCR) telah lama menjadi indikator kinerja utama dalam akuakultur, didefinisikan sebagai rasio antara berat pakan yang diberikan terhadap berat ikan yang diproduksi. Akuakultur modern terus berusaha untuk menurunkan FCR melalui berbagai strategi, termasuk optimalisasi formulasi nutrisi, pemberian

pakan yang presisi, dan seleksi genetik untuk strain yang tumbuh cepat (Rosle et al., 2024). Ikan karnivor modern seperti salmon dapat mencapai FCR terbaik 1.0-1.2, yang berarti mereka mengkonversi hampir setiap unit pakan menjadi bobot tubuh yang dapat dipanen.

Selain FCR sederhana, metrik yang lebih canggih seperti rasio efisiensi protein (PER), yang mengukur penambahan berat badan per unit protein yang dikonsumsi, dan efisiensi energi, yang mengukur pemanfaatan energi untuk pertumbuhan, memberikan wawasan yang lebih bernuansa tentang efisiensi dari berbagai formulasi pakan. Pada pakan yang mengandung protein alternatif tingkat tinggi, PER sering lebih rendah daripada pakan berbasis tepung ikan tradisional, menunjukkan *trade-off* antara keberlanjutan dan efisiensi produksi jangka pendek (Liland et al., 2021). Penelitian telah menunjukkan bahwa dengan formulasi, suplementasi, dan optimalisasi strategi pemberian pakan yang cermat, FCR dan PER pada pakan dengan tingkat tinggi dari serangga atau protein alternatif lainnya dapat disamakan dengan pakan konvensional.

7.5.2 Optimalisasi Pencernaan dan Ketersediaan Hayati Nutrien

Kecernaan unsur hara merupakan aspek penting dari efisiensi pakan, karena unsur hara yang tidak dicerna akan menjadi limbah dan polutan dalam sistem akuakultur. Koefisien cerna semu (ADC) untuk protein dan lipid adalah metrik standar yang diukur dalam percobaan pemberian pakan, tetapi semakin banyak perhatian diberikan pada pencernaan sejati dan retensi nutrisi, yang memberikan gambaran yang lebih akurat tentang pemanfaatan nutrisi pada tingkat seluler (Ali et al., 2025). Teknologi komputasi

dapat memprediksi pencernaan bahan berdasarkan struktur kimia dan komposisi nutrisi, memungkinkan evaluasi cepat dari calon bahan tanpa melakukan uji pemberian makanan secara penuh.

Ketersediaan hayati dari mineral, vitamin, dan elemen pelacak adalah parameter yang semakin dianggap penting untuk kesehatan ikan dan efisiensi produksi yang optimal. Mineral organik dan vitamin khelat memiliki bioavailabilitas yang lebih tinggi dibandingkan bentuk anorganik, memungkinkan pengurangan dari keseluruhan suplementasi mineral dalam pakan (Ali et al., 2025). *Pretreatment* dari bahan-bahan alternatif dengan enzim untuk meningkatkan pemecahan dinding sel dan pelepasan nutrisi dapat secara signifikan meningkatkan bioavailabilitas dari nutrisi yang tersimpan dalam struktur sel. Fermentasi dari bahan nabati tidak hanya meningkatkan daya cerna tetapi juga dapat menghasilkan metabolit bioaktif yang meningkatkan pemanfaatan nutrisi.

7.5.3 Hubungan antara Kualitas Pakan, Kesehatan Ikan, dan Kualitas Produk

Nutrisi yang dioptimalkan tidak hanya meningkatkan efisiensi pertumbuhan tetapi juga memiliki efek besar pada kesehatan ikan, ketahanan terhadap penyakit, dan kualitas produk akhir. Ikan yang diberi pakan dengan profil nutrisi yang seimbang menunjukkan respon imun yang unggul, dengan titer antibodi yang lebih tinggi dan ketahanan penyakit yang lebih baik terhadap patogen menular (Arago et al., 2022). Kualitas fillet juga dipengaruhi oleh pakan, dengan komposisi nutrisi dalam otot mencerminkan komposisi pakan yang dikonsumsi. Asam lemak

dalam daging ikan erat terkait dengan asam lemak dalam pakan, sehingga pakan yang diformulasikan dengan profil asam lemak spesifik dapat menghasilkan produk dengan kandungan nutrisi yang diinginkan (Evrendilek, 2024).

Warna daging adalah parameter kualitas yang dipengaruhi oleh kandungan karotenoid dalam pakan, dengan pigmen dari alga atau bahan tambahan pakan lainnya dapat digunakan untuk mencapai warna daging yang diinginkan bahkan ketika menggunakan protein alternatif yang mungkin tidak memiliki kadar karotenoid yang sama seperti bahan tradisional (Antache et al., 2025). Rasa dan palatabilitas dari produk akhir juga dapat dipengaruhi oleh pakan, dengan beberapa protein alternatif (terutama beberapa serangga makanan) dapat mengubah profil rasa dari *fillet* jika digunakan pada tingkat substitusi yang tinggi, meskipun ini adalah pertimbangan yang lebih marginal untuk produk berkualitas premium.

7.5.4 Model Optimasi dan Metrik Keberlanjutan dalam Formulasi Pakan

Formulasi pakan modern semakin mengintegrasikan metrik keberlanjutan yang melampaui formulasi sederhana berbiaya rendah. Metodologi penilaian siklus hidup (LCA) dapat mengukur dampak lingkungan dari berbagai bahan pakan, dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti penggunaan lahan, penggunaan air, emisi gas rumah kaca, potensi eutrofikasi, dan dampak keanekaragaman hayati (McKuin et al., 2023). Formulasi pakan dapat dioptimalkan tidak hanya untuk kebutuhan biaya dan

nutrisi tetapi juga untuk meminimalkan dampak lingkungan, menciptakan solusi *win-win* untuk profitabilitas industri dan kelestarian lingkungan.

Algoritma genetika dan teknik optimasi multi-tujuan dapat memecahkan masalah optimasi kompleks yang mempertimbangkan beberapa tujuan yang bersaing, seperti minimalisasi biaya, optimalisasi profil nutrisi, dan minimalisasi jejak lingkungan secara simultan (Rosle et al., 2024). Beberapa pabrik pakan modern saat ini menawarkan produk pakan dengan klaim keberlanjutan yang eksplisit, didukung oleh data LCA dan sertifikasi dari badan independen, memenuhi permintaan yang terus meningkat dari konsumen yang sadar dan peternakan akuakultur yang memerlukan sertifikasi.

Teknologi *Blockchain* sedang dikembangkan untuk menciptakan rantai pasokan yang transparan untuk bahan pakan, memungkinkan pelacakan dari sumber bahan baku, metode pemrosesan, dan kredensial keberlanjutan di sepanjang rantai nilai (Hua et al., 2019). Hal ini memungkinkan penetapan harga premium untuk pakan yang bersumber secara berkelanjutan dan dapat mendorong perbaikan berkelanjutan dalam praktik keberlanjutan di seluruh industri pakan. Integrasi dari sistem pemberian pakan yang presisi dengan formulasi pakan yang dioptimalkan secara keberlanjutan menciptakan jalur menuju akuakultur yang benar-benar berkelanjutan yang dapat memenuhi permintaan global akan protein akuatik yang terus meningkat tanpa mengorbankan integritas lingkungan.

Bab 8: Manajemen Kesehatan:

Biosekuriti Menyeluruh

Rizka Helisia Putri, S.Pi., M.Si.

8.1 Penyakit Emerging dan Pengawasan Patogen

8.1.1 Definisi dan Karakteristik Penyakit Emerging

Penyakit emerging atau penyakit yang muncul adalah penyakit menular yang baru teridentifikasi atau telah mengalami peningkatan insiden dalam populasi ikan budidaya dalam dua dekade terakhir (Alathari et al., 2024). Penyakit ini menjadi ancaman signifikan terhadap kelangsungan sektor akuakultur global karena kemampuannya menyebar dengan cepat, menyebabkan kematian yang tinggi, dan mengakibatkan kerugian ekonomi yang besar bagi petani. Karakteristik utama dari penyakit yang muncul adalah etiologi yang kompleks, sering kali melibatkan interaksi antara patogen, penyakit, dan faktor lingkungan yang memfasilitasi penyakit (Costa et al., 2024).

Berbagai jenis patogen dapat menjadi penyakit yang muncul, termasuk bakteri seperti *Edwardsiella piscicida*, virus seperti *Tilapia Lake Virus*, dan parasit yang sebelumnya jarang dilaporkan (Leung et al., 2019). Peningkatan intensifikasi

akuakultur, kepadatan penebaran yang tinggi, manajemen udara yang kurang optimal, dan perubahan iklim global semuanya berkontribusi pada kemunculan dan penyebaran penyakit baru dalam sistem budidaya (Costa et al., 2024). Identifikasi cepat dan akurat terhadap penyakit yang muncul sangat penting untuk penerapan tindakan pengendalian yang efektif dan pencegahan penyebaran lebih lanjut ke lokasi budidaya lain (Alathari et al., 2024).

8.1.2 Sistem Surveilans Patogen dan Pemantauan Kesehatan

Sistem surveilans patogen yang efektif merupakan fondasi manajemen kesehatan proaktif dalam budidaya perairan modern. Surveilans melibatkan pengumpulan data sistematis tentang keberadaan, prevalensi, dan distribusi patogen dalam populasi ikan dan lingkungan budidaya (Oliveira et al., 2024). Pendekatan surveilans yang komprehensif mencakup pengujian sampel ikan, pemantauan kondisi produksi, dan analisis lingkungan untuk mendeteksi patogen sebelum menyebabkan penyakit klinis yang parah (Aly & Fathi, 2024).

Teknologi *syndromic surveilans* merupakan inovasi terbaru dalam pemantauan kesehatan ikan, yang menggunakan data produksi *real-time* seperti mortalitas harian dan perubahan perilaku untuk mendeteksi kemungkinan wabah penyakit (Oliveira et al., 2024). Sistem ini menggabungkan model statistik prediktif dengan pemantauan data berkelanjutan untuk mengidentifikasi anomali yang mungkin mengindikasikan masalah kesehatan (Aly & Fathi, 2024). Program surveilans yang baik juga harus mencakup pelaporan wajib kepada otoritas regulasi, berbagi informasi dengan

petani lain, dan integrasi dengan data dasar nasional dan internasional untuk melacak penyakit (Thrush et al., 2011).

8.1.3 Epidemiologi Patogen yang Muncul dalam Akuakultur

Epidemiologi penyakit yang muncul dalam akuakultur sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan, manajemen, dan karakteristik biologi patogen itu sendiri (Rigos et al., 2025). Beberapa patogen yang muncul seperti *Vibrio campbellii* menunjukkan prevalensi yang bergantung pada musim, dengan tingkat infeksi yang lebih tinggi selama musim panas ketika suhu udara meningkat (Aly et al., 2023). Pemahaman tentang hubungan antara parameter kualitas udara dan tingkat infeksi penyakit sangat penting; Misalnya, konsentrasi amonia yang tinggi terbukti menjadi prediktor signifikan terhadap kehadiran *V. campbellii* dalam sistem budidaya (Aly et al., 2023).

Penyebaran penyakit yang muncul antar lokasi budidaya sering terjadi melalui berbagai jalur transmisi, termasuk gerakan ikan hidup yang terinfeksi, udara budidaya yang terkontaminasi, dan peralatan yang tidak didisinfeksi dengan benar (Mordecai et al., 2021). Penelitian epidemiologi menggunakan filogeografi molekuler telah mengungkapkan bahwa penyebaran beberapa virus penting, seperti *Piscine orthoreovirus*, secara global difasilitasi oleh ekspansi budidaya ikan air dingin dan perdagangan ikan internasional (Mordecai et al., 2021). Adaptasi patogen terhadap kondisi lingkungan baru dan pembentukan populasi patogen yang berbeda secara genetik merupakan tantangan tambahan dalam pengendalian penyakit yang muncul (Jacobsen et al., 2024).

8.1.4 Pemantauan dan Respons Wabah

Respons yang cepat dan terkoordinasi terhadap wabah penyakit merupakan kunci untuk meminimalkan dampak ekonomi dan ekologis (Aly & Fathi, 2024). Rencana penanggulangan wabah yang efektif harus mencakup prosedur isolasi dan karantina, protokol disinfeksi, komunikasi dengan regulasi otoritas, dan strategi pemulihan yang jelas (Aly & Fathi, 2024). Pengimplementasian sistem peringatan dini yang mengintegrasikan data surveilans dengan pemodelan prediktif memungkinkan petani untuk mengambil tindakan pencegahan sebelum wabah terjadi (Oliveira et al., 2024).

Pemantauan berkelanjutan setelah wabah terdeteksi sangat penting untuk memastikan bahwa patogen telah sepenuhnya dieliminasi dan tidak ada risiko infeksi ulang (Aly & Fathi, 2024). Basis data yang mencatat riwayat wabah, patogen yang terdeteksi, dan strategi pengendalian yang digunakan memberikan informasi berharga untuk pembelajaran dan peningkatan berkelanjutan dalam manajemen kesehatan (Thrush et al., 2011). Kolaborasi antara petani, lembaga penelitian, dan otoritas pemerintah memfasilitasi respons yang terkoordinasi dan berbagi pengetahuan tentang strategi pengendalian yang telah terbukti efektif (Aly & Fathi, 2024).

8.2 Diagnostik Molekuler dan Deteksi Cepat

8.2.1 Teknik Amplifikasi Asam Nukleat Berbasis *Real-time*

Real-time Polymerase Chain Reaction (qPCR) telah menjadi standar emas dalam diagnostik patogen ikan karena sensitivitas dan spesifisitasnya yang tinggi (Apostolidi et al., 2024). Teknik ini memungkinkan deteksi dan kuantifikasi secara simultan dari materi genetik patogen dalam waktu singkat, biasanya dalam 1-2 jam, dibandingkan dengan metode kultur tradisional yang memerlukan waktu berhari-hari (Apostolidi et al., 2024). Pengembangan multipleks qPCR memungkinkan deteksi simultan dari beberapa patogen dalam satu reaksi, meningkatkan efisiensi diagnostik dan mengurangi waktu serta biaya laboratorium (Apostolidi et al., 2024).

Loop-Mediated Isothermal Amplification (LAMP) merupakan alternatif yang menjanjikan untuk qPCR, yang dapat dilakukan pada suhu konstan tanpa memerlukan thermal cycler mahal (Kulkarni et al., 2009). Sensitivitas LAMP dapat mencapai 10 pg/mL DNA, meskipun dapat berkurang dalam kehadiran inhibitor seperti lendir ikan (Kulkarni et al., 2009). Keuntungan utama LAMP adalah kemudahan operasional dan transportasi dalam pengaturan laboratorium terbatas, menjadikannya ideal untuk diagnosis cepat di lapangan atau di fasilitas budidaya dengan infrastruktur diagnostik minimal (Kulkarni et al., 2009).

8.2.2 Diagnostik Berbasis CRISPR dan Sistem Deteksi Cepat

Teknologi CRISPR/Cas telah merevolusi deteksi patogen ikan dengan menyediakan platform yang cepat, spesifik, dan sensitif

untuk mengidentifikasi patogen di lapangan (Caldern et al., 2024). Sistem CRISPR/Cas13a (SHERLOCK) mampu mendeteksi DNA dan RNA dari bakteri patogen seperti *Yersinia ruckeri* dalam waktu kurang dari satu jam dengan sensitivitas yang sebanding dengan qPCR konvensional (Caldern et al., 2024). Aplikasi integrasi CRISPR/Cas12a dengan *Recombinase-Aided Amplification* (RAA) memungkinkan deteksi virus ikan penting seperti *Cyprinid Herpesvirus 2* dalam waktu sekitar 60 menit dengan batas deteksi serendah 10 kopi per reaksi (Hou et al., 2025).

Keunggulan utama sistem berbasis CRISPR adalah dapat diintegrasikan dengan *lateral flow assays* untuk visualisasi hasil yang mirip dengan rapid test medis, memungkinkan non-spesialis untuk menginterpretasi hasil (Caldern et al., 2024). Platform ini juga dapat dikombinasikan dengan teknologi konsentrasi virus, seperti *flokulasi besi*, untuk meningkatkan kemampuan deteksi patogen dalam sampel lingkungan budidaya udara (Hou et al., 2025). Meskipun sangat menjanjikan, implementasi teknologi CRISPR masih memerlukan validasi lebih lanjut dan standarisasi protokol untuk menerapkan luas dalam industri akuakultur (Caldern et al., 2024).

8.2.3 Metatranskriptomik dan Next-Generation Sequencing untuk Penemuan Patogen

Metatranskriptomik yang tidak memilih menggunakan pengurutan RNA total untuk mengidentifikasi patogen tanpa memerlukan pengetahuan sebelumnya tentang agen penyakit yang menyebabkan wabah (Costa et al., 2024). Pendekatan ini sangat

berharga dalam penyelidikan wabah dengan etiologi yang tidak jelas, karena dapat mendeteksi berbagai jenis patogen bakteri, virus, dan jamur secara bersamaan dalam satu analisis (Costa et al., 2024). Teknologi *Nanopore sequencing* menyediakan sequencing gen 16S rRNA full-length yang memungkinkan identifikasi patogen dengan resolusi spesies dan bahkan strain, memberikan informasi epidemiologis yang detail (Valenzuela-Miranda et al., 2025).

Integrasi metatranscriptomik dengan teknologi *Next-Generation Sequencing (NGS)* membantu tidak hanya identifikasi patogen tetapi juga analisis respon imun secara paralel, memberikan wawasan tentang mekanisme patogenesis dan interaksi host-patogen (Costa et al., 2024). Tantangan praktis dalam penerapan teknologi ini termasuk kebutuhan akan keahlian bioinformatik, infrastruktur komputasi yang mahal, dan standarisasi protokol untuk memastikan hasil yang dapat diandalkan dan dapat direproduksi (Costa et al., 2024). Namun, dengan pesatnya perkembangan komputasi awan dan alat bioinformatika yang mudah digunakan, teknologi ini semakin mudah diakses untuk fasilitas diagnostik di negara-negara dengan ekonomi menengah ke bawah.

8.2.4 Diagnostik Miniatur dan Pengujian di Tempat Perawatan

Pengembangan perangkat diagnostik miniatur dan sistem pengujian di titik perawatan (POCT) merupakan revolusi dalam diagnostik ikan budidaya, memungkinkan deteksi patogen di lokasi budidaya tanpa mengirim sampel ke laboratorium yang dimaksudkan (Rieder et al., 2025). Teknologi mikrofluida yang mengintegrasikan amplifikasi asam nukleat dan deteksi dalam chip

kecil berukuran beberapa sentimeter memungkinkan hasil dalam waktu kurang dari satu jam dengan sampel minimal (Rieder et al., 2025). Sistem portabel yang berbasis microfluidic telah dikembangkan untuk mendeteksi cepat dari virus penting seperti *Megalocytivirus pagrus* dengan sensitivitas 92.22% dan spesifisitas 100% (Lee et al., 2026).

Integrasi teknologi POCT dengan komunikasi nirkabel dan manajemen data berbasis cloud memungkinkan pembagian hasil diagnostik secara *real-time* dengan dokter hewan atau konsultan ahli, meningkatkan kualitas interpretasi diagnostik (Rieder et al., 2025). Tantangan dalam pengembangan dan implementasi POCT termasuk perlunya standardisasi, validasi klinik yang ekstensif, dan persetujuan regulasi sebelum dapat digunakan secara luas dalam industri (Rieder et al., 2025). Dengan terus berkembangnya teknologi sensor dan miniaturisasi elektronik, diprediksi bahwa POCT akan menjadi standar dalam diagnostik ikan budidaya dalam dekade mendatang, terutama di negara dengan infrastruktur laboratorium terbatas (Rieder et al., 2025).

8.3 Kedokteran Preventif dan Protokol Biosekuriti

8.3.1 Prinsip-Prinsip Biosekuriti dalam Budidaya Perairan

Biosekuriti mengacu pada serangkaian tindakan yang dirancang untuk mencegah introduksi, penyebaran, dan persistensi patogen dalam fasilitas budidaya (Aly & Fathi, 2024). Protokol biosekuriti yang efektif mencakup tindakan biosekuriti fisik seperti

pemasangan jaring burung, pagar, dan pengolahan air untuk mencegah masuknya patogen dari luar, serta tindakan biosekuriti operasional seperti segregasi umur, jadwal penebaran all-in/all-out, dan disinfeksi alat dan fasilitas (Aly & Fathi, 2024). Biosekuriti biologi, yang fokus pada peningkatan ketahanan kekebalan tubuh melalui nutrisi, probiotik, dan vaksinasi, juga merupakan komponen krusial dari strategi pencegahan penyakit yang holistik (Aly & Fathi, 2024).

Tingkat keberhasilan biosekuriti bergantung pada konsistensi dalam implementasi dan buy-in dari seluruh anggota tim budidaya, dari pekerja harian hingga manajemen (Aly & Fathi, 2024). Program pelatihan reguler tentang protokol biosekuriti dan pentingnya kea pada perincian terhadap prosedur sangat penting untuk memastikan kepatuhan (Aly & Fathi, 2024). Audit dan penilaian secara berkala terhadap penerapan biosekuriti identifikasi celah dan area untuk perbaikan, memastikan bahwa standar tetap tinggi (Aly & Fathi, 2024).

8.3.2 Manajemen Kualitas Udara dan Pengkondisian Lingkungan

Kualitas udara yang optimal merupakan fondasi kesehatan ikan dan merupakan faktor kunci dalam pencegahan wabah penyakit (Cain, 2022). Parameter penting seperti oksigen terlarut, pH, amonia, nitrit, dan suhu harus dilindungi secara teratur dan dijaga dalam kisaran yang optimal untuk spesies yang dibudidayakan (Cain, 2022). Mempertahankan kualitas udara yang konsisten mengurangi stres pada ikan, memperkuat sistem imun

mereka, dan membuat mereka lebih tahan terhadap infeksi patogen (Cain, 2022).

Sistem resirkulasi akuakultur dan teknologi bioflok menyediakan kontrol yang lebih baik atas parameter lingkungan, mengurangi risiko wabah dan memungkinkan kepadatan stok yang lebih tinggi dengan mengelola produk limbah secara lebih efektif (Naseer et al., 2024). Penerapan sistem aerasi yang memadai, pertukaran air yang terencana, dan biofiltrasi untuk menghilangkan kelebihan nutrisi adalah strategi penting untuk menjaga kualitas air yang optimal (Cain, 2022). Pemantauan terus-menerus menggunakan sensor modern dan sistem pencatatan data memungkinkan deteksi dini dari parameter penyimpangan dan tindakan perbaikan yang cepat (Naseer et al., 2024).

8.3.3 Program Karantina dan Manajemen Biosekuriti Akses

Program pembatasan yang ketat untuk ikan yang baru tiba merupakan pembatasan pertama terhadap introduksi patogen baru (Aly & Fathi, 2024). Ikan yang berasal dari sumber eksternal harus ditempatkan di fasilitas karantina terpisah dengan sistem udara yang independen untuk jangka waktu minimal 2-4 minggu, selama waktu itu ikan dapat dimonitor untuk tanda-tanda penyakit (Aly & Fathi, 2024). Pengujian diagnostik sampel dari ikan dalam karantina untuk patogen yang paling penting secara ekonomi dan epidemiologis sangat direkomendasikan untuk memastikan ikan yang masuk bebas patogen (Aly & Fathi, 2024).

Pembatasan akses ke fasilitas budidaya hanya untuk personel yang esensial, penerapan tempat baskom dan tempat cuci tangan di

pintu masuk, serta penggunaan pakaian dan alas kaki khusus untuk mengurangi penularan patogen melalui kontak dengan lingkungan luar (Aly & Fathi, 2024). Pengunjung, termasuk pemasok, dokter hewan, dan inspektur, harus mengikuti protokol biosekuriti yang sama dan diberikan informasi tentang area terlarang dan prosedur yang harus diikuti (Aly & Fathi, 2024). Dokumentasi dari semua pengunjung dan peralatan yang masuk ke fasilitas membantu dalam menelusuri kembali jika wabah penyakit terjadi, memungkinkan identifikasi dari sumber infeksi potensial (Aly & Fathi, 2024).

8.3.4 Strategi Manajemen Pakan dan Pencegahan Penyakit Melalui Nutrisi

Kualitas pakan yang tinggi dan gizi seimbang sangat penting untuk pemeliharaan fungsi kekebalan tubuh yang optimal dan ketahanan terhadap penyakit (Cain, 2022). Pakan berkualitas tinggi harus mengandung kadar asam amino esensial, lipid, karbohidrat, vitamin, dan mineral yang memadai dalam proporsi yang sesuai untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangan sistem kekebalan tubuh (Cain, 2022). Penyimpanan pakan yang tepat untuk mencegah ketengikan dari lipid dan kontaminasi dari jamur atau bakteri adalah penting untuk memastikan keamanan dan kemanjuran pakan (Cain, 2022).

Pulse feeding dengan pakan fungsional yang mengandung imunostimulan dapat dilakukan secara strategis menjelang periode stres tinggi seperti transportasi atau perubahan kepadatan stocking untuk meningkatkan ketahanan terhadap penyakit (Cain, 2022). Namun, pemberian pakan berkelanjutan dengan pola makan kaya

imunostimulan tidak selalu menghasilkan manfaat yang berkelanjutan dan dapat menjadi mahal jika dilakukan sepanjang tahun (Cain, 2022). Optimasi jadwal dan jumlah pemberian pakan untuk mengurangi pakan yang tidak dimakan yang dapat menurunkan kualitas air dan mendorong pertumbuhan bakteri patogen adalah aspek penting dari manajemen operasional (Cain, 2022).

8.4 Probiotik, Imunostimulan, dan Program Vaksinasi

8.4.1 Mekanisme Aksi Probiotik dan Seleksi Strain

Probiotik adalah mikroorganisme hidup yang, ketika diberikan dalam jumlah yang memadai, memberikan manfaat kesehatan bagi inang (Meskhi et al., 2025). Mekanisme kerja probiotik dalam sistem gastrointestinal ikan meliputi kompetisi dengan patogen untuk mendapatkan nutrisi dan lokasi lokalisasi, produksi zat antimikroba seperti bakteriosin, dan modulasi respon imun melalui interaksi dengan sel epitel usus (Meskhi et al., 2025). Seleksi strain sangat penting karena kemanjuran probiotik sangat bergantung pada spesies, dan strain yang efektif untuk satu spesies ikan mungkin tidak bekerja untuk spesies lain (Torres-Maravilla et al., 2024).

Bakteri asam laktat seperti *Leuconostoc mesenteroides* dan *Lactococcus lactis* telah menunjukkan khasiat yang tinggi dalam meningkatkan kinerja pertumbuhan, parameter kekebalan, dan

ketahanan terhadap penyakit dalam berbagai spesies ikan budidaya seperti ikan lele dan nila (Paritova et al., 2025). Spesies *Bacillus* sebagai probiotik pembentuk spora memiliki keunggulan yang signifikan termasuk kemampuan untuk tetap bertahan dalam pakan kering dan dalam pH asam dari lambung ikan (Docando et al., 2022). Penapisan dan karakterisasi kandidat strain probiotik yang ekstensif menggunakan pengujian *in vitro* dan *in vivo* diperlukan untuk memastikan bahwa strain yang dipilih aman untuk ikan dan tidak berbahaya bagi lingkungan (Torres-Maravilla et al., 2024).

8.4.2 Aplikasi Immunostimulan dan Aditif Pakan Fungsional

Imunostimulan adalah senyawa yang meningkatkan respon imun spesifik atau non-spesifik pada ikan, meningkatkan kemampuan mereka untuk melawan dan memulihkan infeksi (Tkaczenko & Kurhaluk, 2025). *Beta-glukan*, yang merupakan diekstrak polisakarida kompleks dari ragi, jamur, dan alga, adalah salah satu imunostimulan yang paling banyak dipelajari dan telah menunjukkan manfaat yang konsisten dalam meningkatkan fungsi kekebalan dan ketahanan terhadap penyakit (Tkaczenko & Kurhaluk, 2025). Mekanisme aksi *beta-glukan* melibatkan aktivasi makrofag dan neutrofil melalui keterlibatan dengan reseptor seperti Dectin-1 dan reseptor mirip tol pada sel imun (Tkaczenko & Kurhaluk, 2025).

Imunostimulan lainnya termasuk nukleotida, yang meningkatkan pematangan usus dan pengembangan respon imun, serta asam lemak tak jenuh poli (PUFA) yang penting untuk fungsi sel imun dan regulasi respon inflamasi (Cain, 2022). Kombinasi dari

beberapa imunostimulan dalam formulasi sinergis dapat menghasilkan manfaat yang lebih besar dibandingkan dengan aditif tunggal, menciptakan peningkatan kekebalan tubuh yang komprehensif (Tkaczenko & Kurhaluk, 2025). Tantangan dalam penerapan imunostimulan adalah variabilitas dalam kemanjuran tergantung pada kondisi lingkungan, status kesehatan ikan, dan interaksi dengan komponen pakan lainnya (Tkaczenko & Kurhaluk, 2025).

8.4.3 Program Vaksinasi dalam Budidaya Perairan

Vaksinasi adalah salah satu alat paling efektif untuk pencegahan penyakit dalam sistem intensif akuakultur (Rathor & Swain, 2024). Vaksin yang tersedia untuk ikan termasuk vaksin hidup yang dilemahkan, vaksin tidak aktif, vaksin subunit, vaksin DNA, dan vaksin RNA, masing-masing dengan karakteristik unik mengenai kemanjuran, keamanan, dan kemudahan pemberian (Rathor & Swain, 2024). Vaksinasi perendaman adalah metode yang paling praktis untuk vaksinasi massal pada ikan juvenil, sementara vaksinasi injeksi digunakan untuk ikan yang lebih besar namun padat karya (Rathor & Swain, 2024).

Waktu dan frekuensi vaksinasi sangat penting untuk memaksimalkan respon imun protektif, terutama karena ikan muda yang belum matang secara imunologi mungkin tidak mampu meningkatkan respon yang memadai terhadap vaksin (Rathor & Swain, 2024). Pengembangan vaksin polivalen yang melindungi terhadap berbagai patogen secara bersamaan adalah tujuan yang penting untuk mengurangi penanganan stres dan kebutuhan tenaga

kerja (Rathor & Swain, 2024). Batik dari efikasi vaksin termasuk imunosupresi yang disebabkan oleh patogen yang bersirkulasi dalam lingkungan dan stressor lingkungan yang dapat mengurangi respon imun terhadap vaksin (Miryala & Swain, 2025).

8.4.4 Integrasi Probiotik dan Imunostimulan dengan Strategi Vaksinasi

Kombinasi dari probiotik, imunostimulan, dan vaksinasi dapat menghasilkan efek sinergis dalam peningkatan imunitas dan ketahanan terhadap penyakit (Stefano et al., 2025). Probiotik yang digunakan sebagai bahan pembantu dalam vaksin oral berbasis spora dapat meningkatkan imunogenisitas dari antigen dan memfasilitasi respons imun mukosa (Stefano et al., 2025). Penelitian menunjukkan bahwa ikan yang diberi probiotik sebelum vaksinasi menunjukkan titer antibodi yang lebih tinggi dan perlindungan yang lebih besar terhadap tantangan patogen berikutnya dibandingkan dengan ikan yang hanya divaksin tanpa suplementasi probiotik (Abdel-Latif et al., 2026).

Sinbiotik, kombinasi dari probiotik dan prebiotik yang secara selektif merangsang pertumbuhan bakteri menguntungkan, menunjukkan peningkatan kemanjuran dalam peningkatan kesehatan usus dan ketahanan terhadap penyakit dibandingkan dengan komponen tunggal (Puri et al., 2022). Sinergis mekanisme meliputi penyediaan lingkungan optimal untuk proliferasi probiotik (melalui prebiotik) sambil secara simultan meningkatkan respon imun (melalui probiotik) (Puri et al., 2022). Implementasi yang sukses dari pendekatan terpadu ini memerlukan perencanaan yang

cermat mengenai waktu, dosis, dan kompatibilitas dari produk yang berbeda untuk memastikan manfaat yang optimal (Stefano et al., 2025).

8.5 Budidaya Tanpa Antibiotik dan Resistensi Antimikroba

8.5.1 Masalah Resistensi Antimikroba dalam Akuakultur

Penggunaan antibiotik yang berlebihan dan tidak tepat dalam budidaya perikanan telah mengakibatkan munculnya patogen yang resistan terhadap beberapa obat yang dapat mengkompromikan kemanjuran pengobatan dan menimbulkan risiko signifikan terhadap kesehatan manusia melalui transmisi rantai makanan (Miranda et al., 2018). Beberapa penelitian epidemiologis telah menunjukkan bahwa strain patogen ikan yang resisten terhadap berbagai kelas antibiotik sekarang umum ditemukan di fasilitas budidaya perikanan di berbagai negara, terutama di daerah dengan peraturan yang lemah terhadap penggunaan antibiotik (Miranda et al., 2018). Transfer gen horizontal antara patogen dan bakteri lingkungan dapat meningkatkan penyebaran gen resistensi, menjadikan lingkungan perairan sebagai reservoir gen resisten antibiotik yang pada akhirnya dapat mencapai populasi manusia (Wang et al., 2025).

Mekanisme resistensi yang diamati dalam patogen ikan termasuk produksi enzim yang menonaktifkan antibiotik (seperti beta-laktamase), perubahan situs target dari antibiotik, dan ekspresi dari pompa penghabisan yang dapat secara aktif menghilangkan

antibiotik dari sel bakteri (Araki et al., 2025). Penelitian yang melacak evolusi pola resistensi selama periode waktu yang panjang menunjukkan lintasan yang jelas dari peningkatan prevalensi strain resisten, terutama untuk antibiotik yang umum digunakan seperti oksitetrasiklin dan fluoroquinolones (Miranda et al., 2018). Strategi untuk mitigasi resistensi antibiotik termasuk peraturan yang lebih ketat tentang penggunaan antibiotik, penerapan program pengelolaan antimikroba yang bijaksana, dan pengembangan serta adopsi pendekatan alternatif untuk pencegahan dan pengobatan penyakit (Milijasevic et al., 2024).

8.5.2 Alternatif Non-Antibiotik untuk Penanggulangan Penyakit

Berbagai alternatif non-antibiotik untuk manajemen penyakit dalam akuakultur telah dikembangkan dan divalidasi, menyediakan pilihan efektif untuk mengurangi ketergantungan pada antibiotik (Meskhi et al., 2025). Probiotik, seperti yang telah dibahas, adalah salah satu alternatif yang paling menjanjikan, dengan penelitian ekstensif yang menunjukkan kemanjuran mereka dalam meningkatkan fungsi kekebalan dan mengurangi kerentanan penyakit (Meskhi et al., 2025). Minyak atsiri dan senyawa fitogenik yang diekstrak dari tanaman obat menunjukkan sifat antimikroba dan dapat digunakan baik sebagai feed additive maupun dalam water treatment (Elgendy et al., 2024).

Bakteriofag adalah virus yang secara spesifik menginfeksi bakteri dan dapat digunakan sebagai agen pengendalian yang ditargetkan terhadap bakteri patogen tertentu (Elgendy et al., 2024). Keuntungan dari terapi fag termasuk spesifisitas tinggi terhadap

bakteri target dan gangguan minimal terhadap mikrobiota menguntungkan, berbeda dengan antibiotik yang berspektrum luas (Elgendy et al., 2024). Penghambatan quorum sensing dan quorum quenching molekul mengganggu komunikasi bakteri dan dapat mengurangi virulensi dalam beberapa patogen tanpa harus membunuh bakteri, menghadirkan pendekatan menarik untuk pengendalian patogen selektif (Elgendy et al., 2024).

8.5.3 Program Pengelolaan Antimikroba dalam Akuakultur

Program penatalayanan antimikroba dirancang untuk mengoptimalkan penggunaan antibiotik sambil meminimalkan tekanan seleksi untuk pengembangan resistensi (Milijasevic et al., 2024). Komponen utama dari program penatalaksanaan yang efektif termasuk pengujian diagnostik sebelum pengobatan untuk memastikan bahwa antibiotik hanya digunakan ketika diindikasikan secara pasti, dosis dan durasi pengobatan yang tepat, dan dokumentasi dari semua penggunaan antibiotik untuk pemantauan dan kepatuhan terhadap peraturan (Milijasevic et al., 2024). Edukasi petugas peternakan mengenai penanganan, penyimpanan, dan pemberian antibiotik yang tepat sangat penting untuk memaksimalkan kemanjuran dan meminimalkan risiko paparan yang tidak disengaja terhadap lingkungan (Milijasevic et al., 2024).

Kolaborasi antara industri akuakultur, profesi kedokteran hewan, otoritas kesehatan masyarakat, dan lembaga penelitian sangat penting untuk mengembangkan dan menerapkan strategi penatalayanan yang efektif (Milijasevic et al., 2024). Harmonisasi metode pengujian kerentanan antimikroba dan penetapan kriteria

pelaporan standar yang memfasilitasi perbandingan data antar wilayah dan identifikasi pola resistensi yang muncul (Milijasevic et al., 2024). Program insentif yang mendorong petani untuk mengurangi penggunaan antibiotik dan mengadopsi strategi pencegahan penyakit alternatif dapat secara signifikan mempercepat transisi menuju budidaya perairan bebas antibiotik (Milijasevic et al., 2024).

8.5.4 Kerangka Peraturan dan Kebijakan untuk Mengurangi Penggunaan Antibiotik

Menetapkan dan menegakkan kerangka peraturan yang lebih ketat mengenai penggunaan antibiotik dalam budidaya perikanan adalah hal mendasar untuk mengatasi masalah resistensi antibiotik pada skala yang lebih luas (Verner-Jeffreys et al., 2025). Banyak negara telah menerapkan larangan atau pembatasan signifikan terhadap penggunaan antibiotik yang penting secara medis pada hewan penghasil pangan, termasuk spesies akuakultur (Verner-Jeffreys et al., 2025). Beberapa yurisdiksi telah mengadopsi sistem klasifikasi yang membatasi penggunaan antibiotik dengan prioritas tertinggi dalam budidaya perikanan hanya untuk keperluan darurat (Verner-Jeffreys et al., 2025).

Pendekatan One Health, yang mengakui keterhubungan antara kesehatan manusia, hewan, dan lingkungan, memberikan kerangka komprehensif untuk mengatasi resistensi antibiotik dari perspektif multidimensi (Verner-Jeffreys et al., 2025). Kebijakan yang berkoordinasi dengan sektor pertanian dan menerapkan pemantauan pola resistensi di reservoir lingkungan dapat lebih

efektif membendung penyebaran patogen yang resisten (Verner-Jeffreys et al., 2025). Perjanjian internasional dan berbagi praktik terbaik antar negara dapat mempercepat adopsi global dari strategi pengurangan antibiotik dan pendekatan pengelolaan penyakit alternatif (Verner-Jeffreys et al., 2025).

Bab 9: Rekayasa Lingkungan:

Akuakultur Hijau

Safira Meidina Nursatya, S.Kel., M.Si.

Akuakultur hijau atau *green aquaculture* merepresentasikan paradigma baru dalam industri budidaya perikanan yang mengintegrasikan prinsip-prinsip keberlanjutan lingkungan dengan praktik produksi yang efisien. Semakin meningkatnya permintaan global terhadap produk akuatik untuk memenuhi kebutuhan protein bagi populasi dunia yang terus bertambah, tantangan pengelolaan lingkungan menjadi semakin kritis. Bab ini diuraikan secara komprehensif tentang rekayasa lingkungan dalam akuakultur hijau, meliputi manajemen kualitas air berbasis sensor pintar, sistem aerasi dan optimalisasi oksigen terlarut, pengolahan limbah dan pemulihan nutrisi, budidaya karbon netral, jasa ekosistem, karbon biru, serta adaptasi terhadap perubahan iklim. Pendekatan holistik ini dirancang untuk menciptakan sistem akuakultur yang produktif, menguntungkan, dan berkelanjutan bagi generasi mendatang.

9.1 Manajemen Kualitas Air Berbasis Sensor Pintar

9.1.1 Teknologi *Internet of Things* dalam Pemantauan Kualitas Udara

Teknologi *Internet of Things* (IoT) telah merevolusi cara pengelolaan kualitas air dalam sistem akuakultur modern dengan memungkinkan pemantauan secara *real-time* yang kontinu dan akurat (Molla, 2025). Sistem IoT terintegrasi menggunakan *sensor array* untuk mengukur parameter-parameter kritis seperti suhu, pH, oksigen terlarut (DO), turbiditas, dan tingkat amoniak secara otomatis dan secara terus-menerus (Esty et al., 2025). Data yang dikumpulkan dari sensor nirkabel dipancarkan ke *Platform cloud* atau server lokal untuk dianalisis secara *real-time*, memungkinkan deteksi dini anomali dan pengambilan keputusan yang lebih cepat oleh petani (Jomsri & Prangchumpol, 2024). Implementasi sistem monitoring berbasis IoT telah menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam operasional manajemen dengan akurasi pengukuran mencapai 90-99% untuk berbagai parameter udara (M & Manisekhar, 2025). Keunggulan utama teknologi IoT dalam akuakultur adalah kemampuannya untuk memberikan informasi *real-time* kepada pengelola peternakan di mana pun mereka berada, mengurangi ketergantungan pada pengamatan manual yang bersifat sporadis dan rentan terhadap kesalahan.

9.1.2 Integrasi Kecerdasan Buatan dan *Pembelajaran Mesin*

Kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) dan pembelajaran mesin (*Machine Learning*) telah menjadi komponen penting dalam sistem manajemen kualitas air akuakultur modern untuk prediksi dan optimalisasi parameter lingkungan (Esty et al., 2025). Algoritma seperti *Random Forest*, *LSTM* (*Long Short-Term Memory*), dan *XGBoost* digunakan untuk memprediksi parameter cuaca dengan akurasi tinggi, memungkinkan intervensi proaktif sebelum kondisi menjadi kritis (Kanwal et al., 2024). *Pembelajaran federasi* teknologi memungkinkan banyak peternakan untuk berbagi pengetahuan dan model prediktif tanpa membagikan data sensitif mereka, meningkatkan keamanan data sekaligus meningkatkan akurasi prediksi (Esty et al., 2025). Sistem berbasis AI dapat mengklasifikasikan kondisi udara menjadi kategori "optimal", "suboptimal", atau "kritis" untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih informatif dan cepat (M & Manisekhar, 2025). Dengan integrasi AI dan data sensor *real-time*, petani dapat mengurangi stres pada ikan, mencegah wabah penyakit, dan meningkatkan tingkat kelangsungan hidup hingga lebih dari 90% dalam berbagai lingkungan akuakultur (Kanwal et al., 2024). Selain melalui prediksi teknologi, upaya preventif terhadap penyakit juga dapat diperkuat dengan pemanfaatan bahan alami. Eksplorasi mengenai efikasi antibakteri dari makroalga seperti *Turbinaria ornata* dan *Chaetomorpha antennina* terhadap bakteri *fouling* menunjukkan potensi besar untuk dikembangkan sebagai agen

biokontrol hayati yang mendukung sistem akuakultur rendah bahan kimia sintetis (Oktaviani et al., 2019).

9.1.3 Sistem Peringatan Dini dan Notifikasi Otomatis

Sistem peringatan dini berbasis IoT dan AI dirancang untuk memberitahu petani secara otomatis ketika parameter kualitas air menyimpang dari nilai optimal yang telah ditetapkan sebelumnya (S et al., 2025). Notifikasi dikirimkan melalui berbagai saluran komunikasi, termasuk aplikasi seluler, email, SMS, dan WhatsApp, memastikan informasi penting dapat diterima dengan cepat meskipun sedang di luar lokasi pertanian (Olanubi et al., 2024). Sistem ini dilengkapi dengan alarm ambang batas yang dapat dikustomisasi sesuai dengan kebutuhan spesies yang dibudidayakan dan kondisi lingkungan setempat (Flores-Iwasaki et al., 2025). Analisis data historis dari sistem monitoring memungkinkan identifikasi pola-pola yang dapat diprediksi, sehingga sistem dapat memberikan peringatan preventif sebelum terjadi krisis (Nayoun et al., 2024). Respons cepat terhadap peringatan yang diberikan sistem telah terbukti mengurangi mortalitas ikan sebesar 20-30% dan meningkatkan efisiensi operasional secara keseluruhan (Baena-Navarro et al., 2025).

9.1.4 Visualisasi Data dan Dashboard Interaktif

Dashboard interaktif yang user-friendly merupakan komponen penting yang memungkinkan petani untuk memvisualisasikan data kualitas air dalam format yang mudah dipahami dan dapat diakses dari perangkat mobile atau komputer (P.Selvan et al., 2025). *Platform cloud* seperti

ThingSpeak, Blynk, dan Firebase menyediakan dashboard yang dapat dikustomisasi dengan grafik *real-time*, tren historis, dan analisis komparatif untuk membantu petani memahami dinamika sistem akuakultur mereka (P et al., 2024). Visualisasi data yang efektif membantu petani mengidentifikasi korelasi antara berbagai parameter udara dan kinerja ikan, mendukung pengambilan keputusan yang lebih berbasis data (Darmalim et al., 2021). Fitur ekspor data memungkinkan petani untuk menghasilkan laporan berkala yang dapat digunakan untuk audit, kepatuhan terhadap regulasi, dan perencanaan jangka panjang (Hu et al., 2023). Sistem dashboard terintegrasi juga memfasilitasi kolaborasi antara petani, konsultan, dan peneliti dengan berbagi data dan wawasan untuk perbaikan berkelanjutan dalam praktik akuakultur (Demetillo et al., 2023).

9.2 Sistem Aerasi dan Optimalisasi Oksigen Terlarut

9.2.1 Desain dan Teknologi Aerator Modern

Sistem aerasi merupakan infrastruktur kritis dalam akuakultur intensif yang berfungsi untuk meningkatkan konsentrasi oksigen terlarut dalam udara budidaya agar memenuhi kebutuhan organisme-organisme akuatik (Nugraha & Desnanjaya, 2025). Teknologi aerator modern meliputi berbagai desain seperti aerator roda dayung, sistem udara terdifusi, injektor Venturi, dan sistem aerasi berbasis *gelembung* halus yang masing-masing memiliki

karakteristik efisiensi dan aplikasi yang berbeda (Nugraha & Desnanjaya, 2025). Teknologi *fine bubble* dan *nanobubble* telah menunjukkan peningkatan signifikan dalam transfer oksigen dengan efisiensi mencapai 40-50% lebih tinggi dibandingkan dengan sistem aerasi konvensional (Sravani et al., 2025). Desain *impeller lily* yang baru telah dirancang untuk mengurangi konsumsi energi sekaligus mempertahankan kinerja oksigenasi yang optimal, dengan peningkatan efisiensi energi mencapai 122% dibandingkan dengan peralatan RAS yang ada (Tong et al., 2024). Pemilihan jenis aerator yang tepat harus mempertimbangkan karakteristik fisik kolam, kebutuhan oksigen spesies yang dibudidayakan, dan keterkaitan dengan sistem otomasi yang sudah ada (Kin et al., 2025).

9.2.2 Kontrol dan Optimalisasi Otomatis Oksigen Terlarut

Sistem kontrol otomatis untuk oksigen terlarut mengintegrasikan sensor *real-time*, algoritma prediktif, dan aktuator untuk menjaga konsentrasi DO pada level optimal secara dinamis (Kin et al., 2025). Teknologi fuzzy PID (*fuzzy Proportional-Integral-Derivative*) dan algoritma *Intelligent Satin Bowerbird* digunakan untuk mengatur kecepatan aerator secara adaptif berdasarkan perubahan kondisi udara yang diprediksi oleh model pembelajaran mesin (Chen et al., 2025). Sistem kontrol otomatis dapat mengurangi konsumsi energi untuk aerasi hingga 40% tanpa mengorbankan kualitas udara, menghasilkan penghematan yang signifikan dalam biaya operasional (Fonseca et al., 2023). Optimalisasi DO juga mempertimbangkan laju metabolisme organisme yang bervariasi berdasarkan suhu, kepadatan stocking,

dan kondisi kesehatan ikan (Trujillo-Rogel et al., 2025). Integrasi sistem kontrol otomatis dengan sumber energi terbarukan seperti panel surya telah membuka peluang untuk mengurangi jejak karbon akuakultur secara keseluruhan (Nugraha & Desnanjaya, 2025).

9.2.3 Efisiensi Energi dan Integrasi Energi Terbarukan

Efisiensi energi dalam sistem aerasi merupakan aspek penting dalam mengurangi biaya operasional dan dampak lingkungan dari akuakultur (Fonseca et al., 2023). Implementasi otomatisasi berbasis sensor dapat mengurangi konsumsi energi hingga 64% dengan hanya menjalankan aerator pada saat dibutuhkan berdasarkan pengukuran DO *real-time* (Fonseca et al., 2023). Integrasi dengan sumber energi terbarukan seperti panel surya dan turbin angin dapat mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik dan menurunkan emisi karbon secara signifikan (Constantin et al., 2025). Analisis termodinamika dari proses oksigenasi menunjukkan bahwa kombinasi antara jenis aerator yang tepat, suhu udara yang optimal, dan sistem kendali yang cerdas dapat mencapai efisiensi maksimal (Constantin et al., 2025). Petani akuakultur modern semakin mengadopsi pendekatan *Aquaculture 4.0* yang mengintegrasikan IoT dan manajemen energi untuk mencapai tujuan keberlanjutan sambil meningkatkan profitabilitas (Fonseca et al., 2023).

9.2.4 Pemantauan dan Evaluasi Distribusi Oksigen Terlarut

Distribusi oksigen terlarut dalam kolam akuakultur tidak seragam, dengan zona tertentu yang memiliki konsentrasi DO yang jauh lebih rendah daripada rerata kolam, yang dapat mengakibatkan

hipoksia lokal dan mortalitas ikan (Trujillo-Rogel et al., 2025). Teknik *Computational Fluid Dynamics* (CFD) digunakan untuk mendokumentasikan distribusi DO dan mengidentifikasi zona mati dalam sistem budidaya untuk mengoptimalkan penempatan aerator (Trujillo-Rogel et al., 2025). Respirometri in situ yang dikombinasikan dengan pemodelan CFD memberikan representasi realistis dari dinamika DO dan membantu dalam optimalisasi sistem serta praktik budidaya perikanan berkelanjutan (Trujillo-Rogel et al., 2025). Evaluasi empiris menunjukkan bahwa modifikasi desain kolam, penambahan aerator tambahan, dan optimalisasi pola aliran dapat meningkatkan homogenitas distribusi DO dan mengurangi risiko hipoksia (Tauviquirrahman et al., 2024). Pemantauan rutin terhadap distribusi DO menggunakan teknologi penginderaan yang terdistribusi memastikan bahwa seluruh area kolam memiliki kondisi optimal untuk pertumbuhan dan kesehatan ikan (Trujillo-Rogel et al., 2025).

9.3 Pengolahan Limbah dan Pemulihan Nutrisi

9.3.1 Karakterisasi Limbah Akuakultur dan Eutrofikasi

Limbah akuakultur mengandung beban organik tinggi, kelebihan nutrisi (nitrogen dan fosfor), dan berbagai kontaminan yang dapat menyebabkan pencemaran air dan eutrofikasi jika dibiarkan langsung ke badan penerima udara (Kurniawan et al., 2025). Limbah akuakultur mengandung nitrogen berkisar 16.6 Tg ($Tg = \text{juta metrik ton}$) dan fosfor 3.0 Tg secara global per tahun,

jumlah yang sangat signifikan dan dapat mengompensasi 13.4% dari kebutuhan pertanian global akan unsur hara ini (Qadir et al., 2020). Kandungan organik dalam ekosistem mencakup sisa pakan, kotoran ikan, dan organisme mati, yang ketika terdekomposisi menciptakan kondisi anaerobik dengan pelepasan gas metana dan hidrogen sulfida (Kurniawan et al., 2025). Efluen akuakultur juga mengandung residu, logam berat, dan parasit yang dapat berdampak negatif pada ekosistem perairan dan kesehatan masyarakat (Qu et al., 2025). Pemahaman detail terhadap karakterisasi limbah merupakan landasan untuk mengembangkan teknologi pengolahan yang efektif dan layak secara ekonomi (Kurniawan et al., 2025).

9.3.2 Teknologi Pengolahan Limbah Berbasis Sistem Biologis

Sistem biologi seperti teknologi bioflok, sistem simbiosis alga-bakteri, dan lahan basah buatan telah terbukti efektif dalam mengurangi muatan nutrisi sekaligus menghasilkan biomassa yang bernilai ekonomis (Qu et al., 2025). Teknologi biofloc memanfaatkan konsorsium mikroba untuk mengubah produk limbah menjadi partikel flok yang dapat dikonsumsi oleh ikan, mengurangi kebutuhan pertukaran air dan suplementasi nutrisi (Chirwa, 2024). Sistem simbiosis alga-bakteri memanfaatkan metabolisme komplementer mikroalga dan bakteri untuk menghilangkan polutan secara efektif, dengan efisiensi penghilangan nitrogen dan fosfor mencapai 70-90% (Qu et al., 2025). Mekanisme ini bekerja melalui asimilasi langsung nitrogen (dalam bentuk amonium dan nitrat) serta fosfor ke dalam biomassa mikroalga untuk pembentukan protein dan asam nukleat, yang didorong oleh proses fotosintesis sebagai sumber

energi bagi fiksasi nutrisi tersebut. Integrasi ini tidak hanya mereduksi beban pencemaran pada limbah akuakultur secara signifikan, tetapi juga mengubah polutan menjadi biomassa bernilai ekonomi tinggi yang kaya akan klorofil dan lipid. Lahan basah yang dibangun dan ditanami dengan halofit seperti *Sesuvium portulacastrum* dapat mengkulasi nitrogen dari limbah akuakultur dengan efisiensi mencapai 50%, menghasilkan biomassa yang bernilai ekonomis (Senff et al., 2024). Teknologi fitoremediasi menggunakan teknik film nutrisi (NFT) sistem hidroponik telah menunjukkan efisiensi penyisihan nitrogen dan BOD5 masing-masing mencapai 78% dan 71% (Rajalakshmi & Gunasekaran, 2024).

9.3.3 Pemulihan Nutrisi dan Produksi Pupuk Hayati

Pemulihan nutrisi dari limbah akuakultur menciptakan peluang ekonomi sirkular dengan mengubah limbah menjadi pupuk hayati berharga yang dapat digunakan dalam pertanian dan akuaponik (Kurniawan et al., 2025). Presipitasi struvite merupakan teknologi yang mapan untuk pemulihan amonium dan fosfat dari pencernaan akuakultur, menghasilkan pupuk lepas lambat dengan nilai agronomis yang tinggi (Nagarajan et al., 2024). Pencernaan anaerobik dari akuakultur sampah organik menghasilkan biogas sekaligus memfasilitasi pemulihan nutrisi melalui kristalisasi struvite, dengan tingkat pemulihan TAN mencapai 98-99% (Nagarajan et al., 2024). Pengomposan dan vermicomposting dari lumpur budidaya menghasilkan kondisioner tanah yang kaya nutrisi yang meningkatkan kesehatan dan kesuburan tanah secara

signifikan (Zieliska & Bukowska, 2024). Produksi biochar melalui pirolisis tidak hanya menghasilkan perbaikan tanah yang bernilai tinggi, tetapi juga mensekuestrasi karbon, memberikan manfaat tambahan untuk mitigasi perubahan iklim (Zieliska & Bukowska, 2024).

9.3.4 Sistem Terintegrasi untuk Zero Waste dan Ekonomi Sirkular

Konsep *biocircular economy* dalam akuakultur mengintegrasikan berbagai teknologi pengolahan dan jalur valorisasi untuk mencapai pembuangan limbah minimal dan pemulihan sumber daya maksimum (Kurniawan et al., 2025). Sistem terintegrasi yang menggabungkan teknologi bioflok untuk perputaran nutrisi, akuaponik atau hidroponik untuk produksi tanaman, budidaya alga untuk menghasilkan biofuel, dan budidaya daphnid untuk pakan tambahan, menciptakan sistem produksi yang benar-benar sirkular (Kurniawan et al., 2025). Integrasi budidaya multi-trofik (IMTA) dengan pertanian terestrial memungkinkan nutrisi dari limbah budidaya untuk dimanfaatkan dalam produksi tanaman, mengurangi kebutuhan pupuk dan biaya operasional (Sang & Minh-thu, 2024). Mikroba dan biofilm yang direkayasa secara biologis dapat mempercepat proses bioremediasi dan meningkatkan siklus nutrisi, dengan potensi untuk mengurangi kontaminan beracun hingga 40% dan meningkatkan efisiensi pemulihan nutrisi (Boath, 2025). Model linier “ambil-buat-buang” dalam akuakultur secara bertahap diganti dengan pendekatan sirkular yang menghasilkan aliran pendapatan berganda dari

valorisasi biomassa sambil melindungi lingkungan perairan (Kurniawan et al., 2025).

9.4 Budidaya Netral Karbon dan Jasa Ekosistem

9.4.1 Kalkulasi dan Pengurangan Jejak Karbon

Jejak karbon akuakultur berasal dari berbagai sumber, termasuk produksi pakan, konsumsi energi untuk aerasi dan pemompaan, transportasi, dan penguraian sampah organik yang mengeluarkan metana dan dinitrogen oksida (Verma et al., 2025). Akuakultur intensif dapat menghasilkan jejak karbon sekitar 1-3 kg setara CO₂ per kg ikan yang dihasilkan, tergantung pada sistem budidaya, formulasi pakan, dan sumber energi yang digunakan (Verma et al., 2025). Strategi untuk mengurangi jejak karbon meliputi optimalisasi formulasi pakan dengan pola makan hemat protein, penerapan sumber energi terbarukan, pengurangan limbah, dan penerapan solusi teknologi rendah karbon (Verma et al., 2025). Integrasi budidaya rumput laut dengan budidaya ikan dapat menyerap CO₂ di atmosfer sambil menghasilkan biomassa yang berharga, berkontribusi pada sistem budidaya perikanan netral karbon atau bahkan karbon negatif (Verma et al., 2025). Kerangka kerja penghitungan karbon dan penilaian siklus hidup (LCA) menjadi semakin penting untuk memantau kemajuan terhadap target pengurangan karbon dan untuk mengomunikasikan kinerja

lingkungan kepada konsumen dan pemangku kepentingan (Verma et al., 2025).

9.4.2 Sistem Budidaya Terintegrasi dan Polikultur

Budidaya terintegrasi seperti polikultur dan *Integrated Multi-Trophic Aquaculture* (IMTA) menunjukkan potensi signifikan untuk mengurangi jejak lingkungan per unit produksi (Verma et al., 2025). Dalam IMTA, spesies dengan tingkat trofik berbeda dibudidayakan secara bersama-sama, di mana limbah dari satu spesies dimanfaatkan sebagai sumber nutrisi atau pakan untuk spesies lain, menciptakan lingkaran tertutup yang efisien (Sang & Minh-thu, 2024). Kombinasi budidaya rumput laut dengan budidaya ikan bersirip atau kerang memiliki banyak manfaat, termasuk penghilangan nutrisi, produksi oksigen, redaman gelombang, dan penyediaan habitat bagi spesies liar, sekaligus menghasilkan biomassa rumput laut yang berharga untuk konsumsi manusia atau produksi biofuel (Verma et al., 2025). Studi menunjukkan bahwa sistem IMTA dapat mengurangi keseluruhan muatan nutrisi ke lingkungan hingga 50% dibandingkan dengan sistem monokultur yang setara (Verma et al., 2025). Selain manfaat lingkungan, sistem terintegrasi juga menghasilkan manfaat ekonomi melalui diversifikasi aliran produksi dan pengurangan kebutuhan input (Sang & Minh-thu, 2024).

9.4.3 Jasa Ekosistem dan Nilai Ekonomi

Akuakultur yang dikelola dengan prinsip-prinsip hijau dapat menghasilkan berbagai jasa ekosistem yang memiliki nilai ekonomi signifikan bagi masyarakat lokal dan global (Verma et al., 2025).

Budidaya rumput laut berkontribusi pada penyerapan karbon, pemurnian air, siklus nutrisi, dan penciptaan habitat yang mendukung keanekaragaman hayati (Verma et al., 2025). Budidaya kerang, khususnya budidaya tiram dan kerang, meningkatkan kualitas air melalui aktivitas pemberian pakan filter, mengurangi biomassa fitoplankton dan meningkatkan kejernihan dan kadar oksigen (Darmawan et al., 2025). Sistem akuakultur berbasis mangrove menyediakan habitat pembibitan untuk spesies ikan komersial, mendukung perikanan liar dan menjaga integritas ekologi (Verma et al., 2025). Nilai dari jasa ekosistem ini dapat diestimasi dan dimasukkan ke dalam analisis biaya-manfaat dari rencana pengembangan akuakultur secara ekonomi, sehingga mendukung pengambilan keputusan yang lebih terinformasi dan berkelanjutan (Verma et al., 2025).

9.4.4 Sertifikasi dan Kepatuhan terhadap Standar Lingkungan

Sertifikasi akuakultur berkelanjutan seperti *Aquaculture Stewardship Council* (ASC), *Global Aquaculture Alliance* (GAA), dan berbagai skema sertifikasi nasional menjadi semakin penting dalam diferensiasi pasar dan akses ke pasar premium (Verma et al., 2025). Kepatuhan terhadap standar lingkungan mencakup pemantauan berkala terhadap kualitas air, pembuangan limbah, sumber bahan pakan, dan parameter operasional lainnya untuk memastikan kepatuhan terhadap peraturan dan persyaratan sertifikasi (Verma et al., 2025). Audit pihak ketiga dan verifikasi independen memastikan kredibilitas dan transparansi dalam klaim lingkungan yang dibuat oleh produsen (Verma et al., 2025).

Permintaan konsumen terhadap makanan laut berkelanjutan terus meningkat, mendorong produsen untuk mengadopsi sertifikasi dan menunjukkan tanggung jawab terhadap lingkungan (Verma et al., 2025). Integrasi sistem pengelolaan lingkungan dengan perencanaan produksi memfasilitasi perbaikan berkelanjutan dan keberlanjutan jangka panjang di tingkat operasional (Verma et al., 2025).

9.5 Karbon Biru dan Adaptasi Perubahan Iklim

9.5.1 Konsep Karbon Biru dalam Akuakultur Pesisir

Karbon biru mengacu pada karbon dioksida yang ditangkap dan disimpan dalam biomassa dan sedimen dari ekosistem pesisir dan laut seperti bakau, padang lamun, dan rawa asin (Verma et al., 2025). Akuakultur yang terintegrasi dengan habitat-habitat ini dapat memanfaatkan potensi penyerapan karbon mereka sekaligus meningkatkan produktivitas (Verma et al., 2025). Sistem akuakultur berbasis mangrove menyediakan berbagai jasa ekosistem termasuk penyimpanan karbon, siklus nutrisi, redaman gelombang, dan habitat satwa liar, sekaligus mendukung mata pencaharian lokal (Verma et al., 2025). Budidaya rumput laut di wilayah pesisir berkontribusi secara signifikan terhadap penyerapan karbon biru, dengan beberapa penelitian yang menunjukkan tingkat penyerapan mencapai 1-2 ton karbon per hektar per tahun (Verma et al., 2025). Restorasi dan rehabilitasi habitat pesisir yang terdegradasi sambil mengembangkan kegiatan akuakultur secara bersamaan dapat mencapai hasil yang saling menguntungkan untuk konservasi dan

produksi (Verma et al., 2025). Keberhasilan pengelolaan karbon biru ini sangat bergantung pada keterlibatan aktif masyarakat lokal. Melalui pendekatan restorasi mangrove berbasis komunitas yang mencakup tahapan penyemaian hingga monitoring intensif, tantangan ekologi di wilayah pesisir dapat diatasi sekaligus memastikan keberlanjutan fungsi ekosistem sebagai penyerap karbon dan habitat budidaya (Rieuwpassa et al., 2024).

9.5.2 Adaptasi terhadap Variabilitas Iklim dan Kejadian Ekstrem

Sistem budidaya perikanan semakin mengalami tekanan akibat variabilitas iklim yang ditandai dengan fluktuasi suhu, perubahan salinitas, kejadian cuaca ekstrem, dan perubahan pola curah hujan (Verma et al., 2025). Adaptasi terhadap tantangan yang disebabkan oleh iklim meliputi seleksi dan pembiakan spesies dan strain yang tahan terhadap iklim yang dapat mentolerir kondisi lingkungan yang lebih luas (Verma et al., 2025). Diversifikasi portofolio spesies dan sistem produksi mengurangi kerentanan terhadap peristiwa bencana tunggal yang dapat menghancurkan seluruh tahun produksi (Verma et al., 2025). Perbaikan infrastruktur seperti penguatan struktur kandang, peningkatan sistem pengelolaan air, dan sistem peringatan dini untuk wabah penyakit meningkatkan ketahanan operasi pertanian (Verma et al., 2025). Perencanaan tata ruang untuk pemilihan lokasi budidaya perikanan berdasarkan proyeksi iklim membantu dalam mengidentifikasi wilayah dengan risiko terendah terhadap dampak iklim di masa depan (Verma et al., 2025).

9.5.3 Mitigasi Emisi Gas Rumah Kaca

Strategi mitigasi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dari akuakultur mencakup optimalisasi penggunaan energi, pengurangan produksi limbah, dan peningkatan penyerapan karbon dalam sistem produksi (Verma et al., 2025). Peningkatan efisiensi pakan melalui optimalisasi formulasi ransum dapat mengurangi jejak karbon keseluruhan per unit protein ikan yang dihasilkan (Verma et al., 2025). Penerapan sumber energi terbarukan untuk sistem aerasi listrik dan sirkulasi air secara signifikan mengurangi emisi karbon operasional (Nugraha & Desnanjaya, 2025). Praktik pengelolaan limbah seperti pengomposan, pembuatan biogas, dan pemulihan nutrisi mengurangi emisi metana dan dinitrogen oksida dari aliran limbah akuakultur (Zieliska & Bukowska, 2024). Integrasi rumput laut, bakau, dan organisme penyerap karbon lainnya ke dalam sistem akuakultur menciptakan skenario produksi bersih karbon negatif (Verma et al., 2025).

9.5.4 Pemantauan Iklim dan Sistem Peringatan Dini

Pemantauan keberlanjutan terhadap variabel iklim seperti suhu, pola curah hujan, permukaan laut, dan frekuensi kejadian cuaca ekstrem penting untuk mendeteksi dini perubahan yang dapat memengaruhi operasi budidaya perikanan (Verma et al., 2025). Jaringan sensor canggih dan sistem pemantauan berbasis satelit memberikan data *real-time* tentang kondisi lingkungan di perairan pesisir (Verma et al., 2025). Model prediktif berbasis data iklim dan pembelajaran mesin dapat memperkirakan kondisi masa depan dengan lead time yang memungkinkan respons pengelolaan

adaptif (Verma et al., 2025). Sistem peringatan dini terhadap bahaya terkait iklim seperti gelombang panas yang berlebihan, pertumbuhan alga, dan wabah penyakit memungkinkan petani mengambil tindakan pencegahan dan meminimalkan kerugian (Verma et al., 2025). Platform berbagi data dan jaringan pemantauan kolaboratif di antara petani regional dan lembaga penelitian memfasilitasi respons terkoordinasi terhadap tantangan terkait iklim (Verma et al., 2025). Lebih jauh lagi, arah rekayasa lingkungan masa depan dalam akuakultur hijau tidak hanya berfokus pada pengelolaan parameter kualitas air makro, tetapi juga mulai menyentuh interaksi pada level molekuler untuk meningkatkan resiliensi biota secara alami. Inovasi penggunaan nanovesikel alami, seperti nanovesikel serupa eksosom dari tanaman (*plant-derived exosome-like nanovesicles* atau PDENs), menawarkan potensi besar sebagai agen imunostimulan dan anti-inflamasi alami yang aman bagi ekosistem. Integrasi teknologi nanovesikel ini dapat menjadi strategi preventif yang inovatif untuk meningkatkan imunitas dan Kesehatan ikan terhadap stress lingkungan akibat perubahan iklim tanpa bergantung pada antibiotic sintetis (Barlian et al., 2026)

Bab 10: Masa Depan Akuakultur: Teknologi, Keberlanjutan, & Pasar

Aryo Wenang Wicaksono, S.Pi., M.Si.

10.1 Pemanenan Cerdas dan Rantai Dingin Terintegrasi

10.1.1 Teknologi Pemanenan Otomatis dalam Akuakultur Modern

Pemanenan merupakan tahap kritis dalam rantai nilai akuakultur yang menentukan kualitas produk dan efisiensi produksi. Teknologi pemanenan otomatis atau teknologi *smart* pemanenan mengintegrasikan sistem robotika, visi komputer, dan kecerdasan buatan untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi proses pemanenan (Senthilkumar et al., 2025). Sistem otomasi pemanenan modern dapat mengidentifikasi ikan yang telah mencapai ukuran pasar, melakukan seleksi berdasarkan kriteria kualitas, dan mengurangi stres pada ikan yang tidak dipanen. Teknologi ini sangat efektif dalam sistem budidaya intensif di mana jumlah ikan yang tinggi memerlukan pemeliharaan yang presisi. Implementasi otomasi pemanenan tidak hanya meningkatkan produktivitas tetapi

juga mengurangi kebutuhan tenaga kerja manual, meminimalkan cedera pada ikan, dan menghasilkan produk berkualitas tinggi yang dapat langsung dimasukkan ke rantai dingin tanpa menunda waktu.

10.1.2 Otomatisasi pada Tahapan Pemberokan dan Sortasi

Kegiatan persiapan panen seperti pemberokan dan sortasi sangat krusial untuk menjamin kelangsungan hidup ikan dan menekan tingkat stres selama proses transportasi. Pemberokan ikan yang dilakukan sebelum kegiatan pengangkutan hidup bertujuan untuk menurunkan laju metabolisme agar kualitas air pengangkutan lebih stabil dan pemulihan stres akibat penangkapan, sehingga dapat mencegah kematian ikan selama pengangkutan (Hadiroseyani et al., 2016). Teknologi yang diadaptasi pada fase ini yaitu sirkulasi air pada bak pemberokan dapat diintegrasikan dengan sensor berbasis *Internet of Things* (IoT) yang secara otomatis memantau kadar oksigen atau peningkatan amonia akibat ekskresi metabolisme ikan. Selain itu, sistem cerdas dapat digunakan untuk menyesuaikan waktu pemberokan terhadap waktu transportasi. Lebih lanjut, teknologi visi komputer (*computer vision*) berpeluang diterapkan untuk menggantikan penyortiran manual yang konvensional menggunakan sensor cerdas. Hal ini tidak hanya mempercepat proses *grading* berdasarkan ukuran dan kesehatan fisik, tetapi juga meminimalkan sentuhan fisik langsung yang berisiko melukai ikan atau memicu stres sebelum pengangkutan.

10.1.3 Sistem Rantai Dingin Terintegrasi dengan Teknologi IoT dan RFID

Rantai dingin (*cold chain*) yang efisien adalah kunci untuk mempertahankan kualitas dan keamanan produk akuakultur dari pemanenan hingga konsumen akhir (Rahman et al., 2021). Integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) dan *Radio Frekuensi Identification* (RFID) dalam manajemen rantai dingin memungkinkan pemantauan real-time terhadap parameter lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan lokasi produk. Sistem berbasis RFID menghubungkan setiap kemasan produk dengan informasi digital yang mencatat riwayat suhu dan kondisi transportasi secara kontinyu. Data-data ini ditransmisikan melalui jaringan 4G atau koneksi satelit untuk disimpan di server cloud, memberikan visibilitas penuh terhadap status produk kepada semua pemangku kepentingan dalam rantai pasokan. Teknologi ini terbukti dapat mengurangi kerugian produk selama transportasi hingga 30 persen dan meningkatkan kepercayaan konsumen terhadap kualitas dan kesegaran produk yang diterima.

10.1.4 Pemantauan Kualitas Produk Pasca-Panen Berbasis Sensor Pintar

Pengembangan sensor pintar yang dapat mengukur parameter kesegaran dan kualitas produk secara non-destruktif merupakan invasi penting dalam manajemen rantai dingin akuakultur (Flores-Iwasaki et al., 2025). Sensor-sensor ini dapat mendeteksi tingkat dekomposisi, aktivitas bakteri, perubahan pH, dan tingkat kerusakan daging ikan dengan akurasi tinggi.

Teknologi *smart tagging* menggunakan perangkat elektronik berukuran kecil yang dapat dilengkapi dengan berbagai jenis sensor untuk menjaga kondisi lingkungan dan produk secara kontinyu selama transportasi. Integrasi sensor-sensor ini dengan sistem data analitik memungkinkan prediksi umur simpan produk dengan presisi, sehingga membantu distributor dan pengecer dalam mengelola persediaan dan meminimalkan pemborosan. Penggunaan sensor pintar juga mendukung kontaminasi dini atau produk yang tidak memenuhi standar kualitas, memungkinkan tindakan pencegahan sebelum produk mencapai konsumen.

10.1.5 Logistik dan Distribusi yang Responsif terhadap Kondisi Produk

Sistem logistik masa depan dalam akuakultur akan semakin responsif terhadap data *real-time* tentang kondisi produk dan parameter rantai dingin (Senthilkumar et al., 2025). Algoritma optimasi rute berbasis kecerdasan buatan dapat menentukan jalur transportasi yang paling efisien berdasarkan perkiraan waktu tempuh, kondisi arus lalu lintas, dan kondisi cuaca. Sistem ini juga dapat secara dinamis menyesuaikan rute jika terdeteksi anomali pada produk atau perangkat penyimpanan dingin. Integrasi dengan memastikan sistem manajemen persediaan yang terintegrasi sehingga produk dengan umur simpan yang lebih pendek diprioritaskan untuk distribusi, mengurangi kerugian ekonomi akibat produk yang kadaluwarsa. Teknologi otonomasi di bidang logistik, seperti penggunaan kendaraan otomatis dan sistem penyimpanan

otomatis di gudang dingin, semakin meningkatkan efisiensi dan mengurangi risiko kontaminasi produk.

10.2 Pengolahan Nilai Tambah dan Jaminan Mutu

10.2.1 Teknologi Pengolahan Lanjut untuk Peningkatan Nilai Produk

Teknologi pengolahan pangan tingkat lanjut seperti pemrosesan bertekanan tinggi, medan listrik berdenyut, dan plasma dingin membuka peluang baru untuk meningkatkan nilai tambah produk akuakultur (Dhal & Kar, 2025). Teknologi-teknologi ini dapat mempertahankan nutrisi dan kualitas sensori produk sambil menginaktivkan patogen dan memperpanjang umur simpan tanpa mengandalkan bahan pengawet kimia yang ekstensif. Pemrosesan bertekanan tinggi (HPP) khususnya telah terbukti efektif dalam memproses produk akuakultur beku seperti udang dan ikan, meningkatkan keamanan pangan dan memperpanjang masa simpan hingga 45 hari pada suhu pendingin. Teknologi *sous-vide* yang menggabungkan kekosongan dan panas suhu rendah juga semakin populer untuk mengolah produk akuakultur premium, menghasilkan produk dengan tekstur optimal dan retensi nutrisi tinggi. Penerapan teknologi-teknologi ini tidak hanya meningkatkan kualitas produk tetapi juga membuka peluang akses ke pasar premium dan memungkinkan penetapan harga yang lebih tinggi.

10.2.2 Otomasi dan Standarisasi dalam Lini Produksi Pengolahan

Otomasi dalam fasilitas pengolahan ikan dan produk akuakultur lainnya melalui penggunaan robotika, sistem visi komputer, dan otomasi berprogram meningkatkan konsistensi kualitas produk dan efisiensi produksi (Senthilkumar et al., 2025). Sistem otomasi modern dapat melakukan sinkronisasi tulang, filetisasi, pengemasan, dan pelabelan dengan kecepatan dan akurasi yang melampaui kemampuan manusia. Penggunaan visi komputer memungkinkan inspeksi otomatis untuk mendeteksi cacat, kontaminasi, dan anomali produk dalam jumlah besar. Standarisasi proses melalui otomasi juga mengurangi variabilitas produk, meningkatkan efisiensi penggunaan bahan baku, dan menurunkan biaya produksi hingga 25 persen. Selain itu, otomasi fasilitas pengolahan menciptakan lingkungan yang lebih higienis dan mengurangi risiko kontaminasi, sejalan dengan persyaratan standar keamanan pangan internasional yang semakin ketat.

10.2.3 Pengembangan Produk Inovatif Berbasis Akuakultur

Industri akuakultur modern mengembangkan produk-produk inovatif yang melampaui bentuk ikan segar atau beku tradisional. Produk seperti makanan siap saji, produk bergizi tinggi dengan suplemen vitamin dan mineral, serta produk berbasis sel (*cell-cultured seafood*) merupakan tren pengembangan produk yang berkembang pesat (Jaziri et al., 2025). Pengembangan produk bernilai tambah tinggi seperti kerupuk ikan, surimi, dan produk makanan tradisional dengan standar higienis modern membuka

peluang pasar baru dan meningkatkan margin keuntungan petani akuakultur. Penelitian dan pengembangan juga fokus pada ekstraksi bioaktif dari limbah pengolahan, menghasilkan produk suplemen dan bahan farmasi yang bernilai tinggi. Integrasi teknologi pengolahan modern dengan pengetahuan tradisional menghasilkan produk yang mempertahankan nilai budaya sekaligus memenuhi standar keamanan dan kualitas internasional, menciptakan diferensiasi produk yang dapat bersaing di pasar global.

10.2.4 Sistem Manajemen Kualitas Terintegrasi dari Hulu ke Hilir

Implementasi sistem manajemen kualitas menyeluruh dari tahap budidaya hingga distribusi akhir memastikan konsistensi dan keamanan produk akuakultur (Mu et al., 2024). Sistem ini mengintegrasikan *analisis Hazard Analysis and Critical Control Point* (HACCP), protokol keamanan pangan berbasis sains, dan pemantauan *real-time* terhadap parameter kritis. Setiap tahap proses, mulai dari pemilihan bibit, manajemen pakan, pemanenan, transportasi, pengolahan, hingga distribusi, pengawasan dan didokumentasikan dengan detail. Penggunaan data analitik dan pembelajaran mesin memungkinkan identifikasi dini potensi risiko, memungkinkan intervensi pencegahan sebelum masalah terjadi. Sistem manajemen kualitas terintegrasi ini tidak hanya menjamin keamanan produk tetapi juga meningkatkan kepercayaan konsumen, mendukung akses ke pasar premium, dan menciptakan keunggulan kompetitif di pasar global yang semakin sadar terhadap isu keamanan pangan.

10.2.5. Modernisasi Produk Olahan Tradisional

Peningkatan nilai tambah dan diversifikasi produk tidak hanya terbatas pada komoditas modern seperti *fillet* beku, tetapi juga dapat mengangkat produk olahan perikanan tradisional ke standar global. Teknik pengolahan tradisional seperti penggaraman, pemindangan, dan fermentasi (seperti pembuatan kecap ikan, terasi, atau peda) dapat diintegrasikan dengan teknologi otomatisasi dan standarisasi fasilitas produksi. Dalam proses pengolahannya, diperlukan sistem pengendalian mutu dengan melakukan pengawasan pada setiap tahap produksi, yang dapat dicapai melalui penerapan *Good Manufacturing Practices* (GMP) dan *Sanitation Standard Operating Procedure* (SSOP) untuk menjamin keamanan dan kualitas produk (Hastuti et al., 2023). Penggunaan sensor cerdas dalam mengontrol kadar garam, memonitor aktivitas air (Aw), dan menjaga kestabilan suhu fermentasi secara presisi dapat mengoptimalkan pemecahan protein oleh enzim dan bakteri asam laktat. Standarisasi ini menghasilkan produk tradisional yang tidak hanya mempertahankan cita rasa budaya, tetapi juga aman, higienis, dan terstandarisasi sesuai dengan prinsip dasar *Good Manufacturing Practices* (GMP).

10.3 Ketertelusuran, Sertifikasi, dan Keamanan Pangan

10.3.1 Sistem Blockchain untuk Transparansi Rantai Pasokan Akuakultur

Teknologi *blockchain* atau buku besar terdistribusi menawarkan solusi revolusioner untuk menjamin transparansi dan integritas informasi dalam rantai pasokan akuakultur (Ismail et al., 2023). Setiap transaksi, mulai dari pemeliharaan ikan di hatchery, pemberian pakan, pemanenan, pengolahan, transportasi, hingga penjualan akhir, dicatat dalam blok-blok yang terkoneksi dan tidak dapat diubah. Teknologi *blockchain* memastikan bahwa informasi tentang asal usul produk, metode budidaya, kondisi transportasi, dan standar keamanan yang diterapkan dapat dilakukan oleh semua pihak tanpa perlu perantara pusat. Integrasi *blockchain* dengan IoT dan RFID memungkinkan pelacakan produk secara *real-time* dengan data otomatis yang tidak dapat dipalsukan. Penelitian menunjukkan bahwa hampir 20 persen produk makanan laut global mengalami kesalahan pelabelan, dan teknologi *blockchain* dapat mengurangi penipuan ini secara signifikan, membangun kepercayaan konsumen dan memfasilitasi akses ke pasar premium yang menghargai transparansi dan kesejahteraan.

10.3.2 Otomasi Proses Sertifikasi dan Kepatuhan Regulasi

Otomasi proses sertifikasi melalui penggunaan *smart contracts* dan sistem berbasis AI dapat mempercepat proses verifikasi kepatuhan terhadap standar keamanan pangan dan

pergerakan lingkungan (Arsyad et al., 2025). *Kontrak pintar* adalah program otomatis yang berjalan di *blockchain* dan dapat menjalankan perjanjian dan verifikasi pelaksanaannya secara otomatis tanpa memerlukan intervensi manual. Sistem ini dapat memantau parameter budidaya, hasil uji laboratorium, dan kepatuhan dokumentasi secara kontinyu, memberikan sertifikat digital ketika semua kriteria terpenuhi. Otomasi ini mengurangi waktu dan biaya sertifikasi, meningkatkan transparansi proses, dan memungkinkan sertifikasi *real-time* yang lebih responsif terhadap standar yang berkembang. Integrasi dengan sistem regulasi nasional dan internasional memudahkan pemerintah dalam penegakan peraturan dan pemantauan kepatuhan di seluruh industri akuakultur, menciptakan ekosistem yang lebih terpercaya dan efisien.

10.3.3 Ketertelusuran Produk dan Identifikasi Mula Asal Berbasis Teknologi Modern

asal mula identifikasi produk akuakultur yang akurat merupakan fondasi dari transparansi rantai pasokan dan jaminan kelanjutan. Teknologi DNA *barcoding*, analisis *stable isotope*, dan metode genetik lainnya dapat mengidentifikasi spesies ikan, lokasi geografis budidaya, dan metode budidaya dengan akurasi tinggi (Bosona & Gebresenbet, 2023). Kombinasi teknologi laboratorium ini dengan teknologi digital seperti QR code dan teknologi pengenalan digital memungkinkan konsumen mengakses informasi lengkap tentang asal-usul produk hanya dengan sensor kode di kemasan. Sistem ketertelusuran berbasis teknologi ini juga mendukung pendeteksian dan pencegahan perdagangan ilegal dan

tidak dilaporkan dalam industri perikanan. Integrasi berbagai metode identifikasi menciptakan sistem verifikasi berlapis yang sangat sulit untuk dipalsukan, memberikan jaminan kepada konsumen tentang autentisitas dan legalitas produk yang mereka beli, sekaligus mendukung kepentingan produsen yang mematuhi standar keberlanjutan.

10.3.4 Sistem Peringatan Dini dan Manajemen Risiko Keamanan Pangan

Implementasi sistem peringatan dini berbasis data analitik dan kecerdasan buatan memungkinkan identifikasi potensi risiko keamanan pangan sebelum produk mencapai konsumen (Mu et al., 2024). Sistem ini menganalisis pola kontaminasi historis, mengidentifikasi faktor-faktor risiko, dan menggunakan model prediktif untuk meramalkan kemungkinan terjadinya masalah keamanan pangan. Integrasi data dari berbagai sumber—hasil uji laboratorium, pemantauan lingkungan, transportasi data, data penjualan—menciptakan gambaran holistik tentang kesehatan sistem rantai pasokan. Ketika sistem mendeteksi anomali atau pola yang dikirimkan, peringatan otomatis dikirimkan kepada pemangku kepentingan yang relevan, memungkinkan tindakan respons yang cepat dan tertarget. Teknologi ini tidak hanya meningkatkan keamanan produk tetapi juga mengurangi risiko pemanggilan kembali produk (penarikan produk) yang mahal, melindungi reputasi merek, dan menjaga kepercayaan konsumen dalam jangka panjang.

10.4 Pemuliaan Berbasis Kecerdasan Buatan dan Blockchain

10.4.1 Aplikasi AI dalam Program Pemuliaan Ikan dan Krustasea

Program pemuliaan ikan dan krustasea yang dibantu oleh kecerdasan buatan dapat mengakselerasi peningkatan produktivitas, ketahanan penyakit, dan adaptasi terhadap perubahan iklim (Nguyen, 2024). Sistem AI dapat menganalisis data genetik dalam skala besar, mengidentifikasi kombinasi gen yang optimal untuk sifat-sifat yang diinginkan, dan membuat rekomendasi seleksi yang presisi. Penggunaan genomik dan teknologi sekuensing DNA tingkat lanjut memberikan informasi detail tentang polimorfisme genetik yang terkait dengan sifat-sifat produktif dan ketahanan penyakit. Model prediktif berbasis AI dapat mencerminkan kinerja keturunan berdasarkan informasi genetik orang tua, memungkinkan seleksi yang lebih akurat dan efisien. Program pemuliaan yang dipandu AI juga dapat mengoptimalkan koefisien *inbreeding* untuk menjaga keragaman genetik sambil meningkatkan kinerja, menciptakan populasi ikan yang lebih produktif, sehat, dan berkelanjutan dalam jangka panjang.

10.4.2 Sertifikasi dan Dokumentasi Genetik Berbasis Digital

Dokumentasi dan sertifikasi materi genetik akuakultur hewan yang akurat merupakan persyaratan penting untuk memfasilitasi perdagangan internasional dan memastikan integritas program pemuliaan (Arsyad et al., 2025). Sistem *blockchain* dapat

menyimpan data genetik, riwayat pemuliaan, dan sertifikat keaslian dalam *ledger* yang tidak dapat diubah dan dapat dicuri oleh semua pihak. Setiap individu ikan atau krustasea dapat diidentifikasi secara unik melalui sistem identitas digital yang terhubung dengan riwayat genetik dan kinerja produksi mereka. Transparansi ini membangun kepercayaan antar pembibit, memfasilitasi perdagangan materi genetik berkualitas tinggi, dan mencegah pemalsuan sertifikat yang merugikan industri. Sistem dokumentasi digital ini juga memudahkan peneliti dalam mengakses data populasi untuk penelitian, berkontribusi pada kemajuan ilmu pengetahuan dalam pemuliaan ikan dan krustasea secara global.

10.4.3 Program Pemuliaan Terpadu untuk Keberlanjutan dan Adaptasi Iklim

Pemuliaan ikan dan krustasea untuk adaptasi terhadap perubahan iklim dan peningkatan kekeringan merupakan prioritas penting dalam penelitian akuakultur masa depan (Boyd et al., 2020). Pemuliaan program dapat fokus pada pengembangan varietas yang toleran terhadap suhu ekstrem, salinitas tinggi, dan kualitas udara yang lebih rendah. Seleksi untuk efisiensi pakan yang lebih tinggi dan metabolisme yang lebih efisien berkontribusi pada pengurangan emisi karbon dan dampak lingkungan akuakultur. Integrasi keragaman genetik lokal dengan teknologi pemuliaan modern menciptakan varietas yang adaptif secara lokal tetapi dengan produktivitas tinggi. Program pemuliaan yang berkelanjutan juga mempertimbangkan kesejahteraan hewan, mengembangkan varietas dengan perilaku alami yang lebih baik dan ketahanan terhadap stres

yang lebih tinggi. Kolaborasi global dalam pertukaran materi genetik dan informasi pemuliaan, difasilitasi oleh teknologi blockchain, mempercepat perkembangan varietas unggul yang dapat mendukung ketahanan pangan global dalam menghadapi tantangan perubahan iklim.

10.4.4 Etika dan Regulasi dalam Penggunaan Teknologi Genetik dan AI dalam Pemuliaan

Pengembangan dan penerapan teknologi genetik dan AI dalam pemuliaan ikan memerlukan kerangka etika dan regulasi yang jelas untuk memastikan bahwa inovasi diimplementasikan secara bertanggung jawab. Pertanyaan tentang keamanan konsumsi produk dari ikan hasil modifikasi genetik, dampak lingkungan dari pelepasan ikan transgenik, dan hak intelektual atas materi genetik perlu ditangani melalui dialog lintas pemangku kepentingan. Pemerintah dan organisasi internasional perlu mengembangkan standar dan pedoman yang menyeimbangkan inovasi dengan perlindungan lingkungan dan kepentingan publik. Transparansi dalam program pemuliaan dan komunikasi terbuka dengan konsumen tentang teknologi yang digunakan membangun kepercayaan masyarakat terhadap inovasi genetik dalam akuakultur. Pendekatan berbasis bukti dalam regulasi, didukung oleh penelitian ilmiah independen, memastikan bahwa teknologi genetik digunakan dengan cara yang aman dan berkelanjutan, menguntungkan produsen dan konsumen sekaligus melindungi ekosistem.

10.5 Ekonomi Sirkular dan Budidaya Nol Emisi

10.5.1 Prinsip Ekonomi Sirkular dalam Industri Akuakultur

Ekonomi sirkular (*circular economy*) dalam akuakultur bertujuan untuk memaksimalkan nilai produk sambil meminimalkan limbah dan dampak lingkungan melalui desain sistem yang regeneratif (Boyd et al., 2020). Prinsip ini melibatkan pemanfaatan setiap komponen sistem budidaya, termasuk limbah organik, untuk menciptakan nilai tambah. Budidaya limbah seperti kotoran ikan dan sisa pakan dapat diubah menjadi pupuk organik, biogas, atau protein alternatif untuk pakan, menciptakan aliran pendapatan tambahan bagi petani akuakultur. Integrasi akuakultur dengan pertanian tanah (IMTA - *Integrated Multi-Trophic Aquaculture*) memungkinkan pemanfaatan limbah nutrisi dari budidaya ikan untuk pertumbuhan tanaman atau alga, menciptakan sistem yang saling menguntungkan. Pendekatan ekonomi sirkular juga melibatkan desain ulang produk dan kemasan untuk memaksimalkan kemampuan daur ulang dan meminimalkan limbah. Implementasi sirkular ekonomi tidak hanya mengurangi biaya produksi melalui efisiensi material tetapi juga meningkatkan ketahanan usaha dengan mengurangi ketergantungan pada bahan baku eksternal yang fluktuatif harganya.

10.5.2 Digitalisasi untuk Optimalisasi Efisiensi Sumber Daya

Teknologi digital seperti IoT, big data analitik, dan cloud computing memungkinkan optimalisasi penggunaan sumber daya dalam akuakultur untuk mengurangi limbah dan emisi (Rowan et al., 2022). Sistem monitoring *real-time* terhadap konsumsi udara,

energi, pakan, dan bahan kimia memberikan data yang akurat untuk mengidentifikasi inefisiensi dan peluang penghematan. Algoritma optimasi berbasis AI dapat merekomendasikan penyesuaian parameter budidaya untuk memaksimalkan produktivitas sambil meminimalkan input material dan energi. Digitalisasi juga memfasilitasi pertukaran informasi dan praktik terbaik antar petani akuakultur, mempercepat penerapan teknologi hemat sumber daya. Implementasi *Digital Twin* atau simulasi digital dari sistem budidaya memungkinkan eksperimen virtual untuk mengidentifikasi optimalisasi strategi sebelum diimplementasikan di lapangan, mengurangi risiko dan meningkatkan efektivitas intervensi. Transformasi digital menuju ekonomi sirkular ini tidak hanya menguntungkan lingkungan tetapi juga meningkatkan profitabilitas melalui pengurangan biaya operasional dan peningkatan efisiensi modal.

10.5.3 Pengembangan Pakan Berkelanjutan dan Alternatif Protein

Ketersediaan pakan berkualitas tinggi dari sumber berkelanjutan merupakan tantangan utama dalam perluasan akuakultur sambil mempertahankan keberlanjutan lingkungan (Shahin et al., 2023). Pengembangan bahan pakan alternatif seperti protein berbasis insek, alga, dan limbah industri mengurangi ketergantungan pada tepung ikan dan minyak ikan yang berasal dari penangkapan ikan pembohong. Protein serangga seperti *Hermetia illucens* (black Soldier fly) dapat diproduksi dengan efisiensi konversi pakan yang tinggi dan dampak lingkungan

yang rendah dibandingkan dengan sumber protein konvensional. Penggunaan limbah pertanian dan perkebunan sebagai bahan baku pakan menerapkan prinsip ekonomi sirkular sambil menyediakan sumber pakan murah bagi petani akuakultur. Penelitian berkelanjutan dalam nutrisi ikan memastikan bahwa pakan alternatif memenuhi kebutuhan nutrisi lengkap untuk pertumbuhan optimal dan kesehatan ikan. Transisi menuju pakan berkelanjutan tidak hanya meningkatkan keberlangsungan industri akuakultur tetapi juga mengurangi tekanan pada stok ikan pembohong di laut, berkontribusi pada konservasi ekosistem laut global.

10.5.4 Strategi Penghilangan Emisi Karbon dan *Net-Zero Aquaculture*

Industri akuakultur sedang mengembangkan strategi komprehensif untuk mencapai target emisi nol bersih melalui kombinasi pengurangan emisi dan penyerapan karbon (Rowan et al., 2022). Pengurangan emisi meliputi penggunaan energi terbarukan seperti panel surya untuk pompa air dan sistem aerasi, distribusi konsumsi energi melalui teknologi efisien, dan pengurangan transportasi melalui lokalisasi produksi dan pemasaran. Penggunaan pakan berkelanjutan dengan jejak karbon rendah memberikan kontribusi signifikan pada pengurangan emisi skop 3 (emisi hulu). Praktik manajemen perairan yang meminimalkan emisi metana dan dioksida nitrogen dari sedimen dan limbah organik merupakan aspek penting. Integrasi dengan sistem pertanian karbon-positif seperti budidaya alga hingga penyerapan karbon dapat mengimplementasikan akuakultur sebagai penjerat karbon.

Kebijakan pemerintah yang mendukung investasi dalam teknologi hijau dan mekanisme insentif untuk produksi akuakultur rendah emisi mempercepat transisi menuju industri *net-zero*. Pencapaian emisi *net-zero* tidak hanya memenuhi komitmen iklim global tetapi juga meningkatkan nilai produk di pasar yang semakin sadar lingkungan, menciptakan keunggulan kompetitif dalam jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Latif, HMR, Abdel-Razek, N., & Khalil, R. (2026). Efektivitas komparatif probiotik *Bacillus* dan bakterin yang dimatikan dengan formalin terhadap *Vibrio anguillarum* pada anakan belut Eropa. *Scientific Reports*, 16, 35298.
- Afandy, A. A., Anwar, K., & Ridhowati, S. (2025). Strategi penanganan penyakit budidaya udang vanamei (*Litopenaeus vannamei*) skala intensif di Kabupaten Takalar. *Akuakultur*, 10(2), 290. <https://doi.org/10.33087/akuakultur.v10i2.290>
- Ahmed, F., Bijoy, MHI, Hemal, HR, & Noori, SRH (2024). Analisis akuakultur cerdas: Meningkatkan budidaya udang di Bangladesh melalui pemantauan IoT waktu nyata dan analisis pembelajaran mesin prediktif. *Heliyon*, 10(19), e37330. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37330>
- Alghamdi, M., & Haraz, YG (2025). Sistem bioflok cerdas: Memanfaatkan kecerdasan buatan (AI) dan *Internet of Things* (IoT) untuk praktik akuakultur berkelanjutan. *Proses*, 13(7), 2204. <https://doi.org/10.3390/pr13072204>
- Aly, SM, & Fathi, M. (2024). Memajukan biosekuriti akuakultur: Analisis saintometrik dan prospek masa depan untuk pencegahan penyakit dan keberlanjutan lingkungan. *Akuakultur Internasional*, 32(4), 2145-2167.

- Andayani, A., Sugama, K., Rusdi, I., Luhur, E. S., Sulaeman, S., Rasidi, R., & Koesharyani, I. (2022). Kajian pengembangan budidaya kepiting bakau (*Scylla spp.*) di Indonesia. *Jurnal Budidaya Perairan dan Kesehatan Ikan*, 14(2), 41–52. <https://doi.org/10.15578/jkpi.14.2.2022>
- Araki, K., Iwao, Y., Minami, T., Nishiki, I., & Yoshida, T. (2025). Isolasi enterokokus resisten eritromisin (EM) yang membawa erm(B) dari air budidaya dan investigasi potensi transfer konjugatif resistensi EM ke patogen ikan yang muncul, *Lactococcus formosensis* dan *Lactococcus garvieae* serotipe III. *Jurnal Penyakit Ikan*, 48(12), 70110.
- Ashour, M., Goda, AM, Aboseif, A., Taha, MKS, Mohammady, EY, Aboushabana, NM,... & El-Okaby, MAS (2024). Mengoptimalkan pemanfaatan nutrisi, laju beban hidrolis, dan rasio konversi pakan melalui sistem akuaponik IMTA air tawar dan hidroponik sebagai konsep akuakultur yang berkelanjutan secara lingkungan. *Scientific Reports*, 14(1), 63919-63920. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63919-7>
- Astiana, A. A., Azhar, N., & Yudiati, E. (2024). Kinerja pertumbuhan, tingkat kelangsungan hidup, dan resistensi terhadap AHPND pada juvenil *Litopenaeus vannamei* yang diberi pakan *Artemia* bioenkapsulasi sinbiotik. *Jurnal Penelitian Akuakultur*, 19(3), 191–201. <https://doi.org/10.15578/jra.19.3.2024>
- Baena-Navarro, R., Carriazo-Regino, Y., Torres-Hoyos, F., & Pinedo López, JW (2025). Prediksi cerdas dan pemantauan

- berkelanjutan kualitas air dalam akuakultur: Integrasi pembelajaran mesin dan *Internet of Things* untuk manajemen berkelanjutan. *Water*, 17(1), 82. <https://doi.org/10.3390/w17010082>
- Balasubramaniam, V., Gunasegavan Rathi, DN, Mustar, S., & Lee, JC (2025). Mikroalga sebagai bahan ramah lingkungan dan fungsional untuk pakan akuakultur berkelanjutan. *Jurnal Akuakultur*, 5(3), 14. <https://doi.org/10.3390/aquacj5030014>
- Bappenas. (2024). Indonesia Blue Economy Roadmap 2025–2045 (Edisi 2). Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional Republik Indonesia. <https://perpustakaan.bappenas.go.id/>
- Barlian, A., Cho, Y., Rahmah, Y., Az Zahra, A. N., Maulidisya, H. A., Vanawati, N., & Nursatya, S. M. (2026). The potential of plant-derived exosome-like nanovesicles from *Centella asiatica* leaves (CA-PDENs) for anti-inflammation and prevention of UVB-induced photoaging. *Future Science OA*, 12(1), 2654777. <https://doi.org/10.1080/20565623.2026.2654777>
- Benedicenti, O., Amundsen, MM, Mohammad, S., Vrlstad, T., Strand, DA, Weli, S.,... & Sindre, H. (2024). Penyempurnaan metode deteksi berbasis eRNA dan eDNA untuk penyaringan patogen yang andal dan hemat biaya dalam budidaya salmon Atlantik. *PLOS ONE*, 19(10), e0312337.
- Bennett, A., Basurto, X., Viridin, J., Lin, X., Betances, S. J., Smith, M. D., Allison, E. H., Best, B. A., Brownell, K. D., Campbell, L. M., Golden, C. D., Havice, E., Hicks, C. C.,

- Jacques, P. J., Kleisner, K., Lindquist, N., Lobo, R., Murray, G. D., & Zoubek, S. (2023). Recognize fish as food in policy discourse and development funding. *Ambio*, 52, 989–993. <https://doi.org/10.1007/s13280-022-01818-9>
- Boumechrez, F., Sahour, A., Maamri, F., Djellab, H., & Bekhouche, A. (2025). Sistem logika *fuzzy* yang didukung IoT untuk manajemen kualitas air akuakultur. Dalam Konferensi Internasional ke-6 tentang Sistem Lanjutan dan Teknologi Listrik (IC_ASET) 2025 (hlm. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/IC_ASET65966.2025.11232273
- Boyd, CE, D'Abramo, LR, Glencross, BD, Huyben, DC, Juárez, LM, Lockwood, GS, McNevin, AA, Tacon, AGJ, Teletchea, F., Tomasso, JR, Tucker, CS, & Valenti, WC (2020). Mencapai akuakultur berkelanjutan: Perspektif historis dan terkini serta kebutuhan dan tantangan di masa depan. *Jurnal Masyarakat Akuakultur Dunia*, 51(3), 578-633. <https://doi.org/10.1111/jwas.12714>
- Bruce, T., & Brown, ML (2017). Tinjauan komponen sistem imun, sitokin, dan imunostimulan pada spesies ikan budidaya. *Open Journal of Animal Sciences*, 7(3), 231-245.
- Cabillon, NAR, & Lazado, CC (2019). Fungsi penghalang mukosa ikan dalam kondisi lingkungan yang berubah. *Ikan*, 4(1), 2. <https://doi.org/10.3390/fishes4010002>
- Cain, KD (2022). Berbagai tantangan dalam pengelolaan penyakit di bidang akuakultur. *Jurnal Masyarakat Akuakultur Dunia*, 53(6), 936-950.

- Calderon, I., Barros, MJ, Fernández-Navarro, N., & Acuña, LG (2024). Deteksi asam nukleat patogen ikan *Yersinia ruckeri* dari sampel planktonik dan biofilm dengan uji berbasis CRISPR/Cas13a. *Mikroorganisme*, 12(2), 283.
- Chakraborty, P., Chakraborty, A., & Pathak, A. (2024). NetWatch yang didukung logika *fuzzy*: Merevolusi akuakultur dengan pemantauan dan manajemen cerdas berbasis IoT di Bangladesh. *Jurnal Komputasi dan Pengembangan Lunak*, 6(2), 55-79. <https://doi.org/10.32996/jcsts.2024.6.2.5>
- Chamodi, KKD, Vu, NT, Domingos, JA, & Loh, JY (2025). Solusi seluler: Mengevaluasi protein sel tunggal sebagai alternatif pakan berkelanjutan dalam akuakultur. *Biologi*, 14(7), 764. <https://doi.org/10.3390/biology14070764>
- Chen, Y., Wang, Y., Shi, L., & Zhang, W. (2025, April). Intelligent Dissolved Oxygen Monitoring System for Aquaculture Based on Multi-Sensor Fusion and Edge Computing. In 2025 6th International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA) (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCEA65460.2025.11102315>
- Chirwa, W. (2023). Application of Fine Bubbles in Biofloc Aquaculture: Towards Environmental Sustainability. *Indian Journal of Environment Engineering (IJEE)* ISSN, 2582-9289. <https://doi.org/10.54105/ijee.a1848.03021123>
- Colombo, SM, & Turchini, GM (2021). Aquafeed 3.0: Menciptakan industri akuakultur yang lebih tangguh dengan kerangka

- bioekonomi sirkular. *Reviews in Aquaculture*, 13(2), 1110–1140. <https://doi.org/10.1111/raq.12567>
- Costa, VA, Whittington, RJ, Caraguel, C., Becker, JA, Wiley, K., Huynh, C.,... & Samsing, F. (2024). Mengoptimalkan investigasi wabah, pengawasan, dan penemuan patogen dalam akuakultur menggunakan metatranskriptomik yang tidak bias. *Laporan Akuakultur*, 44(13), 13002.
- D'Abramo, LR (2021). Pakan akuakultur berkelanjutan dan sistem produksi akuakultur yang terdampak oleh tantangan ketahanan pangan global dan perubahan iklim. *Jurnal Masyarakat Akuakultur Dunia*, 52(6), 1285-1326. <https://doi.org/10.1111/jwas.12867>
- Darmalim, F., Hidayat, AA, Cenggoro, TW, Purwandari, K., Darmalim, S., & Pardamean, B. (2021). Sistem terintegrasi aplikasi seluler dan solusi IoT untuk pemantauan kolam. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 794(1), 012106. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/794/1/012106>
- De Stefano, M., Barletta, GDG, Morgera, S., De Luca, Y., Belaeff, C., Power, K.,... & Saggese, A. (2025). Pengiriman antigen berbasis spora probiotik: Strategi vaksin oral baru melawan infeksi *Vibrio* dalam akuakultur. *Microbial Cell Factories*, 24(1), 2725.
- Dewanto, WK, Surateno, Putra, DM, Firmansyah, MH, & Albaab, MRU (2026). Kemajuan budidaya perikanan berkelanjutan melalui WISANGGENI: sistem pemantauan kualitas air dan

- hemat energi yang berpusat pada IoT. Web Konferensi BIO, 21, 05001. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202621005001>
- Dhal, SB, & Kar, D. (2025). Memanfaatkan kecerdasan buatan dan teknik pengolahan makanan canggih untuk meningkatkan keamanan, kualitas, dan keselamatan pangan: Tinjauan komprehensif. *SN Applied Sciences*, 7(1), 6472. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06472-w>
- Dildar, T., Cui, W., Ikhwanuddin, M., & Ma, H. (2025). Organisme akuatik dalam menanggapi stres salinitas: Dampak ekologis, mekanisme adaptasi, dan strategi ketahanan. *Biologi*, 14(6), 667. <https://doi.org/10.3390/biology14060667>
- Ding, Y., & Lin, M. (2025). Strategi akuakultur presisi di bawah integrasi pemantauan cerdas dan kembaran digital. Dalam *Prosiding SPIE* (Vol. 12945, hlm. 129451B). Masyarakat Internasional untuk Optik dan Fotonik. <https://doi.org/10.1117/12.3075620>
- Docando, F., Nuez-Ortiz, N., Serra, CR, Arense, P., Enes, P., Olivates, A.,... & Tafalla, C. (2022). Efek imun mukosa dan sistemik *Bacillus subtilis* pada ikan trout pelangi (*Oncorhynchus mykiss*). *Imunologi Ikan & Kerang*, 123, 40-48.
- Duarte, C. M., Wu, J., Xiao, X., Bruhn, A., & Krause-Jensen, D. (2017). Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation? *Frontiers in Marine Science*, 4, 100. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00100>

- Duman, M., Altun, S., Satçolu, Ö. B., & Romalde, JL (2023). Tinjauan wabah penyakit bakteri pada ikan trout pelangi (*Oncorhynchus mykiss*) yang dilaporkan dari tahun 2010 hingga 2022. *Jurnal Penyakit Ikan*, 46(11), 13886.
- Dupont, C., Cousin, P., & Dupont, S. (2018). IoT for Aquaculture 4.0: Smart and easy-to-deploy *real-time* water monitoring with IoT. Dalam 2018 Global *Internet of Things* Summit (GloTS) (hlm. 1–5). IEEE.
- Eichhorn, H., & Friedrich, T. (2024). Masa inkubasi dan perkembangan larva ikan sterlet (*Acipenser ruthenus* Linnaeus 1758) dalam pemeliharaan air sungai di bawah kondisi mendekati alami. *Ecologies*, 5(2), 016. <https://doi.org/10.3390/ecologies5020016>
- Elgendy, M., Ali, SE, Dayem, AA, Khalil, R., Moustafa, MM, & Abdelsalam, M. (2024). Terapi alternatif yang baru-baru ini diterapkan dalam pengendalian penyakit ikan budidaya: Mekanisme, tantangan, dan prospek. *Akuakultur Internasional*, 32(4), 1603.
- Engell, C. (2024). Sesuai dengan tujuan? Mengevaluasi hukum dan kebijakan adaptasi perubahan iklim untuk akuakultur laut di Chili. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1386545.
- Esty, J. N., Mussa, A. S. M., Rabbi, M. F., Hasan, M. R., Muhit, M. G., & Munir, N. S. (2025). EcoGuard: Advancing IoT-based aquaculture with machine learning for enhanced productivity and automation. *J. IoT Soc. Mob. Anal. Cloud*, 7, 18-41. <https://doi.org/10.36548/jismac.2025.1.002>

- Evans, DH, Axelsson, M., Beltz, B., Burggren, W., Castellini, M., Clements, K.,... & Wright, P. (2010). Batasan dalam fisiologi akuatik. *Batasan dalam Fisiologi*, 1, 6. <https://doi.org/10.3389/fphys.2010.00006>
- Evrendilek, GA (2024). Pengaruh pakan akuakultur terhadap kualitas gizi makanan laut budidaya: Tinjauan bahan pakan dan dampaknya terhadap kesehatan manusia. *Food and Nutrition Communications*, 287, 1–28. <https://doi.org/10.18686/fnc287>
- Fadhilah, N., Faizah, NM, Saputri, FA, & Tasya, A. (2024). Peran kearifan lokal dalam pengembangan akuakultur: Pendekatan kualitatif. *Jurnal Internasional Pembangunan Berkelanjutan*, 9(3), 45–62. <https://doi.org/10.62872/2b5krt57>
- Fernandez-Zatrata, F., Pérez-Delgado, L., Coronel-Bustamante, D., Huanca-Silva, L., Taboada-Mitma, VH, Quispe-Carhuapoma, M.,... & Cruz-Luis, J. (2025). Sistem budidaya ikan padi berkelanjutan: Tinjauan sistematis dan meta-analisis. *Penelitian Budidaya & Lingkungan*, 4029275(1), 1–25. <https://doi.org/10.1155/are/4029275>
- Flores-Iwasaki, M., Guadalupe, GA, Pachas-Caycho, M., Chapa-Gonza, S., Mori-Zabarbur, RC, & Guerrero-Abad, J. (2025). Sensor *Internet of Things* (IoT) untuk pemantauan kualitas air dalam sistem akuakultur: Tinjauan sistematis dan analisis bibliometrik. *Teknik Pertanian*, 7(3), 78. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7030078>

- Froehlich, H. E., Afflerbach, J. C., Frazier, M., & Halpern, B. S. (2019). Blue growth potential to mitigate climate change through seaweed offsetting. *Current Biology*, 29(18), 3087–3093. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.07.041>
- Ganesh, G., Nischal, L., Lavanya, C., Sravani, RS, Swapna, NM, Basha, DC, & Ratnasree, A. (2026). Kemajuan dalam pembiakan, nutrisi, dan praktik budidaya ikan mas India untuk akuakultur berkelanjutan. *Jurnal Penelitian Kelautan India*, 36(2), 1707-1725. <https://doi.org/10.9734/mrji/2026/v36i21707>
- Ganesh, G., Nischal, L., Lavanya, C., Sravani, RS, Swapna, NM, Basha, DC,... & Ratnasree, A. (2026). Kemajuan dalam pembiakan, nutrisi dan praktik budidaya ikan mas India untuk akuakultur berkelanjutan. *Merit Research Journal of Microbiology and Veterinary Medicine*, 36(21), 1707.
- Goncalves, G., Santos, RA, Coutinho, F., Pedrosa, N., Curado, M., Machado, M,... & Serra, C. (2022). Vaksinasi oral ikan terhadap vibriosis menggunakan teknologi tampilan spora. *Frontiers in Immunology*, 13, 1012301.
- Hadiroseyani, Y., Sukenda, S., Surawidjaja, E. H., Utomo, N. B. P., & Affandi, R. (2016). Efek pemberokan dalam media air dengan salinitas yang berbeda terhadap kondisi fisiologis belut, *Monopterus albus* (Zuiew, 1793). *Jurnal Iktiologi Indonesia*, 16(3), 325-336. <https://doi.org/10.32491/jii.v16i3.31>

- Haryani, ES, Kismiyati, Desi, P., Sari, W., & Bahtiar, SA (2025). Pemeriksaan parasit protozoa pada tiram mutiara (*Pinctada maxima*) di Balai Pengembangan Budidaya Laut Lombok, Sekotong, Nusa Tenggara Barat. *Seri Konferensi IOP: Ilmu Bumi dan Lingkungan*, 1512(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1512/1/012009>
- Hastuti, S., Arjuna, P., Parta, A. B., & Ngatirah. (2023). Penerapan Good Manufacturing Practice (GMP) dan Sanitation Standard Operating Procedure (SSOP) pada Pengolahan Produk UMKM Rendang. *Journal of Bioenergy and Food Technology*, 2(1), 42-52.
- Honcharova, O. (2023). Aspek regulasi neuro-humoral aktivitas fungsional dalam organisme ikan di bawah pengaruh faktor abiotik dan biotik. *Ilmu Perikanan Ukraina*, 2, 83-104. <https://doi.org/10.15407/fsu2023.02.083>
- Hou, Y., Li, Q., Li, H., He, J., & Li, C. (2025). Jalur sinyal mirip interferon pada krustasea: Struktur, fungsi imun, dan prospek pengendalian penyakit dalam akuakultur. *Laporan Akuakultur*, 70(10), 70101.
- Hsain, A., Zaki, Y., Abaakil, O., Bekkar, H., & Chtouki, Y. (2024). Pembelajaran mesin mini untuk pemantauan akuakultur waktu nyata: Studi kasus di Maroko. Dalam Konferensi Internasional ke-2 tentang Komputasi Hijau dan *Internet of Things* (GCAIoT) 2024 (hlm. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/GCAIoT63427.2024.10833526>

- Hsain, A., Zaki, Y., Abaakil, O., Bekkar, H., & Chtouki, Y. (2024). Pembelajaran mesin skala kecil untuk pemantauan akuakultur secara *real-time*: Studi kasus di Maroko. *Prosiding IEEE*, 10833526, 1-8.
<https://doi.org/10.55180/biofoodtech.v2i01.464>
- Hu, G., Yin, L., Luo, X., Miao, Y., & Yu, J. (2024). Uji PCR dupleks untuk deteksi cepat *Klebsiella pneumoniae* dan *Chryseobacterium* pada ikan croaker kuning besar. *Patogen dan Penyakit Bawaan Makanan*, 21(5), 149.
- Huang, J., Liu, X., Fu, Z., Ma, Z., & Chang, J. (2025). Penyakit terkait patogen pada budidaya tuna: Tantangan saat ini dan arah penelitian masa depan. *Kemajuan dalam Eksplorasi Laboratorium*, 2(1), 100006.
- Huang, YP, & Khabusi, SP (2025). Kemajuan kecerdasan buatan untuk internet (AIoT) dalam akuakultur: Sebuah tinjauan. *Proses*, 13(1), 73. <https://doi.org/10.3390/pr13010073>
- Hwang, JA, Park, JS, & Jeong, HS (2025). Perbandingan pertumbuhan dan kualitas air dalam budidaya *Anguilla japonica* dan *Lactuca sativa* dalam akuaponik dengan teknologi biofloc dan RAS. *Animals*, 15(24), 3591. <https://doi.org/10.3390/ani15243591>
- Iskandar, A., Ansarullah, H., Lesmanawati, W., & Hendriana, A. (2025). Pakan nabati dan vitamin E meningkatkan pematangan reproduksi pada betina *Cherax*

- quadricarinatus. Jurnal Barakuda, 7(2), 659-668. <https://doi.org/10.47685/barakuda45.v7i2.659>
- Iskandar, A., Mushthofa, Y. T. I., Wiyoto, W., Hakim, L., & Kusumanti, I. (2025). Dinamika kualitas air dan pertumbuhan udang vaname *Litopenaeus vannamei* pada tambak semi-intensif di Lampung Selatan. Jurnal Kelautan, 12(2), 51097. <https://doi.org/10.14710/marj.v12i2.51097>
- Islam, MM, Kashem, MA, & Uddin, J. (2021). Kerangka kerja *Internet of Things* untuk pemantauan lingkungan perairan secara *real-time* menggunakan Arduino dan sensor. Jurnal Internasional Teknik Elektro dan Komputer, 12(1), 826-833. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i1.pp826-833>
- Ismail, S., Reza, H., Salameh, K., Zadeh, HK, & Vasefi, F. (2023). Menuju rantai pasokan ikan berbasis IoT blockchain yang cerdas: Tinjauan dan kerangka kerja konseptual. Sensors, 23(11), 5136. <https://doi.org/10.3390/s23115136>
- Jais, NAM, Abdullah, AF, M, A., & Kassim, MSM (2025). Sistem pemberi makan ikan cerdas berdasarkan informasi biomassa menggunakan visi komputer dan integrasi IoT. Asian Journal of Aquatic Development, 22(2), 3. <https://doi.org/10.37801/ajad2025.22.2.3>
- Jin, J., Wang, H., Amenyogbe, E., Lu, Y., Xie, R., Wang, Z., & Huang, J. (2025). Pengaruh stres nitrogen amonia terhadap struktur jaringan hati dan indikator fisiologis, serta analisis metabolomik pada ikan muda *Eleutheronema*

- tetradactylum. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1549668. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1549668>
- Kao, CY, & Chen, IC (2024). Budidaya perikanan kota pintar: Model penyortiran dan identifikasi benih ikan berbasis AI. *Ilmu Terapan*, 14(19), 8803. <https://doi.org/10.3390/app14198803>
- Kato, K. (2023). Studi pemuliaan pada ikan kakap merah *Pagrus major*: Seleksi massal hingga penyuntingan genom. *Ilmu Perikanan*, 89, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s12562-022-01668-0>
- Kementerian Kelautan dan Perikanan. (2024a). 5 Program Prioritas Ekonomi Biru KKP. Republik Indonesia. <https://ppid.kkp.go.id/>
- Kementerian Kelautan dan Perikanan. (2024b). Rencana Strategis DJPKRL 2025–2029. Republik Indonesia. <https://ppid.kkp.go.id/>
- Kementerian Kelautan dan Perikanan. (2025). Pembukaan Capacity Building Kampung Nelayan Merah Putih. Siaran Pers KKP. <https://kkp.go.id/>
- Khan, N., Ray, RL, Kassem, HS, Hussain, S., Zhang, S., Khayyam, M., Ihtisham, M., & Asongu, S. (2021). Peran potensial inovasi teknologi dalam transformasi sistem pangan berkelanjutan: Sebuah tinjauan. *Pertanian*, 11(10), 984. <https://doi.org/10.3390/agriculture11100984>
- Khanjani, M., Sharifinia, M., & Ghaedi, G. (2021). β -glukan sebagai aditif makanan dan imunostimulan yang menjanjikan dalam

- industri akuakultur. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 28(4), 2478.
- Kim, G., Shin, D., Choi, JY, Choi, HD, Min, J., & Kim, K. (2024). Deteksi visual cepat iridovirus ikan kakap merah menggunakan uji aliran lateral berbasis amplifikasi silang primer baru. *Jurnal Penyakit Ikan*, 47(12), 14073.
- Kruk, S. R. L., Bush, S. R., & Phillips, M. (2024). Federating "Aquaculture 4.0" for data-driven social and environmental sustainability. *Marine Policy*, 169, 106355. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106355>
- Kulkarni, A., Caipang, CMA, Brinchmann, MF, Korsnes, K., & Kiron, V. (2009). Penggunaan uji amplifikasi isothermal berbasis loop untuk deteksi *Vibrio anguillarum* O2, agen penyebab vibriosis pada ikan kod Atlantik, *Gadus morhua*. *Penelitian Akuakultur*, 40(2), 186.
- Kumar, A. (2025). Budidaya ikan terintegrasi dengan penanaman padi dan transplantasi ikan Magur di Bihar: Analisis penelitian komprehensif. *Jurnal Internasional Penelitian Multidisiplin*, 7(6), 64908-64928. <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i06.64908>
- Kurniawan, S. B., Ahmad, A., Imron, M. F., Abdullah, S. R. S., Othman, A. R., & Hasan, H. A. (2025). Achieving a biocircular economy in the aquaculture sector through waste valorization. *Toxics*, 13(2), 131. <https://doi.org/10.3390/toxics13020131>

- Lal, J., Vaishnav, A., Deb, S., Kashyap, S., Debbarma, P., Devati, D., Gautam, P., Pavankalyan, M., Kumari, K., & Verma, DK (2024). Sistem akuakultur resirkulasi: Sebuah jalan menuju budidaya ikan berkelanjutan. *Advances in Civil Research International*, 24(5), 756. <https://doi.org/10.9734/acri/2024/v24i5756>
- Lau, TTV, Puah, S., & Chua, K. (2025). Deteksi cepat *Aeromonas veronii* menggunakan loop kolorimetri berbasis gen GGDEF. *Jurnal Penyakit Ikan*, 48(3), 14112.
- Le, NB, & Huh, JH (2024). AgTech: Membangun sistem asisten akuakultur cerdas yang terintegrasi dengan IoT dan analisis big data. Dalam *Simposium IEEE 2024 tentang Teknologi dan Aplikasi Teknik Elektro Fungsional (TAFE)* (hlm. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TAFE.2024.3416415>
- Lee, ES, Kim, G., & Kim, K. (2026). Pengembangan dan validasi uji fluoresensi berbasis amplifikasi cepat isothermal multienzim untuk deteksi *Megalocytivirus pagrus 1*. *Jurnal Penyakit Ikan*, 70(1), 70125.
- Lesmana, I., Heltonika, B., Sibagariang, RD, Firmansyah, R., Prayanti, M., & Kristina, K. (2026). Peta jalan strategis untuk pembangunan berkelanjutan budidaya ikan barramundi (*Lates calcarifer*) di Kepulauan Meranti: Produktivitas benih, potensi pesisir, dan integrasi rantai nilai. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1581(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1581/1/012002>

- Leung, K., Wang, Q., Yang, Z., & Siame, B. (2019). *Edwardsiella piscicida*: Patogen ikan yang serbaguna dan baru muncul. *Virulence*, 10(1), 1621648.
- Lhorente, JP, Araneda, M., Neira, R., & Yáñez, JM (2019). Kemajuan dalam peningkatan genetik untuk budidaya salmon dan trout: Situasi dan prospek di Chili. *Reviews in Aquaculture*, 11(3), 340-353. <https://doi.org/10.1111/raq.12335>
- Li, C., Ge, Z., Dai, L., & Chen, Y. (2025). Aplikasi terintegrasi teknologi biofloc dalam akuakultur: Sebuah tinjauan. *Water*, 17(14), 2107. <https://doi.org/10.3390/w17142107>
- Liu, L., Cheng, W., & Kuo, HW (2025). Tinjauan naratif tentang sensor pintar dan solusi IoT untuk praktik pertanian dan akuakultur berkelanjutan. *Keberlanjutan*, 17(12), 5256. <https://doi.org/10.3390/su17125256>
- Liu, Y., Wang, Z., Yang, X., Zhang, Y., Yang, F., Liu, B., & Cai, P. (2023). Remote sensing classification of offshore seaweed aquaculture farms on sample dataset amplification and semantic segmentation model. *Remote Sensing*, 15(18), 4423. <https://doi.org/10.3390/rs15184423>
- Lu, Y., & Kong, D. (2025). Algoritma pemberian pakan cerdas berbasis persepsi multi-lapisan dan penerapannya dalam sistem akuakultur otonom bergerak. Dalam *Prosiding SPIE* (Vol. 13205, hlm. 132050Q). Masyarakat Internasional untuk Optik dan Fotonik. <https://doi.org/10.1117/12.3083363>

- Ma, Y., & Ding, W. (2018). Design of intelligent monitoring system for aquaculture water dissolved oxygen. Dalam 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC) (hlm. 1234–1238).
- Mahmud, MN, Ansary, AA, Ritu, FY, Hasan, NA, & Haque, MM (2025). Tinjauan diagnosis dan pengobatan penyakit ikan dalam akuakultur di Bangladesh. *Jurnal Akuakultur*, 5(4), 18.
- Mahmud, MN, Ritu, FY, Ansary, AA, & Haque, MM (2025). Menjelajahi alternatif tepung ikan berbasis protein untuk pakan akuakultur di Bangladesh. *Pembaruan Nutrisi Akuakultur*, 3198303, 1–45. <https://doi.org/10.1155/anu/3198303>
- Major, SR, Harke, M., Cruz Flores, R., Dhar, A., Bodnar, A., & Wanamaker, SA (2023). Deteksi cepat virus DNA dan RNA udang menggunakan diagnostik berbasis CRISPR. *Mikrobiologi Terapan dan Lingkungan*, 89(4), 02151-22.
- Martínez, P., Vias, AM, Sánchez, L., Díaz, N., Ribas, L., & Piferrer, F. (2014). Arsitektur genetik penentuan jenis kelamin pada ikan: Penerapan pengendalian rasio jenis kelamin dalam akuakultur. *Perbatasan dalam Genetika*, 5, 340. <https://doi.org/10.3389/fgene.2014.00340>
- Mei, J., & Gui, JF (2015). Dasar genetik dan manipulasi bioteknologi dimorfisme seksual dan penentuan jenis

- kelamin pada ikan. *Sains Kehidupan Tiongkok*, 58(2), 124-136. <https://doi.org/10.1007/s11427-014-4797-9>
- Meski, B., Djedirov, DA, Rudoy, DV, Shevchenko, VN, Golovko, LS, Olshevskaya, A.,... & Prutskov, AS (2025). Metode alternatif pencegahan dan pengobatan penyakit dalam akuakultur. *Jurnal Internasional Studi Lingkungan*, 17(6), 1574.
- Mikhailov, AA, Moruzi, I., Pishchenko, E., Kalmykova, G., & Mager, S. (2024). Efektivitas probiotik dalam budidaya perikanan (ulasan). *Selskoe Khozyaystvo*, 9(24), 04.
- Milijasevic, M., Veskovic-Moraanin, S., Milijasevic, JB, Petrovi, J., & Nastasijevi, I. (2024). Resistensi antimikroba dalam akuakultur: Mitigasi risiko dalam konteks One Health. *Foods*, 13(15), 2448.
- Miranda, CD, Godoy, FA, & Lee, MR (2018). Status terkini penggunaan antibiotik dan resistensi antimikroba di peternakan salmon Chili. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1284.
- Mohapatra, B., Panda, SK, Chandan, NK, & Majhi, D. (2023). Desain dan pengembangan sistem akuaponik vertikal yang ramah pengguna untuk ikan hias dan tanaman. *Teknik Sipil dan Lingkungan*, 18(2), 115-126. <https://doi.org/10.12944/cwe.18.2.08>
- Molla, A. (2025). Sistem pemantauan dan kontrol cerdas dalam pengolahan air akuakultur berbasis bioreaktor. *Jurnal Internasional Ilmu Pengetahuan: Penelitian Dasar dan*

Terapan, 13(2), 89-103. <https://doi.org/10.11648/j.ijssn.20251302.11>

Molla, A. (2025). Smart monitoring and control systems in bioreactor-based aquaculture water treatment. *International Journal of Sensors and Sensor Networks*, 13(2), 22–32. <https://doi.org/10.11648/j.ijssn.20251302.11>

Mordecai, G., Miller, K., Bass, AL, Bateman, A., Teffer, AK, Caleta, JM,... & Joy, J. (2021). Akuakultur memediasi penularan global patogen virus ke salmon liar. *Science Advances*, 7(19), abe2592.

Mu, W., Kleter, GA, Bouzembrak, Y., Dupouy, E., Frewer, LJ, Al Natour, FNR, & Marvin, HJP (2024). Membuat sistem pangan lebih tangguh terhadap risiko keamanan pangan dengan memasukkan kecerdasan buatan, big data, dan *Internet of Things* ke dalam alat peringatan dini keamanan pangan dan identifikasi risiko yang muncul. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(1), 13296. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13296>

Nagel, B., Anggraini, E., Buhari, N., Gray, S., Partelow, S., & Schlter, A. (2024). Model mental tata kelola akuakultur di Indonesia. *Sustainability Science*, 19, 1325–1345. <https://doi.org/10.1007/s11625-024-01545-y>

Nandan, TPK, Pasha, MMN, Sathvika, N., Jyothi, MD, Anusha, M., & Reddy, TV (2024). Sistem pertanian cerdas menggunakan ESP32 untuk meningkatkan hasil spesies perairan. Dalam *Konferensi Internasional 2024 tentang Komputasi*

Cerdas dan Informatika yang Berkembang (ICTEST) (hlm. 1-6).

IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICTEST60614.2024.10576104>

Naseer, A., Mustafa, N., Iftikhar, S., Fareed, ZUH, Bashir, W., Khan, K.,... & Ather, N. (2024). Memajukan akuakultur dengan mengintegrasikan modulasi mikrobioma, pendekatan imunomodulator, dan mitigasi stresor lingkungan pada budidaya ikan nila. *Jurnal Internasional Tinjauan Biologi*, 2(2), 354.

Nazar, F., Rahman, & Rifqi, M. (2024). Mewujudkan pembangunan rendah karbon dan tahan iklim di bidang akuakultur. *Penelitian Pertanian*, 25(2), 1031. <https://doi.org/10.9734/air/2024/v25i21031>

Ngc Kin, V., Tri, NP, Ngoc, V., & Kien, K. (2025). Sistem kontrol canggih untuk pengaturan oksigen terlarut secara *real-time* dalam sistem akuakultur. *Akuakultur dan Perikanan*, 3, 325. <https://doi.org/10.52710/cfs.325>

Ngonga, L., Amoah, K., Chen, H., Huang, Y., Wang, B., Shija, VM,... & Adjei-Boateng, D. (2025). Metabolisme dan sifat antioksidan probiotik dan prebiotik pada ikan: Sebuah tinjauan. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1622474.

Nguyen, NH (2024). Genetika dan genomika penyakit menular pada spesies akuakultur utama. *Biologi*, 13(1), 29. <https://doi.org/10.3390/biology13010029>

Nugraha, I. M. A., & Desnanjaya, I. G. M. N. (2025). Energy efficiency in aeration systems for aquaculture ponds: a

- comprehensive review. *Jurnal Riset Akuakultur*, 20(1), 1-25.
<https://doi.org/10.15578/jra.20.1.2025.1-25>
- Nursyirwani, W., & Nurdjaman, S. (2024). Analisis kesesuaian penempatan keramba jaring apung ikan kerapu di Selat Madura: Pertimbangan kualitas air laut. *Jurnal Budidaya Perikanan dan Manajemen Perikanan*, 16(1), 51-60. <https://doi.org/10.15578/jkpi.16.1.2024>
- Ogun, AO, Moniruzzaman, M., Jeon, H., Kim, H., Aulia, D., Hur, J.,... & Lee, S. (2025). Asam gamma-aminobutyric (GABA) sebagai strategi diet untuk meningkatkan ketahanan terhadap tekanan suhu pada spesies akuakultur. *Jurnal Internasional Ilmu Molekuler*, 26(20), 10233. <https://doi.org/10.3390/ijms262010233>
- Ogunji, J., Evulobi, O., Iheanacho, SC, & Wuertz, S. (2024). Domestikasi *Heterotis niloticus* (ikan berlidah tulang Afrika): Potensi, upaya, dan tantangan. *Fishes*, 10(1), 3-15. <https://doi.org/10.3390/fishes10010003>
- Okon, E., Iyobhebhe, M., Olatunji, P., Adeleke, M., Matekwe, N., & Okocha, R. (2025). Bahan tambahan pakan dalam budidaya perikanan: Manfaat, risiko, dan perlunya kerangka peraturan yang kuat. *Ikan*, 10(9), 471.
- Oktaviani, D.F., Nursatya, S. M., Tristiani, F., Faozi A. N., & Saputra, R. H. (2019). Antibacterial Activity from Seaweeds *Turbinaria ornata* and *Chaetomorpha antennina* Against Fouling Bacteria. *IOP Conference Series: Earth and*

Environmental Science, 255(1), 012045.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/255/1/012045>

Olagoke-Komolafe, O., & Oyeboade, J. (2023). Solusi akuaponik dan pertanian perkotaan di AS: Tinjauan komprehensif - Menilai kelayakan, manfaat, dan tantangan integrasi budidaya ikan dan tanaman di lingkungan perkotaan. *Jurnal Internasional Manajemen dan Pengembangan Perikanan*, 4(2), 30-42.

Oleiro Araújo, S., Silva Peres, R., Ramalho, JC, Lidon, FC, & Barata, J. (2021). Mengkarakterisasi lanskap Pertanian 4.0—Tren, tantangan, dan peluang yang muncul. *Agronomi*, 11(4), 667. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040667>

Oliveira, VHS, Drea, F., Dean, KR, & Bang Jensen, B. (2024). Menjelajahi pilihan untuk pengawasan sindromik dalam akuakultur: Deteksi wabah penyakit pankreas salmon menggunakan data produksi dari peternakan Norwegia. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2024, 9861677.

Paritova, A., Nurgaliyev, A., Nurgaliyeva, G., Abekeshev, N., Abuova, A., Zakirova, F.,... & Zhanabayeva, D. (2024). Pengaruh diet dari dua strain probiotik (*Leuconostoc mesenteroides*, *Lactococcus lactis*) terhadap kinerja pertumbuhan, respons imun, dan mikrobiota usus pada ikan nila (*Oreochromis niloticus*). *PLOS ONE*, 19(10), e0312580.

Paritova, A., Ussenbayev, A., Abdessan, R., Assauova, Z., Kuzembekova, G., Omarbekova, G.,... & Saingaliyeva, A.

- (2025). Dampak probiotik multi-strain (*Leuconostoc mesenteroides*, *Lactococcus lactis*) terhadap mikrobiota usus, respons imun, dan performa pertumbuhan ikan lele Afrika (*Clarias gariepinus*). *Frontiers in Immunology*, 16, 1625-199.
- Peladarinos, N., Piromalis, D., Cheimaras, V., Tserepas, E., Munteanu, R., & Papageorgas, P. (2023). Meningkatkan pertanian cerdas dengan menerapkan *Digital Twins*: Sebuah tinjauan komprehensif. *Sensor*, 23(16), 7128. <https://doi.org/10.3390/s23167128>
- Petersen, E. H., Phuong, T. H., & Susanto, R. H. (2018). Lobster aquaculture in eastern Indonesia: Status, challenges, and recommendations. *Global Seafood Advocate*, Global Seafood Alliance. <https://www.globalseafood.org/>
- Pratama, R. I., Suryanto, A., & Putri, M. R. A. (2024). Sistem pemberian pakan otomatis berbasis AI dalam budidaya udang. HIMAQUA IPB Technical Report. <https://himakua-orm.ipb.ac.id/>
- Puri, P., Sharma, J., & Singh, R. (2022). Suplementasi mikroba bioterapeutik untuk meningkatkan kesehatan ikan: Tren perkembangan penggunaan probiotik, prebiotik, dan sinbiotik dalam budidaya ikan. *Patogen dan Imunitas*, 7(1), 165.
- Qu, J., Ren, R., Wu, Z., Huang, J., & Zhang, Q. (2025). From Waste to Resource: Algal–Bacterial Systems and Immobilization Techniques in Aquaculture Effluent Treatment. *Clean*

- Rahman, LF, Alam, L., Marufuzzaman, M., & Sumaila, UR (2021). Ketertelusuran keberlanjutan dan keamanan dalam sistem manajemen rantai pasokan perikanan menggunakan teknologi identifikasi frekuensi radio. *Foods*, 10(10), 2265. <https://doi.org/10.3390/foods10102265>
- Rai, N., Kachore, A., Julka, JM, Panigrahi, A., Das, SP, Nan, FH, Kumar, V., & Roy, S. (2025). Strategi simbiosis: Menguraikan peran mikrobiota usus dalam nutrisi dan metabolisme ikan dan kerang. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 15, 1639426. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2025.1639426>
- Ramiro, B. de O., Wasielesky, W., Pimentel, OALF, Sun, T., McAlhaney, E., Urick, S., Gonçalves, FH, van Senten, J., Schwarz, MH, & Krummenauer, D. (2024). Penilaian kualitas air, pertumbuhan *Penaeus vannamei*, dan anggaran parsial dalam BFT super-intensif dan RAS: Perbandingan antara sistem akuakultur berkelanjutan. *Sustainability*, 16(24), 11005. <https://doi.org/10.3390/su162411005>
- Rasal, KD, Kumar, PV, Risha, S., Asgolkar, P., Harshavarthini, M., Acharya, A.,... & Sundaray, JK (2024). Peningkatan genetik dan sumber daya genom spesies cyprinid penting: Status dan prospektif masa depan untuk produksi berkelanjutan. *Frontiers in Genetics*, 15, 1398084. <https://doi.org/10.3389/fgene.2024.1398084>

- Ratan, R. (2026). Catch & Culture Review: Precision aquaculture can shape greater advancements in aquaculture. Global Seafood Alliance. <https://www.globalseafood.org/>
- Rathor, GS, & Swain, B. (2024). Kemajuan dalam vaksinasi ikan: Inovasi terkini dan cakrawala masa depan dalam manajemen kesehatan akuakultur. *Ilmu Terapan*, 14(13), 5672.
- Ratnawati, E., Mustafa, A., & Daud, R. (2016). Faktor pengelolaan yang mempengaruhi tingkat produksi rumput laut *Kappaphycus alvarezii* di perairan pantai selatan Provinsi Sulawesi Selatan. *Jurnal Penelitian Budidaya Perairan*, 5(3), 491–504. <https://doi.org/10.15578/jra.5.3.2010>
- Ren, X., Wang, Q., Shao, H., Xu, Y., Liu, P., & Li, J. (2021). Pengaruh suhu rendah terhadap fisiologi, perilaku, dan pertumbuhan udang dan kepiting: Sebuah tinjauan. *Frontiers in Marine Science*, 8, 746177. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.746177>
- Riany, C. F., Partelow, S., Nagel, B., (2023). Governance challenges for Indonesian pond aquaculture clusters: Insights from milkfish production in Gresik. *Frontiers in Aquaculture*, 2, 1254593. <https://doi.org/10.3389/faquc.2023.1254593>
- Rieder, J., Berezenko, A., Meziti, A., & Adrian-Kalchhauser, I. (2025). Masa depan deteksi patogen dalam akuakultur: Laboratorium miniatur, uji kompatibel lapangan, DNA dan RNA lingkungan, CRISPR dan metatranskriptomik. *Akuakultur dan Perikanan*, 70(5), 70062.

- Rieuwpassa, F., Wibowo, I., Choesin, D. N., Gansalangi, F., Tomaso, A. M., Sambeka, Y., Nursatya, S. M., Wibowo, A., Balansa, W., & Barlian, A. (2024). Restorasi Mangrove Berbasis Komunitas Pesisir: Penyemaian, Monitoring, Dan Tantangan Ekologi. *JURNAL ILMIAH TATENGKORANG* Учредители: Pusat Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat, Politeknik Negeri Nusa Utara, 8(2), 50-56.
- Rigos, G., Padrs, F., Constenla, M., Jeroni, A., Kogiannou, D., Consuegra, S.,... & Mladineo, I. (2025). Pemanasan global mempengaruhi patogenesis penyakit ikan penting dalam budidaya perikanan di Eropa. *Laporan Budidaya Perairan*, 70(11), 70112.
- Rodríguez-Hernández, SAYA, Martínez-Castellanos, G., López-Méndez, MC, Reyes González, D., & González-Moreno, HR (2025). Biaya produksi dan kinerja pertumbuhan ikan nila (*Oreochromis niloticus*) dalam sistem produksi intensif: Tinjauan. *Keberlanjutan*, 17(4), 1745. <https://doi.org/10.3390/su17041745>
- Roques, S., Deborde, C., Richard, N., Skiba-Cassy, S., Moing, A., & Fauconneau, B. (2018). Metabolomik dan nutrisi ikan: Tinjauan dalam konteks pengembangan pakan berkelanjutan. *Tinjauan dalam Akuakultur*, 10(3), 591–615. <https://doi.org/10.1111/raq.12316>
- Rowan, NJ, Murray, N., Qiao, Y., O'Neill, EA, Clifford, E., Barceló, D., & Power, DM (2022). Transformasi digital inovasi ekologi lahan gambut (Paludikultur): Memungkinkan

- pergeseran paradigma menuju produksi berkelanjutan produk dan layanan ramah lingkungan secara *real-time*. *Science of The Total Environment*, 830, 156328. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156328>
- SA, J., Prathibanandhi, K., Sahana, A., MB, A., Moorthy, RD, & K, C. (2024). Sistem cerdas untuk akuakultur berkelanjutan: Fokus pada kualitas air. Dalam 2024 IEEE International Conference on Power, Electronics and Computing Technologies (ICPECTS) (hlm. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPECTS62210.2024.10780341>
- Sagymbek, F., Serikbaeva, AD, Abdigaliyeva, Ö. B., & Yelnazarkyzy, R. (2023). Probiotik dan aplikasinya dalam akuakultur untuk meningkatkan pertumbuhan dan imunitas ikan. *Jurnal Masyarakat Pertanian Internasional Korea*, 144(3), 16-25.
- Saldarriaga-Cordoba, M., Araya-León, H., Irgang, R., & Avendaño-Herrera, R. (2023). Pengembangan uji PCR untuk identifikasi spesifik patogen ikan *Tenacibaculum piscium*. *Jurnal Penyakit Ikan*, 46(2), 13764.
- Samosir, H., Muhaniq, MI, Muhamad, R., Dzikri, ZA, Ratu, N., Samosir, H.,... & Wicaksono, NN (2025). Menggunakan Mamdani berbasis logika *fuzzy* untuk memprediksi pemeliharaan larva ikan lele. *Jurnal Budidaya Perairan dan Perikanan Tropis*, 24, 28. <https://doi.org/10.62535/24tjgp28>
- Sathoria, P., & Roy, B. (2022). Produksi pangan berkelanjutan melalui budidaya padi-ikan terintegrasi di India: Tinjauan

singkat. Ketahanan Pangan & Keberlanjutan, 1(1), S1742170522000126. <https://doi.org/10.1017/S1742170522000126>

Schoina, E., Delbarre-Ladrat, C., Kolypczuk, L., Leroi, F., Passerini, D., & Nychas, GJE (2026). Aktivitas antimikroba dan antibiofilm dari strain bakteri *Pseudoalteromonas* yang diisolasi dari lingkungan laut terhadap patogen ikan potensial *Tenacibaculum discolor* strain FMCC B487. *Jurnal Akuakultur*, 6(1), 005.

Schoina, E., Marchand, L., Zykwinska, A., Siquin, C., Leroi, F., Delbarre-Ladrat, C., & Nychas, GJE (2024). Wawasan mendalam tentang sifat biofilm dari patogen ikan potensial *Tenacibaculum discolor* strain FMCC B487. *Jurnal Akuakultur*, 4(2), 006.

SeafoodSource. (2024). Innovative firms driving AI adoption in shrimp sector & Indonesia plans to modernize fishing villages, scale up aquaculture. SeafoodSource News. <https://www.seafoodsource.com/>

Sebayang, N., & Baroud, N. (2024). Budidaya perikanan berkelanjutan: Meningkatkan produktivitas ikan dengan teknik ramah lingkungan di Indonesia dan Libya. *Asian Journal of Fisheries and Aquaculture*, 1(2), 203. <https://doi.org/10.61650/ajfa.v1i2.203>

Senthilkumar, T., Panigrahi, S., Thirugnanam, N., & Raja, BKR (2025). Otomatisasi di sektor budidaya kerang untuk memastikan keberlanjutan dan ketahanan pangan. *Teknik*

- Pertanian, 7(11), 387. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7110387>
- Setiawan, B., Styawati, S., & Alim, S. (2024). Implementasi sistem IoT pada akuakultur dan hidroponik (akuaponik) modern untuk pertumbuhan ikan nila. *Jurnal Teknologi Informasi Progresif*, 9(1), 5896. <https://doi.org/10.30591/jpit.v9i1.5896>
- Shahin, S., Okomoda, VT, Ma, H., Ikhwanuddin, M., & Abdullah, MI (2023). Pakan alternatif berkelanjutan untuk akuakultur: Kondisi terkini dan perspektif masa depan. *Jurnal Tinjauan Penelitian Ilmiah Pertanika*, 9(3), 5. <https://doi.org/10.46754/ps.2023.07.005>
- Sharif, BMN, Rony, MTE, & Biswas, S. (2026). Ekonomi dan kinerja produksi budidaya Ompok pabda (Hamilton, 1822) di Bangladesh barat daya. *Asian Journal of Environmental Research*, 2026(3), 0002. <https://doi.org/10.69517/aier.2026.03.01.0002>
- Shenbagarajan, A., Aruneshkumar, G., Kannan, NM, & SK, V. (2025). Akuaponik berbasis media menggunakan komponen IoT untuk pertanian cerdas. *Jurnal Penelitian Internasional Kemajuan dalam Rekayasa dan Manajemen*, 11(2), 145. <https://doi.org/10.47392/irjaem.2025.0145>
- Shete, RP, Bongale, A., & Dharrao, D. (2025). Sistem kriptografi ringan dan IoT yang terukur untuk enkripsi di seluruh arsitektur GSM-MQTT dalam lingkungan akuakultur dengan keterbatasan sumber daya. *Engineering, Technology &*

Applied Science Research, 15(4),
10367. <https://doi.org/10.48084/etasr.10367>

Sivasankari, S., Rahul, SG, Panneerselvam, L., Rheema, TS, Jahnavi, C., & Devi, PK (2025). Sistem akuaponik cerdas berbasis pembelajaran mesin dengan pemantauan ikan dan tanaman terintegrasi. Dalam Konferensi Internasional Ketiga tentang Komputasi Inklusif (INCIP) 2025 (hlm. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INCIP64058.2025.11019619>

SM (2025). Prototipe sistem akuakultur IoT. Jurnal Penelitian Internasional Ilmu Komputer, 12(10), 3. <https://doi.org/10.26562/irjcs.2025.v12i10.03>

SM, Jeevagan, A., KB, & Prithiviraj, S. (2024). Desain prototipe *real-time* berbasis IoT untuk pemantauan ekosistem akuakultur cerdas menggunakan ESP32. Dalam Konferensi Internasional IEEE ke-10 tentang Komputasi, Komunikasi, dan Otomasi (ICoICI) tahun 2024 (hlm. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICoICI62503.2024.10696610>

Smina, MS, & Joseph, S. (2024). Pengaruh biofloc, pakan hidup, dan pakan formulasi terhadap kelangsungan hidup, pertumbuhan, dan komposisi proksimat seluruh tubuh pada pemeliharaan larva ikan pearlspot (*Eetroplus suratensis*). Jurnal Asosiasi Perikanan India, 51(1), 169403. <https://doi.org/10.56093/jifa.v51i1.169403>

Song, Y., Hu, Z., Liu, S., Luo, S., He, R., Yang, X., Li, S., Yang, X., An, Y., & Lu, Y. (2025). Pemanfaatan mikroalga dan eceng gondok sebagai sumber protein berkelanjutan untuk pangan

- dan pakan: Potensi nutrisi dan aplikasi fungsional. *Jurnal Kimia Pertanian dan Pangan*, 73(5), 2847–2865. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c11610>
- Srinivas, Y., Raju, KS, Ramesh, C., Reddy, K., Parasa, BS, Pavani, T., & Killamsetti, H. (2024). Desain dan pengembangan sistem pemantauan kualitas air dinamis untuk akuakultur. Dalam Konferensi Internasional 2024 tentang Teknologi Komunikasi Data Cerdas dan *Internet of Things* (IDCIoT) (hlm. 1-8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IDCIoT59759.2024.10467293>
- Sudibyo, H., Yuniko, FT, Fadel, A., Lesmana, LS, & Efendi, R. (2024). Sistem pemantauan budidaya perikanan berbasis IoT fish feeder sebagai implementasi smart farming. *Jurnal Kelautan, Pulau dan Pembangunan Berkelanjutan*, 8(2), 4544. <https://doi.org/10.35145/joisie.v8i2.4544>
- Suheri, A., Wijaya, D., & Kusuma, B. (2024). Penjualan Starlink di Indonesia: Peluang dan tantangan bagi pertahanan nasional. *Jurnal Pothan Kemhan*. <https://www.kemhan.go.id/pothan/>
- Sun, H., Wang, H., Huang, J., Wu, Y., Hu, Z., & Huang, Y. (2025). Sistem pemrosesan sampel satu langkah terintegrasi yang dimediasi enzim dan amplifikasi dupleks untuk deteksi cepat rhabdovirus Carpine dalam produk makanan hasil akuakultur. *Foods*, 14(22), 3929.
- Taghizadeh, S., & FardArani, ZN (2024). AquaticSafe sentinel: Sistem prediktif berbasis edge yang didukung IoT untuk pengawasan oksigen terlarut secara berkelanjutan dalam

- akuakultur. Dalam Konferensi Internasional ke-17 tentang Ilmu Komputer dan Teknologi Jaringan (CSNT) 2024 (hlm. 1-6).
- IEEE. <https://doi.org/10.1109/CSNT60213.2024.10545672>
- Tahmid. (2015). Distribusi ukuran rajungan di perairan Indonesia. [Detail bibliografis perlu dilengkapi].
- Tarunamulia, T., Sammut, J., & Rachmansyah, R. (2016). Penilaian kesesuaian perairan untuk budidaya ikan dalam keramba jaring apung berdasarkan model propagasi spasial ombak mendekati pantai. *Jurnal Penelitian Budidaya Perairan*, 4(2), 291–306. <https://doi.org/10.15578/JRA.4.2.2009>
- Techane, B., & Gebresenbet, G. (2023). Peran teknologi blockchain dalam mempromosikan sistem ketertelusuran dalam produksi dan rantai pasokan agribisnis. *Sensors*, 23(11), 5342. <https://doi.org/10.3390/s23115342>
- Teplitz, E., Mwainge, V., Wacira, TN, Ogwai, C., Mayianda, MJ, Ochieng, L.,... & Fiorella, KJ (2025). Surveilans penyakit dan resistensi antimikroba terhadap patogen nila di Danau Victoria, Kenya. *Journal of Fish Diseases*, 70(7), 70022.
- Thanomsit, C., Saowakoon, S., Prasatkaew, W., Ruttanakorn, S., Nanuam, J., Kangpanich, C.,... & Meemon, P. (2024). Pilihan perubahan tomografi koherensi optik (OCT) untuk analisis anatomi dan morfologi organisme akuatik: Studi kasus udang sungai raksasa (*Macrobrachium rosenbergii*). *Jurnal Sains Universitas Chiang Mai*, 51(1), 19. <https://doi.org/10.12982/cmjs.202.019>

- The Nature Conservancy. (2018). Strategies for Indonesia's seaweed aquaculture policy to enhance an established industry. The Nature Conservancy & Aquaculture Science. <https://www.aquaculturescience.org/>
- The Nature Conservancy. (2023). Seaweed can be an important piece of the climate puzzle. TNC Insights Series. <https://www.nature.org/>
- Thrush, M., Dunn, P., & Peeler, EJ (2011). Memantau penyakit yang muncul pada ikan dan kerang menggunakan sumber elektronik. *Transbound Emerg Dis*, 58(12), 1283.
- Tina, FW, Afsarimanesh, N., Nag, A., & Alahi, MEE (2025). Mengintegrasikan teknologi AIoT dalam akuakultur: Tinjauan sistematis. *Future Internet*, 17(5), 199. <https://doi.org/10.3390/fi17050199>
- Tkaczenko, H., & Kurhaluk, N. (2025). Beta-glukan sebagai aditif pakan fungsional dalam akuakultur modern. *Kormovoe Proizvodstvo*, 135, 263-284.
- Torres-Maravilla, E., Parra, M., Maisey, K., Vargas, R., Cabezas-Cruz, A., González, AR,... & Bermdez-Humarn, L. (2024). Pentingnya probiotik dalam budidaya ikan: Menuju identifikasi dan desain probiotik baru. *Mikroorganisme*, 12(3), 626.
- Tran-Minh, N. (2025). Sistem pemantauan kualitas air berbasis IoT untuk sistem akuakultur resirkulasi. *Jurnal Kesehatan dan Lingkungan*, 25(6), 366. https://doi.org/10.62985/j.huit_ojs.vol25.no6.366

- Trenggono, S. W. (2026). Strategi KKP wujudkan mimpi Prabowo bangun 4.000 Kampung Nelayan hingga 2029. Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia. <https://kampungnelayanmerahputih.kkp.go.id/>
- Troell, M., CostaPierce, BA, Stead, SM, Cottrell, RS, Brugere, C., Farmery, AK, Little, DC, Strand, Å., Pullin, RSV, Soto, D., Beveridge, MCM, Salie, K., Dresdner, J., Moraes Valenti, P., Blanchard, JL, James, P., Yossa, R., Allison, EH, Devaney, C., & Barg, U. (2023). Perspektif tentang kontribusi akuakultur terhadap Tujuan Pembangunan Berkelanjutan untuk peningkatan kesehatan manusia dan planet. *Jurnal Masyarakat Akuakultur Dunia*, 54(2), 199–302. <https://doi.org/10.1111/jwas.12946>
- U.S. Soybean Export Council [USSEC]. (2024). Shaping a sustainable future for Indonesia's
- Ubina, NA, Lan, H., Cheng, S., Chang, C., Lin, S., Zhang, K.,... & Hsieh, Y. (2023). Budidaya ikan cerdas berbasis kembaran digital dengan *Internet of Things* (AIoT) kecerdasan buatan. *Teknologi Pertanian*, 11(3), 100285. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100285>
- Ubiqu. (2024). Solusi internet untuk daerah pertambangan dan perkebunan: Layanan VSAT HTS Nusantara Satu. Ubiqu Indonesia. <https://ubiqu.id/>
- Verma, A. K., Dheeran, P., Krishnani, K. K., & Murugesan, K. (2025). Towards sustainable aquaculture: innovative strategies for reducing environmental carbon footprints

- across different aquaculture systems. *Annals of Animal Science*. 2025, 2478–2493. <https://doi.org/10.2478/aoas-2025-0066>
- Verner-Jeffreys, DW, Baron, S., Ching, B., & Chang, SF (2025). Budidaya Perairan: Tantangan dan kemajuan yang spesifik pada sektor tertentu. *Revue Scientifique dan Teknik*, 44(3), 3686.
- Veskovic-Moraanin, S., Miljasevic, M., & Nastasijevi, I. (2024). Resistensi antimikroba dalam akuakultur: Mitigasi risiko dalam konteks One Health. *Foods*, 13(15), 2448.
- Villarreal, H. (2023). Kemajuan, tantangan, dan peluang budidaya udang. *Jurnal Masyarakat Akuakultur Dunia*, 54(6), 13027.
- Voznyuk, K., & Bekh, V. (2025). Budidaya udang air tawar raksasa (*Macrobrachium rosenbergii* De Man, 1879) di Ukraina dan seluruh dunia: Sebuah tinjauan. *Pembaruan Ilmu Perikanan*, 2(2), 026-045. <https://doi.org/10.61976/fsu2025.02.026>
- Wang, Y., Guo, C., & He, J. (2024). Sirkovirus akuatik: Patogen yang muncul dalam akuakultur global dari penemuan hingga manajemen penyakit. *Jurnal Virologi*, 99(12), 01737-24.
- Warsa, A., Sembiring, T., & Astuti, L. P. (2023). Produktivitas dan laju pertumbuhan ikan yang dipelihara pada kolam keramba jaring apung SMART di Waduk Jatiluhur, Purwakarta, Jawa Barat. *Berita Biologi*, 2023(798), 1–10. <https://doi.org/10.55981/beritabiologi.2023.798>

- Wibowo, A., Suhufan, M. A., Bellicia, A.. (2023). Rambu-rambu kebijakan ekonomi biru di Indonesia. Transparency International Indonesia. <https://ti.or.id/>
- Widowati, W., Budiman, C., Suzery, M., Hidayat, JW, Sutrisno, S., Triyana, E., & Gaber, T. (2025). Strategi ketahanan pangan masyarakat melalui pertanian perkotaan terpadu berkelanjutan. *Jurnal Internasional Keterlibatan dan Pembangunan Masyarakat*, 3(2), 82. <https://doi.org/10.59581/ijced.v3i2.82>
- Wijesekara, D. R., Kang, M., & Park, J. K. (2023). The utility of satellites and autonomous remote sensing platforms for monitoring offshore aquaculture farms: A case study for canopy forming kelps. *Frontiers in Marine Science*, 7, 520223. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.520223>
- Witomo, & Nurlaili. (2015). Potensi budidaya lobster di Pulau Lombok melalui keramba jaring apung. [Detail bibliografis perlu dilengkapi].
- Xu, K., Duan, W., Xiao, J., Tao, M., Zhang, C., Liu, Y., & Liu, S. (2015). Pengembangan dan aplikasi teknologi biologi dalam pemuliaan genetik ikan. *Sains Kehidupan Tiongkok*, 58(8), 798-809. <https://doi.org/10.1007/s11427-015-4798-3>
- Yadav, NK, Deepti, M., Patel, AB, Kumar, P., Angom, J., Debbarma, S., Singh, SK, Deb, S., Lal, J., Vaishnav, A., Das, R., Kashyap, S., & Meena, DK (2025). Membedah serangga sebagai sumber daya hayati protein berkelanjutan dalam pakan ikan untuk keberlanjutan akuakultur. *Jurnal Ilmu dan*

Teknologi Pakan Hewan, 44, 318–345. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00318-5>

Yilmaz, S., Ergün, S., Yiit, M., & Yilmaz, E. (2022). Tinjauan komprehensif tentang penggunaan aditif pakan untuk melawan penyakit ikan dan peningkatan status kesehatan ikan di sektor akuakultur Turki. *Akuakultur*, 544, 710.

Ylmaz, S., Ergn, S., Yiit, M., & Ylmaz, E. (2022). Tinjauan komprehensif tentang penggunaan aditif pakan untuk melawan penyakit ikan dan peningkatan status kesehatan ikan di sektor akuakultur Turki. *Akuakultur*, 544, 710.

Ylstra, B., & Araujo, C. (2024). Pakan alternatif untuk akuakultur berkelanjutan: Tinjauan terstruktur komprehensif. *Jurnal Inovasi Sains dan Teknologi dalam Akuakultur*, 10(2), 150–188. <https://doi.org/10.11113/jostip.v10n2.150>

Yuspita, N. L. E., & Felisha, N. A. (2025). Analisis kelayakan usaha budidaya ikan kerapu sistem keramba jaring apung di Teluk Pegamatan, Bali. *Jurnal Budidaya Perairan dan Keberlanjutan*, 9(1), 1774. <https://doi.org/10.36355/jas.v9i1.1774>

Zaloilo, I., Zaloilo, O., Rud, Y., Hrytsyniak, I., & Zaloilo, Y. (2021). Penggunaan probiotik dalam akuakultur (ulasan). *Ilmu Perikanan dan Pendidikan*, 2(2), 59.

Zhou, Q., & Chen, S. (2016). Kemajuan dalam studi mekanisme penentuan jenis kelamin dan teknik pengendalian jenis kelamin pada *Cynoglossus semilaevis* (ikan sole lidah setengah halus). *Frontiers in Agricultural Science and*

Engineering, 3(2), 93. <https://doi.org/10.15302/j-fase-2016093>

Zhu, X., Zhang, L., & Chen, F. (2022). Dapatkah *Chlorella pyrenoidosa* dimanfaatkan sebagai sumber nutrisi alternatif dalam pakan akuakultur? Sebuah studi tentang nilai gizi dan faktor antinutrisi. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1069760. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1069760>

PROFIL PENULIS



Resmi Rahmawati, S.Pd., M.Si. lahir di Bandung pada 13 September 1992. Saat ini penulis berdomisili di Komplek Pondok Banten Indah, Blok F4 No. 21, Tembung, Kecamatan Cipocok Jaya, Kota Serang, Banten 42126.

Penulis memiliki ketertarikan yang besar terhadap pengembangan ilmu pengetahuan dan pendidikan serta senantiasa berupaya memperluas wawasan melalui berbagai aktivitas akademik dan pengembangan diri.

Di sela-sela aktivitasnya, penulis memiliki hobi *travelling* dan membaca. Kedua kegiatan tersebut menjadi sarana untuk menambah pengalaman, memperluas perspektif, serta memperoleh inspirasi dalam berkarya dan berbagi pengetahuan. Melalui buku ini, penulis berharap dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan mendorong pemanfaatan teknologi dalam pengembangan budidaya perairan yang lebih maju dan berkelanjutan.

Pesan penulis kepada pembaca adalah, **“Tetap semangat dan positif di setiap kondisi.”** Sikap optimis dan semangat untuk terus belajar merupakan modal penting dalam menghadapi berbagai tantangan serta meraih keberhasilan di masa depan.



Ita Apriani, S.Pi., M.Si. lahir di Lampung Utara pada 7 April 1991. Penulis menempuh pendidikan S1 pada Program Studi Teknologi dan Manajemen Perikanan Budidaya di Institut Pertanian Bogor (IPB), kemudian melanjutkan pendidikan S2 pada Program Studi Ilmu Akuakultur di Institut Pertanian Bogor (IPB).

Saat ini, penulis berprofesi sebagai dosen pada Program Studi Ilmu Perikanan, Fakultas Pertanian, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Melalui karya ini, penulis berharap buku ini dapat menjadi ilmu yang bermanfaat bagi pembaca.



Robby Maulana Putra, S.Si., M.Pi. lahir di Salatiga pada 15 Februari 1991. Penulis menempuh pendidikan S2 Manajemen Sumber Daya Perairan. Dalam bidang kepenulisan, penulis telah menghasilkan buku ***Metode Pengolahan Air Limbah dan Kehidupan dalam Tabung Reaksi.***

Penulis juga memiliki pengalaman riset bertema bioprospeksi bakteri penghasil senyawa antifouling dan kandidat antibiotik. Saat ini, penulis berprofesi sebagai dosen. Melalui karya ini, penulis menyampaikan pesan bahwa teknologi adalah alat, sedangkan keberhasilan penerapan teknologi tetap bertumpu pada ketekunan dalam memahami dan terus berinovasi.



Lilis Nurbaiti, S.Pi., M.Si. lahir di Bandar Lampung pada 4 Mei 2000. Penulis menempuh pendidikan S1 Pemanfaatan Sumberdaya Perikanan di Institut Pertanian Bogor, kemudian melanjutkan pendidikan S2 Teknologi Perikanan

Laut di Institut Pertanian Bogor.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik, penelitian, dan pengembangan ilmu perikanan. Penulis memiliki ketertarikan pada penerapan teknologi untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas sektor perikanan. Selain itu, penulis juga mengikuti berbagai pelatihan, seminar, dan kegiatan ilmiah yang berkaitan dengan inovasi teknologi perikanan.

Saat ini, penulis berprofesi sebagai dosen di Jurusan Perikanan dan Kelautan, Politeknik Negeri Lampung, dengan fokus pengajaran di bidang perikanan tangkap. Penulis juga memiliki minat dan pengembangan keilmuan pada bidang budidaya berbasis teknologi.



Ahmad Shifa Uka, S.Si., M.Si. lahir di Serang pada 24 Juni 1992. Penulis menempuh pendidikan S1 Biologi di Universitas Pendidikan Indonesia dan melanjutkan pendidikan S2 Biomanajemen di Institut Teknologi Bandung.

Penulis merupakan akademisi dan praktisi di bidang biomanajemen sumber daya hayati yang memfokuskan risetnya pada manajemen akuakultur. Ia memiliki pengalaman profesional sebagai *Production Manager* dan *ASC (Aquaculture Stewardship Council) Ecolabel Assessor* di industri akuakultur, dengan tanggung jawab dalam memastikan kepatuhan terhadap standar keberlanjutan internasional serta efisiensi sarana produksi.

Sejak tahun 2025, penulis aktif mengabdikan sebagai dosen Ilmu Perikanan di Fakultas Pertanian, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Melalui karya ini, penulis berharap dapat mendorong implementasi akuakultur berbasis teknologi yang berkelanjutan.

Pesan penulis kepada pembaca adalah bahwa transformasi menuju *Smart Aquaculture* bukan sekadar tentang adopsi alat canggih, melainkan tentang bagaimana menyelaraskan dinamika sistem sosial-ekologi dengan efisiensi biologis. Melalui teknologi 4.0, terdapat kesempatan untuk menciptakan kedaulatan pangan yang produktif secara ekonomi sekaligus menjaga harmoni dengan ekosistem alam demi keberlanjutan masa depan.



Rizka Helisia Putri, S.Pi., M.Si. lahir di Bandar Lampung pada 16 Juni 2025. Penulis menempuh pendidikan S1 Budidaya Perairan dan melanjutkan pendidikan S2 Manajemen Wilayah Pesisir dan Laut.

Penulis memiliki pengalaman bekerja di MT Mandala Finance Tbk, sebagai *frontliner* di KB Bukopin, serta sebagai dosen swasta. Saat ini, penulis berprofesi sebagai dosen pada Program Studi Teknologi Akuakultur, Politeknik Negeri Lampung.

Melalui buku ini, penulis mengajak pembaca yang hidup di era serba digital untuk memahami bahwa akuakultur juga terus berkembang mengikuti kemajuan teknologi. *Smart Aquaculture* bukan hanya tentang budidaya, tetapi juga tentang bagaimana memanfaatkan teknologi, data, dan ide kreatif untuk membangun sistem yang lebih cerdas dan berkelanjutan. Penulis berharap pembaca berani berpikir kritis, tidak hanya mengikuti cara lama, serta mampu mengeksplorasi hal-hal baru di dunia perikanan dan kelautan.

Bagi penulis, masa depan bukan milik mereka yang paling pintar, tetapi milik mereka yang paling adaptif.



Safira Meidina Nursatya, S.Kel., M.Si. lahir di Bandung pada 12 Mei 1995. Penulis menempuh pendidikan S1 Ilmu Kelautan di Universitas Jenderal Soedirman (UNSOED) dan melanjutkan pendidikan S2 Bioteknologi di Institut Teknologi Bandung (ITB).

Penulis memiliki rekam jejak riset yang mencakup aktivitas antibakteri rumput laut terhadap bakteri *fouling*, hidrolisat protein ikan, pengembangan biomaterial, hingga upaya restorasi mangrove berbasis komunitas. Saat ini, penulis berprofesi sebagai dosen pada Program Studi Ilmu Perikanan, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa (UNTIRTA).

Melalui karya ini, penulis berharap pembaca dapat memahami bahwa inovasi teknologi 4.0 merupakan kunci bagi masa depan akuakultur yang lebih cerdas dan ramah lingkungan. Melalui konsep akuakultur hijau, buku ini diharapkan dapat memberikan inspirasi untuk menciptakan sistem budidaya yang presisi, efisien, dan berkelanjutan bagi ekosistem perairan.



Aryo Wenang Wicaksono, S.Pi., M.Si. lahir di Jakarta pada 9 Oktober 1996. Penulis menempuh pendidikan S1 Perikanan di Universitas Sultan Ageng Tirtayasa pada tahun 2014–2019, kemudian melanjutkan pendidikan S2 Ilmu Akuakultur di Institut Pertanian Bogor pada tahun 2019–2023.

Penulis memiliki pengalaman sebagai dosen pada Program Studi Teknologi dan Manajemen Pembenihan Ikan, Sekolah Vokasi, IPB pada tahun 2024–2025. Saat ini, penulis berprofesi sebagai dosen pada Program Studi Ilmu Perikanan, Fakultas Pertanian, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa sejak tahun 2024 hingga sekarang.

Melalui buku ini, penulis berharap teknologi 4.0 dapat terasa lebih dekat dan bersahabat dengan dunia budidaya perairan. Penulis juga berharap pembaca memperoleh wawasan baru yang dapat langsung diterapkan di lapangan.

Buku referensi yang berjudul *Smart Aquaculture: Budidaya Perairan Berbasis Teknologi 4.0* membahas penerapan teknologi modern dalam kegiatan budidaya perairan untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan keberlanjutan. Buku ini menguraikan pemanfaatan teknologi seperti sensor kualitas air, pemberian pakan otomatis, pemantauan digital, serta pengelolaan data dalam mendukung sistem budidaya yang lebih cerdas dan terkontrol.

Disusun secara sistematis, buku ini dapat menjadi referensi bagi masyarakat umum. Melalui pembahasan konsep dan penerapan teknologi 4.0, pembaca diharapkan mampu memahami peluang inovasi dalam pengembangan budidaya perairan yang lebih efektif, ramah lingkungan, dan berdaya saing.