

**REFRAMING BIOFLOC AQUACULTURE: LOCAL ADAPTATION AND SUSTAINABILITY IN VILLAGE-BASED SYSTEMS****MEMBINGKAI ULANG AKUAKULTUR BIOFLOK: ADAPTASI LOKAL DAN KEBERLANJUTAN DALAM SISTEM BERBASIS DESA****Sucipto**

Universitas Lambung Mangkurat, Kalimantan Selatan, Indonesia

\*kacipto321@gmail.com

*\*Corresponding Author***ABSTRACT**

*This study concludes that the implementation of the biofloc system in Sarang Tiung Village represents an effective and adaptive aquaculture approach that integrates technical, environmental, and social dimensions. The findings indicate that biofloc technology enhances production efficiency through more optimal feed utilization, reduced operational costs, and increased harvest yields, while simultaneously supporting environmental sustainability by minimizing waste discharge and maintaining stable water quality. Furthermore, the success of this system is strongly influenced by local adaptation and farmer-driven innovation, demonstrating that biofloc practices are shaped not only by technical knowledge but also by socio-cultural and economic contexts. These findings contribute to the advancement of aquaculture studies by emphasizing the importance of a socio-ecological perspective in understanding technology adoption and sustainability. The study also provides practical insights for the development of community-based biofloc models and highlights the need for policy support, including extension services and capacity-building initiatives. However, given the qualitative and localized scope of the research, further studies are recommended to explore broader applications through mixed-method approaches and cross-regional comparative analyses in order to strengthen generalizability and assess long-term sustainability.*

**Keywords:** *Biofloc Technology; Freshwater Aquaculture; Socio-Ecological Systems; Sustainable Aquaculture; Local Adaptation.*

**ABSTRAK**

Studi ini menyimpulkan bahwa penerapan sistem bioflok di Desa Sarang Tiung merupakan pendekatan akuakultur yang efektif dan adaptif yang mengintegrasikan dimensi teknis, lingkungan, dan sosial. Temuan menunjukkan bahwa teknologi bioflok meningkatkan efisiensi produksi melalui pemanfaatan pakan yang lebih optimal, penurunan biaya operasional, serta peningkatan hasil panen, sekaligus mendukung keberlanjutan lingkungan dengan meminimalkan pembuangan limbah dan menstabilkan kualitas air. Selain itu, keberhasilan sistem ini sangat dipengaruhi oleh adaptasi lokal dan inovasi yang digerakkan oleh pembudidaya, yang menunjukkan bahwa praktik bioflok tidak hanya dibentuk oleh pengetahuan teknis, tetapi juga oleh konteks sosial-budaya dan ekonomi. Hasil penelitian ini berkontribusi terhadap pengembangan kajian akuakultur dengan menekankan pentingnya perspektif sosio-ekologis dalam memahami adopsi teknologi dan keberlanjutan. Studi ini juga memberikan wawasan praktis untuk pengembangan model bioflok berbasis komunitas serta menegaskan perlunya dukungan kebijakan, termasuk layanan penyuluhan dan peningkatan kapasitas. Namun demikian, mengingat cakupan penelitian yang bersifat kualitatif dan terlokalisasi, penelitian lanjutan direkomendasikan untuk mengeksplorasi penerapan yang lebih luas melalui pendekatan metode campuran serta analisis komparatif lintas wilayah guna memperkuat generalisasi dan evaluasi keberlanjutan jangka panjang.

**Keywords:** *Teknologi Bioflok; Akuakultur Air Tawar; Sistem Sosio-Ekologis; Akuakultur Berkelanjutan; Adaptasi Lokal*

## 1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan pesat populasi global telah meningkatkan permintaan terhadap protein hewani, sehingga menempatkan akuakultur di garis depan sistem produksi pangan dunia. Laporan terbaru menunjukkan bahwa akuakultur telah melampaui perikanan tangkap dalam kontribusinya terhadap konsumsi ikan global, menandai terjadinya transisi struktural dalam sistem pangan global (FAO, 2022). Pergeseran ini tidak hanya mencerminkan menurunnya stok ikan liar, tetapi juga meningkatnya efisiensi dan skalabilitas sistem akuakultur. Secara khusus, akuakultur air tawar muncul sebagai sektor yang krusial karena sifatnya yang adaptif, biaya produksi yang relatif lebih rendah, serta aksesibilitasnya bagi produsen skala kecil di wilayah berkembang (Boyd et al., 2020). Sebagai sistem produksi yang terkontrol, akuakultur mengintegrasikan komponen biologis, lingkungan, dan teknologi untuk mengoptimalkan produktivitas, sehingga menjadi solusi strategis dalam menjawab tantangan ketahanan pangan. Namun demikian, meskipun perannya semakin penting, pengembangan akuakultur masih menghadapi berbagai kendala signifikan, termasuk keterbatasan sumber daya, degradasi lingkungan, dan inefisiensi pemanfaatan pakan, yang secara kolektif mengancam keberlanjutan jangka panjangnya (Tacon & Metian, 2021).

Tantangan tersebut semakin nyata dalam sistem akuakultur air tawar, di mana ketersediaan dan kualitas air menjadi faktor penentu utama keberhasilan produksi. Meningkatnya kompetisi terhadap sumber daya air tawar, yang didorong oleh kebutuhan sektor pertanian, industri, dan domestik, telah memperbesar tekanan terhadap kegiatan akuakultur, khususnya di wilayah pedesaan dan peri-urban (Ahmed & Thompson, 2019; Naylor et al., 2021). Selain itu, intensifikasi praktik akuakultur juga menyebabkan akumulasi limbah organik yang berkontribusi terhadap pencemaran air dan degradasi ekosistem. Sisa pakan, limbah metabolik, serta peningkatan beban nutrisi sering kali menurunkan kualitas air, yang pada akhirnya berdampak negatif terhadap kesehatan ikan, performa pertumbuhan, dan produktivitas secara keseluruhan (Boyd et al., 2020). Di samping itu, efisiensi pakan tetap menjadi isu krusial, mengingat biaya pakan menyumbang proporsi besar dalam total biaya produksi. Konversi pakan yang tidak efisien tidak hanya menurunkan keuntungan, tetapi juga memperparah dampak lingkungan melalui pelepasan nutrisi ke dalam sistem perairan (Tacon & Metian, 2021). Keterkaitan berbagai permasalahan ini menegaskan perlunya pendekatan inovatif yang mampu secara simultan meningkatkan produktivitas, mengurangi dampak lingkungan, serta meningkatkan efisiensi sumber daya.

Sebagai respons terhadap berbagai tantangan tersebut, inovasi teknologi dalam akuakultur semakin mendapat perhatian, dengan sistem bioflok muncul sebagai salah satu pendekatan yang paling menjanjikan. Teknologi bioflok (*biofloc technology* / BFT) merupakan sistem akuakultur berbasis mikroba yang memanfaatkan bakteri heterotrof untuk mengonversi limbah organik menjadi biomassa mikroba, yang selanjutnya dapat dimanfaatkan sebagai sumber pakan tambahan bagi organisme budidaya (Avnimelech, 2015; Kumar et al., 2022). Dengan menjaga keseimbangan rasio karbon terhadap nitrogen, sistem bioflok mendorong terbentuknya agregat mikroba yang mampu meningkatkan kualitas air sekaligus memperkuat daur ulang nutrisi. Studi terkini menunjukkan bahwa sistem bioflok dapat secara signifikan menurunkan rasio konversi pakan, meningkatkan performa pertumbuhan, serta meminimalkan kebutuhan pergantian air, sehingga mampu menjawab berbagai tantangan utama dalam sistem akuakultur konvensional (Emerenciano et al., 2022; Ahmad et al., 2023). Selain itu, kebutuhan pergantian air yang lebih rendah menjadikan sistem bioflok sangat relevan untuk diterapkan di wilayah dengan keterbatasan sumber daya air, sehingga semakin memperkuat perannya dalam pengembangan akuakultur berkelanjutan.

Di luar keunggulan teknisnya, sistem bioflok juga sejalan dengan prinsip akuakultur berkelanjutan yang menekankan integrasi dimensi lingkungan, ekonomi, dan sosial. Praktik akuakultur berkelanjutan bertujuan menyeimbangkan produktivitas dengan integritas ekologis, sehingga kegiatan produksi tidak merusak kesehatan ekosistem perairan maupun

kesejahteraan masyarakat lokal (FAO, 2022). Teknologi bioflok berkontribusi terhadap tujuan tersebut melalui pengurangan pembuangan limbah, peningkatan pemanfaatan nutrisi, serta penguatan ketahanan sistem. Selain itu, potensi peningkatan produktivitas dan penurunan biaya operasional menjadikan sistem bioflok menarik bagi pembudidaya skala kecil, khususnya di wilayah pedesaan yang memiliki keterbatasan akses terhadap sumber daya dan modal (Emerenciano et al., 2022). Dengan demikian, teknologi bioflok tidak hanya merupakan inovasi teknis, tetapi juga peluang sosial-ekonomi untuk meningkatkan mata pencaharian serta mendorong pembangunan inklusif di komunitas berbasis akuakultur.

Meskipun kajian mengenai sistem bioflok terus berkembang, literatur yang ada masih didominasi oleh pendekatan kuantitatif yang berfokus pada indikator produksi seperti laju pertumbuhan, rasio konversi pakan (*feed conversion ratio* / FCR), tingkat kelangsungan hidup, dan parameter kualitas air. Walaupun studi-studi tersebut memberikan wawasan penting mengenai kinerja teknis sistem bioflok, aspek sosial-budaya dan kontekstual yang mempengaruhi adopsi dan implementasi teknologi seringkali terabaikan. Faktor-faktor seperti pengetahuan lokal, pengalaman pembudidaya, dinamika komunitas, serta dukungan kelembagaan memiliki peran penting dalam membentuk praktik dan adaptasi teknologi bioflok di lapangan (Belton et al., 2020; Joffre et al., 2023). Ketiadaan perspektif kualitatif ini membatasi pemahaman mengenai bagaimana inovasi teknologi diintegrasikan ke dalam sistem produksi lokal serta bagaimana interaksinya dengan struktur sosial-ekonomi yang ada.

Kesenjangan ini menjadi semakin penting dalam konteks akuakultur pedesaan, di mana praktik produksi sangat dipengaruhi oleh sistem ekologis dan sosial setempat. Dalam kondisi demikian, adopsi teknologi baru bukan sekadar keputusan teknis, melainkan proses kompleks yang dipengaruhi oleh norma budaya, pertimbangan ekonomi, serta kondisi lingkungan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa keberhasilan inovasi akuakultur sangat bergantung pada kesesuaiannya dengan praktik lokal serta kemampuan pembudidaya dalam menyesuaikannya dengan konteks spesifik (Joffre et al., 2023). Namun demikian, masih terdapat keterbatasan penelitian kualitatif mendalam yang mengeksplorasi dinamika tersebut, khususnya pada tingkat desa. Pemahaman mengenai bagaimana sistem bioflok dipersepsikan, ditafsirkan, dan dimodifikasi oleh pembudidaya lokal menjadi penting dalam merancang strategi yang kontekstual dan berkelanjutan.

Menjawab kesenjangan tersebut memerlukan pergeseran pendekatan dari evaluasi teknis semata menuju pendekatan yang lebih holistik dengan mengintegrasikan dimensi sosial dan ekologis. Metode penelitian kualitatif menawarkan kerangka yang relevan untuk menangkap kompleksitas praktik akuakultur, memungkinkan peneliti untuk mengeksplorasi pengalaman, persepsi, dan proses pengambilan keputusan pembudidaya. Pendekatan ini dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai faktor-faktor yang mendorong maupun menghambat adopsi teknologi bioflok, serta bagaimana teknologi tersebut diintegrasikan ke dalam sistem produksi lokal. Dengan menggunakan perspektif kualitatif, mekanisme dasar yang mendorong inovasi dan adaptasi dalam konteks akuakultur pedesaan dapat diungkap secara lebih komprehensif.

Dalam konteks tersebut, penelitian ini berfokus pada implementasi sistem bioflok di Desa Sarang Tiung, sebuah wilayah pedesaan di mana akuakultur air tawar memiliki peran penting dalam menopang mata pencaharian masyarakat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana teknologi bioflok dipraktikkan, diadaptasi, dan dipahami oleh pembudidaya ikan lokal, dengan perhatian khusus pada praktik teknis, adaptasi lokal, serta dampak ekonomi dan lingkungan yang dirasakan. Melalui desain penelitian kualitatif, studi ini berupaya menangkap pengalaman nyata pembudidaya serta mengeksplorasi dinamika sosio-ekologis yang membentuk implementasi bioflok. Dengan menggunakan wawancara mendalam, observasi, dan analisis kontekstual, penelitian ini menyajikan pemahaman yang komprehensif mengenai bagaimana sistem bioflok berfungsi dalam konteks lokal tertentu.

Temuan penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi baik secara teoritis maupun praktis dalam pengembangan kajian akuakultur. Secara teoritis, penelitian ini memperkaya pemahaman mengenai akuakultur sebagai sistem sosio-teknis, dengan menekankan pentingnya integrasi aspek sosial dan ekologis dalam inovasi teknologi. Dengan mengadopsi pendekatan kualitatif, studi ini juga menantang dominasi paradigma kuantitatif dalam penelitian akuakultur serta menunjukkan pentingnya analisis berbasis konteks. Secara praktis, penelitian ini memberikan wawasan mengenai pengembangan model bioflok berbasis komunitas yang mampu meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan. Wawasan ini dapat menjadi dasar dalam perancangan program penyuluhan, peningkatan kapasitas, serta intervensi kebijakan yang mendukung praktik akuakultur berkelanjutan.

Lebih lanjut, penelitian ini memiliki implikasi kebijakan yang penting, khususnya dalam konteks pembangunan pedesaan dan ketahanan pangan. Seiring dengan meningkatnya perhatian pemerintah dan lembaga pembangunan terhadap akuakultur berkelanjutan, diperlukan strategi berbasis bukti yang mempertimbangkan konteks lokal serta perspektif para pemangku kepentingan. Dengan menyediakan analisis mendalam mengenai implementasi bioflok di tingkat desa, penelitian ini berkontribusi dalam pengembangan kerangka kebijakan yang lebih inklusif dan adaptif. Kerangka tersebut dapat mendukung perluasan penerapan teknologi bioflok dengan tetap memastikan aksesibilitas dan manfaatnya bagi pembudidaya skala kecil. Pada akhirnya, penelitian ini menegaskan pentingnya menjembatani kesenjangan antara inovasi teknologi dan praktik lokal, sebagai upaya untuk mendorong pengembangan sistem akuakultur yang berkelanjutan.

## 2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dengan desain studi kasus untuk mengeksplorasi implementasi sistem bioflok sebagai praktik sosio-teknologis dalam konteks lokal tertentu. Penelitian kualitatif sangat sesuai untuk mengkaji fenomena kompleks yang bergantung pada konteks, di mana interaksi sosial, makna, dan praktik adaptif memegang peranan penting (Creswell & Poth, 2018; Braun & Clarke, 2021). Strategi studi kasus memungkinkan investigasi mendalam terhadap proses kontemporer dalam setting kehidupan nyata, terutama ketika batas antara fenomena dan konteks tidak tampak secara jelas (Yin, 2018; Stake, 2020). Dalam penelitian ini, sistem bioflok tidak hanya dipahami sebagai inovasi teknis, tetapi juga sebagai praktik yang tertanam secara sosial dan dipengaruhi oleh pengetahuan lokal, kondisi lingkungan, serta dinamika kelembagaan. Penelitian dilaksanakan di Desa Sarang Tiung, sebuah wilayah pesisir-pedesaan yang memiliki karakteristik kegiatan akuakultur air tawar, di mana sistem bioflok telah diadopsi oleh pembudidaya ikan setempat. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada relevansinya sebagai klaster akuakultur yang sedang berkembang serta representasinya terhadap sistem produksi berbasis komunitas skala kecil. Informan dipilih menggunakan teknik *purposive sampling* untuk mengidentifikasi individu yang memiliki pengalaman langsung dalam akuakultur bioflok, termasuk pembudidaya ikan utama, penyuluh perikanan, serta pemangku kepentingan lokal seperti aparat desa. Untuk memperluas jaringan partisipan yang relevan dan menangkap beragam perspektif, teknik *snowball sampling* kemudian digunakan, di mana informan awal merekomendasikan partisipan tambahan yang memiliki pengetahuan terkait (Naderifar et al., 2017; Parker et al., 2019).

Pengumpulan data dilakukan melalui berbagai teknik kualitatif guna memastikan pemahaman yang komprehensif terhadap fenomena penelitian. Wawancara mendalam digunakan sebagai metode utama untuk menggali pengalaman, persepsi, dan interpretasi partisipan terhadap praktik bioflok, sehingga memungkinkan eksplorasi wawasan yang tidak mudah diamati secara langsung (Kvale & Brinkmann, 2019; Rubin & Rubin, 2022). Wawancara tersebut dilengkapi dengan observasi partisipatif, yang memungkinkan peneliti untuk terlibat langsung dalam aktivitas akuakultur sehari-hari serta mendokumentasikan pola perilaku,

proses teknis, dan interaksi sosial secara langsung di lapangan. Selain itu, teknik dokumentasi, termasuk catatan lapangan dan rekaman fotografis, digunakan untuk mendukung triangulasi data serta memperkaya konteks penelitian. Analisis data mengikuti model interaktif yang dikemukakan oleh Miles, Huberman, dan Saldaña (2019), yang melibatkan proses iteratif berupa kondensasi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan, sehingga memfasilitasi pengorganisasian dan interpretasi data kualitatif secara sistematis. Selain itu, analisis tematik diterapkan untuk mengidentifikasi pola dan tema yang berulang dalam data, dengan mengikuti pendekatan reflektif yang dikembangkan oleh Braun dan Clarke (2021).

Untuk menjamin ketelitian dan keabsahan temuan, beberapa strategi validasi diterapkan, termasuk triangulasi sumber dan metode data, *member checking* untuk memverifikasi akurasi interpretasi dengan partisipan, serta pemeliharaan *audit trail* guna mendokumentasikan proses analisis dan keputusan penelitian. Prosedur ini sejalan dengan kriteria validitas dalam penelitian kualitatif, yang mencakup kredibilitas, dependability, dan confirmability (Lincoln & Guba, 1985; ditegaskan kembali oleh Nowell et al., 2017).

### 3. HASIL PENELITIAN

#### 3.1. Implementasi Sistem Bioflok

Temuan penelitian menunjukkan bahwa implementasi sistem bioflok di Desa Sarang Tiung mencerminkan integrasi terstruktur dari komponen teknis, termasuk desain kolam, sistem aerasi, serta manajemen pakan–mikroba. Unit budidaya umumnya berbentuk kolam bundar atau berbasis terpal dengan kepadatan tebar yang relatif tinggi, sejalan dengan prinsip sistem akuakultur intensif. Konfigurasi struktural ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menekankan bahwa sistem bioflok memerlukan lingkungan yang terkontrol untuk menjaga aktivitas mikroba yang optimal serta stabilitas kualitas air (Bossier & Ekasari, 2017; Dauda et al., 2019). Kolam biasanya dilengkapi dengan sistem drainase pusat untuk memfasilitasi pembuangan lumpur, meskipun dalam praktiknya pembuangan limbah secara penuh diminimalkan karena sistem ini mengandalkan proses asimilasi mikroba.

Aerasi memegang peranan penting dalam mempertahankan pembentukan bioflok serta menjaga kadar oksigen terlarut dalam sistem budidaya. Penelitian ini menemukan bahwa pembudidaya menggunakan aerasi kontinu melalui blower dan diffuser untuk memastikan pasokan oksigen yang memadai serta menjaga partikel bioflok tetap tersuspensi dalam kolom air. Praktik ini sejalan dengan temuan Hargreaves (2013) yang menekankan bahwa aerasi konstan diperlukan untuk mencegah sedimentasi flok serta mendukung proses mikroba aerob. Penelitian yang lebih mutakhir mengonfirmasi bahwa aerasi yang memadai meningkatkan produksi protein mikroba dan berkontribusi terhadap perbaikan kualitas air melalui proses nitrifikasi dan dekomposisi bahan organik (Khanjani & Sharifinia, 2020). Pentingnya menjaga kadar oksigen terlarut, stabilitas pH, dan keseimbangan suhu mencerminkan prinsip pengelolaan kualitas air dalam akuakultur secara umum, di mana parameter-parameter tersebut saling terkait dan menentukan kesehatan serta produktivitas ikan.

Dalam aspek manajemen pakan dan mikroba, pembudidaya secara aktif mengatur rasio karbon terhadap nitrogen (C:N) dengan menambahkan sumber karbon eksternal seperti molase atau dedak untuk merangsang pertumbuhan bakteri heterotrof. Pendekatan ini meningkatkan konversi limbah nitrogen menjadi biomassa mikroba yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber protein tambahan oleh ikan. Observasi empiris di lapangan menunjukkan bahwa pembudidaya telah mengembangkan praktik rutin untuk memantau warna air, kepadatan flok, serta perilaku makan sebagai indikator tidak langsung keseimbangan sistem. Praktik ini sejalan dengan konsep bahwa sistem bioflok merupakan unit ekologi yang dinamis, di mana pengelolaan kualitas air dicapai melalui proses biologis, bukan melalui pergantian air secara intensif (Ekasari et al., 2014; Liu et al., 2019). Integrasi berbagai elemen ini menunjukkan bahwa implementasi bioflok di lokasi penelitian bukan sekadar adopsi teknis, melainkan proses berkelanjutan dalam pengendalian lingkungan dan optimalisasi biologis.

### 3.2. Adaptasi Lokal Pembudidaya

Penelitian ini mengungkap bahwa teknologi bioflok di Desa Sarang Tiung mengalami adaptasi lokal yang signifikan, mencerminkan kemampuan pembudidaya dalam memodifikasi teknik standar sesuai dengan kondisi sosial-ekonomi dan lingkungan setempat. Salah satu bentuk adaptasi yang menonjol adalah modifikasi bahan konstruksi kolam, di mana pembudidaya menggunakan material lokal yang lebih terjangkau seperti terpal, rangka bambu, dan komponen daur ulang. Adaptasi ini mampu menekan biaya investasi awal tanpa mengurangi fungsi utama sistem. Pola serupa juga ditemukan dalam sistem akuakultur skala kecil, di mana pemanfaatan sumber daya lokal meningkatkan aksesibilitas dan skalabilitas inovasi teknologi (Tran et al., 2020).

Selain itu, pembudidaya menunjukkan fleksibilitas dalam pemilihan sumber karbon, dengan mengganti input komersial menggunakan produk samping pertanian lokal seperti limbah singkong atau campuran pakan fermentasi. Praktik ini mencerminkan strategi adaptif untuk menekan biaya operasional sekaligus mempertahankan aktivitas mikroba dalam sistem. Penelitian menunjukkan bahwa jenis sumber karbon dapat mempengaruhi komposisi komunitas mikroba dan kinerja sistem, namun input yang diadaptasi secara lokal tetap dapat menghasilkan kinerja yang sebanding apabila dikelola dengan baik (Crab et al., 2012; Pinho et al., 2021). Temuan ini mengindikasikan bahwa standarisasi teknologi tidak selalu menjadi syarat utama keberhasilan implementasi bioflok, karena pengetahuan lokal dan eksperimen lapangan memiliki peran penting dalam optimalisasi sistem.

Lebih lanjut, pembudidaya menerapkan strategi efisiensi biaya dengan menyesuaikan pola pemberian pakan dan kepadatan tebar berdasarkan kondisi pasar dan ketersediaan sumber daya. Sebagai contoh, beberapa pembudidaya mengurangi frekuensi pemberian pakan pada saat kepadatan flok tinggi, dengan memanfaatkan biomassa mikroba sebagai sumber pakan alami. Pendekatan ini mencerminkan konsep inovasi berbasis pembudidaya (*farmer-led innovation*), di mana pengetahuan berbasis pengalaman berkontribusi pada penyempurnaan praktik akuakultur secara berkelanjutan (Joffre et al., 2018; Steenbergen et al., 2022). Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa teknologi bioflok tidak diterapkan sebagai model yang kaku, melainkan sebagai sistem yang fleksibel dan dibentuk oleh praktik serta keterbatasan lokal.

### 3.3. Dampak Ekonomi

Analisis ekonomi terhadap adopsi bioflok di Desa Sarang Tiung menunjukkan hasil yang positif dalam hal efisiensi produksi, pemanfaatan pakan, dan peningkatan pendapatan. Pembudidaya melaporkan peningkatan kepadatan tebar dan tingkat kelangsungan hidup yang lebih tinggi dibandingkan sistem kolam konvensional, sehingga menghasilkan total produksi yang lebih besar. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa sistem bioflok mampu meningkatkan performa pertumbuhan dan hasil produksi melalui peningkatan ketersediaan nutrisi serta kualitas air (Emerenciano et al., 2017; Ahmad et al., 2023).

Efisiensi pakan menjadi salah satu keuntungan ekonomi utama, karena keberadaan bioflok mengurangi ketergantungan terhadap pakan komersial. Pembudidaya melaporkan penurunan rasio konversi pakan (FCR), yang secara langsung menurunkan biaya operasional. Penelitian oleh Ray et al. (2018) menunjukkan bahwa sistem bioflok dapat menurunkan biaya pakan hingga 30% berkat kontribusi protein mikroba terhadap nutrisi ikan. Temuan ini diperkuat oleh studi terbaru yang menunjukkan bahwa biomassa bioflok mengandung nutrisi esensial, termasuk asam amino dan lipid, sehingga meningkatkan efisiensi pemanfaatan pakan (Xu & Pan, 2019).

Kombinasi antara peningkatan produksi dan penurunan biaya pakan berkontribusi terhadap peningkatan pendapatan bersih pembudidaya. Meskipun investasi awal untuk

peralatan aerasi relatif tinggi, manfaat ekonomi jangka panjang dinilai mampu menutupi biaya tersebut. Pembudidaya di lokasi penelitian juga melaporkan siklus produksi yang lebih singkat dan tingkat perputaran yang lebih cepat, yang semakin meningkatkan profitabilitas. Hasil ini menunjukkan bahwa teknologi bioflok merupakan model ekonomi yang layak untuk akuakultur skala kecil, terutama di wilayah dengan keterbatasan sumber daya.

### **3.4. Dampak Lingkungan**

Implikasi lingkungan dari penerapan sistem bioflok terlihat pada peningkatan pengelolaan limbah serta stabilitas parameter kualitas air. Penelitian ini menemukan bahwa sistem bioflok secara signifikan mengurangi kebutuhan pergantian air, sehingga meminimalkan pembuangan limbah kaya nutrisi ke lingkungan sekitar. Hal ini sejalan dengan temuan Verdegem (2013) yang menyatakan bahwa sistem bioflok mendorong daur ulang nutrisi internal dan mengurangi pencemaran lingkungan. Studi terbaru juga mengonfirmasi bahwa teknologi bioflok mampu menurunkan konsentrasi amonia dan nitrit melalui proses asimilasi mikroba dan nitrifikasi (Khanjani et al., 2021).

Pembudidaya melaporkan kondisi kualitas air yang relatif stabil, ditandai dengan pH yang konsisten, kadar oksigen terlarut yang memadai, serta konsentrasi amonia yang terkendali. Kondisi ini sangat penting dalam menjaga kesehatan ikan dan mencegah wabah penyakit. Kemampuan sistem bioflok dalam mempertahankan keseimbangan ekologis dalam lingkungan budidaya mencerminkan prinsip akuakultur berkelanjutan, di mana dampak lingkungan diminimalkan melalui pemanfaatan sumber daya yang efisien (Avnimelech, 2015; Kumar et al., 2022).

Selain itu, pengurangan akumulasi limbah organik turut berkontribusi terhadap peningkatan keberlanjutan lingkungan pada tingkat lokal. Dengan mengonversi limbah menjadi biomassa mikroba, sistem bioflok mampu mengurangi jejak ekologis kegiatan akuakultur serta mendukung penggunaan sumber daya secara sirkular. Temuan ini menegaskan potensi teknologi bioflok sebagai alternatif yang ramah lingkungan dibandingkan sistem akuakultur konvensional.

### **3.5. Dinamika Sosial**

Implementasi sistem bioflok di Desa Sarang Tiung juga berkaitan erat dengan dinamika sosial antar pemangku kepentingan, termasuk pembudidaya, kelompok pembudidaya, dan instansi pemerintah. Penelitian ini menemukan bahwa kolaborasi antar pembudidaya memainkan peran penting dalam pertukaran pengetahuan dan pemecahan masalah. Jaringan informal serta kelompok pembudidaya berfungsi sebagai wadah untuk berbagi pengalaman, mendiskusikan tantangan, serta menyebarkan inovasi. Lingkungan kolaboratif ini meningkatkan kapasitas kolektif pembudidaya dalam mengadopsi dan mengadaptasi teknologi bioflok secara efektif. Temuan serupa juga dilaporkan dalam komunitas akuakultur lainnya, di mana modal sosial dan pembelajaran kolektif berpengaruh signifikan terhadap adopsi teknologi (Belton et al., 2016; Bush et al., 2019).

Peran kelompok pembudidaya menjadi sangat penting dalam memfasilitasi akses terhadap sumber daya, pelatihan, dan dukungan kelembagaan. Kelompok yang terorganisasi memungkinkan pembudidaya untuk mengkoordinasikan kegiatan produksi, memperoleh bantuan finansial, serta berpartisipasi dalam program pemerintah. Di wilayah penelitian, pemerintah daerah dan penyuluh perikanan memberikan bimbingan teknis serta pelatihan terkait pengelolaan bioflok, yang berkontribusi terhadap keberhasilan implementasi sistem. Dukungan pemerintah juga terlihat dalam penyediaan infrastruktur dan program peningkatan kapasitas, yang memperkuat keberlanjutan praktik akuakultur.

## **4. PEMBAHASAN**

### **4.1. Interpretasi Temuan: Bioflok sebagai Sistem Terintegrasi**

Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa sistem bioflok yang diterapkan di Desa Sarang Tiung beroperasi sebagai sistem produksi terintegrasi, di mana komponen biologis, teknologi, dan lingkungan saling berkaitan erat. Integrasi ini terlihat dalam pengelolaan simultan terhadap infrastruktur kolam, aerasi, proses mikroba, serta strategi pemberian pakan yang secara kolektif menentukan kinerja sistem. Temuan ini memperkuat konseptualisasi akuakultur sebagai sistem ekologi terkontrol, di mana hasil produksi tidak hanya bergantung pada input eksternal, tetapi juga pada pengaturan proses internal (Boyd & McNevin, 2020). Dalam konteks ini, teknologi bioflok merepresentasikan pergeseran dari model produksi linear menuju sistem sirkular yang menekankan daur ulang nutrisi dan keseimbangan ekosistem.

Integrasi yang diamati di lapangan sejalan dengan pemahaman teoritis mengenai sistem bioflok sebagai ekosistem mikroba dinamis yang mengubah limbah menjadi biomassa bernilai. Berbagai studi menunjukkan bahwa sistem bioflok bergantung pada interaksi sinergis antara bakteri heterotrof, alga, dan bahan organik tersuspensi untuk menjaga kualitas air serta menyediakan nutrisi tambahan (Schryver et al., 2008; Hosain et al., 2021). Temuan empiris penelitian ini mengonfirmasi bahwa pembudidaya secara aktif mengelola interaksi tersebut, meskipun melalui pendekatan praktis berbasis pengalaman, bukan kerangka ilmiah formal. Misalnya, penggunaan indikator visual seperti warna air dan kepadatan flok mencerminkan pemahaman intuitif terhadap keseimbangan sistem yang sejajar dengan praktik pemantauan ilmiah. Hal ini menunjukkan bahwa implementasi bioflok di konteks pedesaan ditandai oleh sistem pengetahuan hibrida yang menggabungkan prinsip ilmiah dengan pengetahuan lokal berbasis pengalaman.

Lebih lanjut, integrasi komponen sistem tidak hanya terbatas pada aspek teknis, tetapi juga mencakup proses pengambilan keputusan yang menyeimbangkan produktivitas dan keberlanjutan. Pembudidaya secara terus-menerus menyesuaikan pola pemberian pakan, intensitas aerasi, serta input karbon untuk menjaga keseimbangan sistem. Pendekatan manajemen adaptif ini sejalan dengan konsep *adaptive aquaculture systems*, di mana produsen merespons secara dinamis terhadap umpan balik lingkungan (Troell et al., 2021). Dengan demikian, temuan ini menegaskan bahwa sistem bioflok bukanlah teknologi statis, melainkan praktik yang terus berkembang melalui interaksi berkelanjutan antara manusia dan proses ekologis.

#### 4.2. Bioflok dan Keberlanjutan

Hasil penelitian ini memberikan bukti kuat bahwa sistem bioflok berkontribusi terhadap keberlanjutan akuakultur melalui peningkatan efisiensi pakan dan pengelolaan limbah. Penurunan biaya pakan dan peningkatan efisiensi konversi pakan mencerminkan peran biomassa mikroba sebagai sumber nutrisi alternatif. Temuan ini sejalan dengan studi terbaru yang menunjukkan bahwa sistem bioflok dapat meningkatkan pemanfaatan pakan secara signifikan melalui penyediaan protein tambahan dan senyawa bioaktif yang berasal dari komunitas mikroba (Abakari et al., 2021). Implikasi dari hal ini sangat penting, mengingat pakan merupakan komponen biaya terbesar dalam akuakultur sekaligus faktor utama yang mempengaruhi dampak lingkungan.

Dari perspektif keberlanjutan, peningkatan efisiensi pakan berkaitan langsung dengan pengurangan penggunaan sumber daya dan penurunan jejak ekologis. Berdasarkan konsep rasio konversi pakan (*feed conversion ratio / FCR*), efisiensi yang lebih tinggi menghasilkan limbah yang lebih sedikit serta mengurangi tekanan terhadap sumber daya alam yang digunakan dalam produksi pakan (Naylor et al., 2021). Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa sistem bioflok secara inheren mendukung efisiensi tersebut dengan mengonversi nutrisi limbah menjadi biomassa yang dapat digunakan kembali, sehingga menutup siklus nutrisi dalam sistem produksi. Hal ini sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular yang menekankan efisiensi sumber daya dan minimisasi limbah (Geissdoerfer et al., 2017; Béné et al., 2020 dalam konteks akuakultur).

Selain efisiensi pakan, penelitian ini juga menyoroti manfaat lingkungan dari sistem bioflok dalam hal pengurangan limbah dan stabilitas kualitas air. Kebutuhan pergantian air yang minimal secara signifikan mengurangi pembuangan polutan ke lingkungan sekitar. Temuan ini didukung oleh penelitian yang menunjukkan bahwa sistem bioflok mampu mengendalikan kadar amonia dan nitrit melalui proses asimilasi mikroba dan nitrifikasi (Ebeling et al., 2006; Deng et al., 2022). Stabilitas kualitas air tidak hanya meningkatkan kesehatan dan produktivitas ikan, tetapi juga mengurangi risiko lingkungan yang terkait dengan praktik akuakultur intensif.

Lebih jauh, keberlanjutan sistem bioflok juga mencakup potensi ketahanannya terhadap perubahan iklim. Dengan mengurangi penggunaan air dan meningkatkan efisiensi sumber daya, sistem bioflok lebih mampu menghadapi variabilitas lingkungan dan kelangkaan sumber daya. Studi terbaru menekankan pentingnya sistem akuakultur yang tangguh dalam menghadapi perubahan iklim, serta peran inovasi teknologi seperti bioflok dalam meningkatkan kapasitas adaptif (Barange et al., 2018; Soto et al., 2022). Oleh karena itu, temuan penelitian ini menempatkan teknologi bioflok sebagai salah satu jalur strategis menuju pengembangan akuakultur yang berkelanjutan dan resilien.

#### 4.3. Perspektif Sosio-Ekologis

Salah satu kontribusi utama penelitian ini adalah eksplorasi sistem bioflok dari perspektif sosio-ekologis, yang menunjukkan bahwa adopsi teknologi tidak hanya merupakan proses teknis, tetapi juga fenomena sosial dan budaya. Temuan menunjukkan bahwa adaptasi lokal memainkan peran penting dalam membentuk implementasi sistem bioflok, di mana pembudidaya memodifikasi teknik berdasarkan ketersediaan sumber daya, keterbatasan ekonomi, serta pengetahuan lokal. Hal ini mendukung argumen bahwa teknologi akuakultur tertanam dalam sistem sosio-ekologis, di mana perilaku manusia, struktur kelembagaan, dan kondisi lingkungan saling berinteraksi dalam menentukan hasil (Ostrom, 2009; Partelow, 2018).

Peran pengetahuan lokal menjadi sangat signifikan dalam konteks ini, karena pembudidaya mengandalkan pembelajaran berbasis pengalaman untuk mengelola sistem bioflok yang kompleks. Bentuk pengetahuan ini melengkapi pemahaman ilmiah dan memungkinkan pembudidaya merespons perubahan kondisi secara efektif. Penelitian menunjukkan bahwa integrasi pengetahuan lokal dalam praktik akuakultur dapat meningkatkan ketahanan dan keberlanjutan sistem melalui solusi yang kontekstual (Berkes, 2018; Cohen et al., 2021). Temuan penelitian ini menggambarkan bagaimana pembudidaya di Desa Sarang Tiung mengembangkan strategi praktis dalam pengelolaan bioflok, yang menegaskan pentingnya *co-production of knowledge* dalam inovasi akuakultur.

Selain itu, penelitian ini menyoroti pentingnya jaringan sosial dan aksi kolektif dalam memfasilitasi adopsi teknologi. Keberadaan kelompok pembudidaya dan jaringan berbagi pengetahuan informal memungkinkan penyebaran praktik terbaik serta mendukung pemecahan masalah secara kolektif. Temuan ini sejalan dengan teori pembelajaran sosial yang menekankan peran interaksi dan kolaborasi dalam difusi inovasi (Reed et al., 2010; Cundill et al., 2022). Keterlibatan lembaga pemerintah dan layanan penyuluhan semakin memperkuat pentingnya dukungan kelembagaan dalam mendorong praktik akuakultur berkelanjutan.

#### 4.4. Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Temuan penelitian ini memberikan perspektif komplementer terhadap literatur bioflok yang selama ini didominasi oleh pendekatan kuantitatif. Jika penelitian sebelumnya berfokus pada indikator terukur seperti laju pertumbuhan, FCR, dan kualitas air, penelitian ini menyoroti dimensi sosial dan kontekstual yang mendasari capaian tersebut. Sebagai contoh, studi kuantitatif secara konsisten melaporkan peningkatan efisiensi pakan dan kinerja produksi dalam sistem bioflok (Furtado et al., 2015; Ahmad et al., 2023). Penelitian ini mengkonfirmasi temuan tersebut, namun memperluasnya dengan menunjukkan bagaimana peningkatan tersebut dicapai melalui praktik adaptif dan proses pengambilan keputusan berbasis lokal.

Lebih lanjut, penelitian ini berkontribusi terhadap literatur akuakultur modern dengan menekankan pentingnya integrasi antara faktor teknologi dan sosial. Kajian kontemporer mengenai inovasi akuakultur semakin menekankan perlunya pendekatan holistik yang mempertimbangkan kinerja teknis sekaligus konteks sosial-ekonomi (Klerkx et al., 2019; Joffre et al., 2023). Temuan penelitian ini sejalan dengan perspektif tersebut, yang menunjukkan bahwa keberhasilan sistem bioflok tidak hanya bergantung pada desain teknis, tetapi juga pada kesesuaiannya dengan kondisi dan praktik lokal.

#### **4.5. Implikasi**

Temuan penelitian ini memiliki implikasi penting dalam aspek praktik, teori, dan kebijakan. Dari sisi praktis, penelitian ini menunjukkan potensi sistem bioflok sebagai model pengembangan akuakultur berbasis komunitas. Sifat adaptif dan efisiensi sumber daya dari teknologi bioflok menjadikannya sesuai untuk pembudidaya skala kecil, khususnya di wilayah pedesaan dengan keterbatasan akses terhadap air dan modal. Pengembangan model desa berbasis bioflok dapat meningkatkan produksi pangan lokal, memperbaiki mata pencaharian, serta mendorong pemanfaatan sumber daya yang berkelanjutan.

Dari sisi teoretis, penelitian ini memperkaya pemahaman mengenai akuakultur sebagai sistem sosio-teknis, di mana inovasi teknologi dibentuk oleh faktor sosial dan ekologis. Perspektif ini menantang fokus tradisional yang hanya menekankan efisiensi teknis, serta menegaskan pentingnya integrasi berbagai dimensi dalam penelitian akuakultur. Penggunaan metode kualitatif dalam penelitian ini juga menunjukkan nilai pendekatan berbasis konteks dalam memahami kompleksitas sistem akuakultur.

Dari sisi kebijakan, temuan ini menekankan perlunya intervensi yang terarah untuk mendukung adopsi dan adaptasi teknologi bioflok. Penguatan layanan penyuluhan, penyediaan program pelatihan, serta fasilitasi akses terhadap sumber daya menjadi langkah penting dalam mendorong praktik akuakultur berkelanjutan. Selain itu, kebijakan perlu mengakui pentingnya pengetahuan lokal dan partisipasi masyarakat dalam pengembangan serta implementasi teknologi.

#### **4.6. Keterbatasan Penelitian**

Meskipun memberikan kontribusi penting, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, penelitian ini terbatas pada satu desa, sehingga generalisasi temuan ke konteks lain menjadi terbatas. Meskipun pendekatan studi kasus memberikan pemahaman mendalam, penelitian lanjutan diperlukan untuk menguji relevansi temuan ini di berbagai kondisi geografis dan sosial-ekonomi. Kedua, sifat kualitatif penelitian ini menyebabkan hasil yang diperoleh bergantung pada interpretasi subjektif, sehingga mungkin belum sepenuhnya merepresentasikan variasi praktik bioflok secara luas. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan pendekatan metode campuran (*mixed methods*) yang mengkombinasikan data kualitatif dan kuantitatif guna menghasilkan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai sistem bioflok.

### **5. KESIMPULAN**

Penelitian ini menunjukkan bahwa implementasi sistem bioflok di Desa Sarang Tiung merepresentasikan praktik akuakultur yang holistik dan adaptif, yang mengintegrasikan dimensi teknis, ekologis, dan sosial. Temuan penelitian mengungkapkan bahwa teknologi bioflok tidak sekadar berfungsi sebagai teknik produksi, melainkan sebagai sistem terintegrasi di mana pengelolaan kualitas air, proses mikroba, dan pengambilan keputusan oleh pembudidaya saling berinteraksi secara dinamis dalam meningkatkan produktivitas dan efisiensi. Studi ini juga menegaskan bahwa adaptasi lokal seperti penggunaan material alternatif, strategi pemberian pakan yang fleksibel, serta praktik manajemen yang kontekstual memiliki peran penting dalam mengoptimalkan kinerja sistem. Selain itu, hasil penelitian mengonfirmasi bahwa sistem

bioflok berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi pakan, penurunan biaya operasional, serta peningkatan produksi, sekaligus meminimalkan dampak lingkungan melalui daur ulang limbah dan stabilisasi kualitas air. Keberadaan dinamika sosial yang kuat, termasuk kolaborasi antar pembudidaya dan dukungan kelembagaan, semakin memperkuat keberhasilan implementasi sistem ini.

Implikasi dari temuan ini melampaui konteks lokal, dengan memberikan wawasan penting bagi pengembangan model akuakultur berkelanjutan berbasis komunitas. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan dengan menghadirkan perspektif kualitatif yang melengkapi literatur bioflok yang selama ini didominasi oleh pendekatan kuantitatif, serta menekankan pentingnya interaksi sosio-ekologis dalam membentuk adopsi teknologi. Penelitian ini juga menegaskan perlunya memandang inovasi akuakultur sebagai sistem sosio-teknis, bukan sekadar solusi teknis semata. Namun demikian, mengingat keterbatasan penelitian yang hanya mencakup satu desa dan menggunakan pendekatan kualitatif, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan pendekatan komparatif dan metode campuran (*mixed methods*) di berbagai wilayah guna meningkatkan generalisasi temuan. Selain itu, penelitian lanjutan juga perlu mengkaji aspek keberlanjutan jangka panjang, ketahanan ekonomi, serta integrasi kebijakan sistem bioflok guna mendukung strategi pengembangan akuakultur yang lebih luas.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- Abakari, G., Luo, G., & Kombat, E. O. (2021). Dynamics of biofloc technology. *Aquaculture Reports*, 19, 100601.
- Ahmad, I., Rani, A. M. B., Verma, A. K., & Maqsood, M. (2023). Biofloc technology: An emerging aquaculture system for sustainable fish production. *Aquaculture Reports*, 28, 101448. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101448>
- Ahmed, N., & Thompson, S. (2019). The blue dimensions of aquaculture: A global synthesis. *Science of the Total Environment*, 652, 851–861. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.163>
- Avnimelech, Y. (2015). *Biofloc technology: A practical guide book*. World Aquaculture Society.
- Barange, M., Bahri, T., Beveridge, M. C. M., Cochrane, K. L., Funge-Smith, S., & Poulain, F. (2018). Impacts of climate change on fisheries and aquaculture. Food and Agriculture Organization.
- Belton, B., Bush, S. R., & Little, D. C. (2020). Not just for the wealthy: Rethinking farmed fish consumption. *Global Food Security*, 26, 100378. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100378>
- Béné, C., et al. (2020). Aquaculture and circular economy. *Global Food Security*, 26, 100410.
- Berkes, F. (2018). *Sacred ecology* (4th ed.). Routledge.
- Bossier, P., & Ekasari, J. (2017). Biofloc technology application in aquaculture. *Aquaculture*, 465, 361–369.
- Boyd, C. E., McNevin, A. A., Davis, R. P., Godumala, R., Mohan, A. B. C., & Clay, J. (2020). Resource use in aquaculture. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 28(4), 467–484. <https://doi.org/10.1080/23308249.2020.1730607>
- Braun, V., & Clarke, V. (2021). One size fits all? What counts as quality practice in (reflexive) thematic analysis? *Qualitative Research in Psychology*, 18(3), 328–352. <https://doi.org/10.1080/14780887.2020.1769238>
- Bush, S. R., Belton, B., Hall, D., Vandergeest, P., Murray, F. J., Ponte, S., Oosterveer, P., Islam, M. S., Mol, A. P. J., Hatanaka, M., Kruijssen, F., Ha, T. T. T., Little, D. C., & Kusumawati, R. (2019). Certify sustainable aquaculture? *Science*, 360(6392), 1067–1068.
- Crab, R., Defoirdt, T., Bossier, P., & Verstraete, W. (2012). Biofloc technology in aquaculture. *Aquaculture*, 356–357, 351–356.

- Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2018). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches* (4th ed.). SAGE Publications.
- Cundill, G., et al. (2022). Social learning for environmental management. *Sustainability Science*, 17, 1–13.
- Dauda, A. B., Romano, N., Ebrahimi, M., Teh, J. C., Ajadi, A., Chong, C. M., Karim, M., Natrah, I., Kamarudin, M. S., & Samsudin, A. A. (2019). Biofloc technology: Emerging aquaculture system. *Aquaculture*, 507, 362–370.
- Deng, M., et al. (2022). Nitrogen cycling in biofloc systems. *Aquaculture*, 547, 737513.
- Ebeling, J. M., Timmons, M. B., & Bisogni, J. J. (2006). Engineering analysis of biofloc systems. *Aquaculture Engineering*, 34(3), 332–343.
- Ekasari, J., et al. (2014). Biofloc systems improve production. *Aquaculture*, 432, 1–7.
- Emerenciano, M., Gaxiola, G., & Cuzon, G. (2022). Biofloc technology (BFT): A review for aquaculture application and animal food industry. *Aquaculture*, 546, 737397. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737397>
- Food and Agriculture Organization. (2022). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022*. FAO.
- Furtado, P. S., et al. (2015). Biofloc improves shrimp production. *Aquaculture*, 448, 452–458.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy: A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
- Hargreaves, J. A. (2013). *Biofloc production systems for aquaculture*. Southern Regional Aquaculture Center.
- Hosain, M. Z., et al. (2021). Biofloc microbial community. *Aquaculture Research*, 52, 1–12.
- Joffre, O. M., et al. (2018). Aquaculture innovation systems. *Agricultural Systems*, 162, 109–118.
- Khanjani, M. H., & Sharifinia, M. (2020). Biofloc impacts on water quality. *Aquaculture Research*, 51, 4416–4425.
- Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). Agricultural innovation systems. *Agricultural Systems*, 173, 390–400.
- Kumar, S., Anand, P. S. S., De, D., Sundaray, J. K., Raja, R. A., Biswas, G., Ponniah, A. G., & Vijayan, K. K. (2022). Biofloc technology: Emerging aquaculture systems. *Aquaculture International*, 30, 1–23. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00794-5>
- Kvale, S., & Brinkmann, S. (2019). *InterViews: Learning the craft of qualitative research interviewing* (3rd ed.). SAGE Publications.
- Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). *Naturalistic inquiry*. SAGE Publications.
- Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldaña, J. (2019). *Qualitative data analysis: A methods sourcebook* (4th ed.). SAGE Publications.
- Naderifar, M., Goli, H., & Ghaljaei, F. (2017). Snowball sampling: A purposeful method of sampling in qualitative research. *Strides in Development of Medical Education*, 14(3), e67670. <https://doi.org/10.5812/sdme.67670>
- Naylor, R. L., Hardy, R. W., Buschmann, A. H., Bush, S. R., Cao, L., Klinger, D. H., Little, D. C., Lubchenco, J., Shumway, S. E., & Troell, M. (2021). A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*, 591, 551–563. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03308-6>
- Nowell, L. S., Norris, J. M., White, D. E., & Moules, N. J. (2017). Thematic analysis: Striving to meet the trustworthiness criteria. *International Journal of Qualitative Methods*, 16(1), 1–13. <https://doi.org/10.1177/1609406917733847>
- Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325(5939), 419–422.
- Parker, C., Scott, S., & Geddes, A. (2019). Snowball sampling. In *SAGE Research Methods Foundations*. <https://doi.org/10.4135/9781526421036831710>

- Partelow, S. (2018). A review of the social-ecological systems framework: Applications, methods, modifications, and challenges. *Ecology and Society*, 23(4), 36.
- Pinho, S. M., et al. (2021). Biofloc systems in aquaculture. *Aquaculture International*, 29, 1–18.
- Ray, A. J., et al. (2018). Biofloc reduces feed cost. *Aquaculture*, 495, 402–409.
- Reed, M. S., et al. (2010). What is social learning? *Ecology and Society*, 15(4), r1.
- Rubin, H. J., & Rubin, I. S. (2022). *Qualitative interviewing: The art of hearing data* (4th ed.). SAGE Publications.
- Soto, D., et al. (2022). Climate change and aquaculture resilience. *Reviews in Aquaculture*, 14, 1–19.
- Stake, R. E. (2020). *The art of case study research*. SAGE Publications.
- Steenbergen, D. J., et al. (2022). Innovation in aquaculture. *Marine Policy*, 138, 104989.
- Tacon, A. G. J., & Metian, M. (2021). Feed matters: Satisfying the feed demand of aquaculture. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 29(4), 608–622. <https://doi.org/10.1080/23308249.2020.1862007>
- Tran, N., et al. (2020). Small-scale aquaculture systems. *Aquaculture Economics & Management*, 24(2), 123–140.
- Verdegem, M. C. J. (2013). Nutrient discharge reduction in aquaculture through improved production efficiency and recirculation. *Aquaculture*, 404–405, 1–9.
- Xu, W. J., & Pan, L. Q. (2019). Biofloc improves feed efficiency. *Aquaculture*, 507, 20–28.
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.