

Pengembangan Formulasi Pakan Udang Berbasis Protein Sel Tunggal: Kajian Literatur

^{1,2*}Ria Retno, ²Irwan Effendi, ³Ewin Handoco

^{1,3}Program Studi Manajemen Pengelolaan Sumberdaya Perairan Universitas HKBP Nommensen Pematangsiantar, Indonesia

²Program Studi Doktor Ilmu Kelautan Universitas Riau, Indonesia

*Korespondensi: riaretnomanik@gmail.com

Submit : 15 Juni 2026 | Diterima : 18 Juli 2026 | Terbit : 21 Juli 2026

ABSTRACT

Single-cell protein (SCP) is a strategic alternative to reduce dependence on fishmeal in whiteleg shrimp feed. This paper examines the development of SCP-based feed formulations derived from marine yeast, bacteria, and other microorganisms. The study was conducted through a literature review of various recent scientific articles on shrimp nutrition, SCP, gut health, the immune system, and aquaculture sustainability. The results indicate that SCP has a high protein content, a favorable amino acid profile, and contains bioactive compounds such as β -glucan, which act as immunostimulants. The use of SCP can increase feed efficiency, improve digestive health, and support shrimp growth. However, formulations must consider the balance of essential amino acids, palatability, and optimal substitution levels. SCP has the potential to become a key component of future, sustainable and economical shrimp feeds.

Keywords: Single-Cell Protein; Feed; Growth; Immune System; *Litopenaeus vannamei*

ABSTRAK

Protein sel tunggal (Single Cell Protein/SCP) merupakan alternatif strategis untuk mengurangi ketergantungan terhadap tepung ikan dalam pakan udang vaname. Makalah ini mengkaji pengembangan formulasi pakan berbasis SCP yang berasal dari khamir laut, bakteri, dan mikroorganisme lainnya. Kajian dilakukan melalui studi pustaka terhadap berbagai artikel ilmiah terkini mengenai nutrisi udang, SCP, kesehatan usus, sistem imun, dan keberlanjutan akuakultur. Hasil kajian menunjukkan bahwa SCP memiliki kandungan protein tinggi, profil asam amino yang baik, serta mengandung senyawa bioaktif seperti β -glukan yang berperan sebagai imunostimulan. Penggunaan SCP mampu meningkatkan efisiensi pakan, memperbaiki kesehatan saluran pencernaan, serta mendukung pertumbuhan udang. Namun, formulasi harus memperhatikan keseimbangan asam amino esensial, palatabilitas, dan tingkat substitusi optimal. SCP berpotensi menjadi komponen utama pakan udang masa depan yang berkelanjutan dan ekonomis.

Kata Kunci: Protein Sel Tunggal; Pakan; Pertumbuhan; Sistem Imun; *Litopenaeus vannamei*

PENDAHULUAN

Industri akuakultur udang mengalami pertumbuhan pesat dalam dua dekade terakhir. Kebutuhan pakan berkualitas tinggi meningkat seiring peningkatan produksi udang vaname. Tepung ikan masih menjadi bahan baku utama karena memiliki nilai biologis tinggi, tetapi ketersediaannya terbatas dan harganya terus meningkat. Kondisi ini mendorong pencarian sumber protein alternatif yang berkelanjutan.

Budidaya udang vaname (*Litopenaeus vannamei* atau *Penaeus vannamei*) berkembang karena permintaan pasar tinggi, siklus pemeliharaan relatif singkat, dan kemampuan adaptasi yang baik terhadap sistem intensif. Beberapa artikel yang dikaji menunjukkan bahwa peningkatan produksi tidak dapat hanya bertumpu pada padat tebar. Purnamasari, Purnama, dan Utami (2017) memperlihatkan bahwa padat tebar 170-175 ekor/m² masih mampu menghasilkan bobot akhir sekitar 29 g/ekor dengan kelangsungan hidup 82,35-86,70%. Temuan ini relevan karena padat tebar memang menaikkan potensi hasil, tetapi juga meningkatkan tekanan lingkungan. Nurhidayanti (2025) menegaskan bahwa keberhasilan sistem intensif sangat ditentukan oleh kestabilan suhu, pH, oksigen terlarut, salinitas, amonia,

nitrit, dan nitrat. Dengan demikian, produktivitas udang perlu dibaca sebagai hasil interaksi antara kepadatan, pakan, kualitas air, dan kesehatan udang, bukan sebagai akibat tunggal dari peningkatan jumlah benur.

Secara konseptual, Ma et al. (2023) memberi dasar bahwa protein ragi memiliki potensi sebagai sumber protein baru karena daya cerna *in vitro* tinggi, stabilitas termal baik, dan viskositas relatif stabil. Temuan ini sejalan dengan riset *single cell protein* pada Moroni et al. (2024) dan Feng et al. (2026). Moroni et al. menunjukkan bahwa protein bakteri dapat menggantikan sebagian fish meal pada European sea bass tanpa menurunkan pertumbuhan. Namun, Feng et al. memperlihatkan batas penting. Penggantian fish meal dalam kadar tinggi menggunakan *Clostridium autoethanogenum* protein dapat menekan pertumbuhan, imunitas, dan mikroflora usus udang vaname. Penambahan resveratrol mampu mengurangi dampak negatif tersebut. Artinya, pakan alternatif tidak cukup dinilai dari kadar protein, tetapi juga dari keseimbangan asam amino, palatabilitas, efek fisiologis, dan respons mikrobiota. Nunes et al. (2022) menegaskan bahwa keterbatasan pasokan fish meal mendorong penggunaan sumber protein alternatif, tetapi formulasi rendah fish meal sering menghadapi masalah palatabilitas, pencernaan, dan kelengkapan nutrisi esensial.

Kajian Liu et al. (2021) menegaskan bahwa udang memiliki nilai gizi tinggi, terutama karena kandungan protein, asam amino esensial, mineral, asam lemak tak jenuh, dan astaksantin. Temuan penting artikel ini ialah hasil samping pengolahan udang, seperti kepala, kulit, dan ekor, mencapai 44,06-62,53% dari bobot total. Bagian tersebut sering menjadi limbah, padahal mengandung senyawa bernilai seperti kitin, kitosan, pigmen, enzim, lipid, dan mineral. Artinya, industri udang perlu menempatkan hasil samping sebagai sumber bahan pangan, nutrasetikal, pakan, dan biomaterial. Pendekatan ini relevan dengan prinsip ekonomi sirkular karena mampu menekan pencemaran sekaligus meningkatkan nilai tambah produk perikanan.

Perkembangan akuakultur modern menuntut produksi udang yang tinggi, stabil, dan aman. Tantangan utama tidak hanya terletak pada peningkatan biomassa, tetapi juga pada efisiensi pemanfaatan nutrisi, kesehatan saluran cerna, pengendalian penyakit, dan pemanfaatan limbah secara berkelanjutan. Kumpulan artikel yang ditinjau menunjukkan bahwa arah riset akuakultur semakin bergeser dari pendekatan produksi konvensional menuju formulasi pakan fungsional, pemanfaatan bahan bioaktif, teknologi nano, vaksin, dan rekayasa biologi. Fokus tersebut penting karena udang vaname sangat rentan terhadap gangguan lingkungan dan infeksi bakteri maupun virus, terutama *Vibrio harveyi* dan white spot syndrome virus (WSSV).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode studi pustaka (*literature review*). Sumber data berasal dari jurnal nasional dan internasional yang membahas protein sel tunggal, khamir laut, probiotik, β -glukan, nutrisi udang, dan formulasi pakan berkelanjutan. Data dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan hasil penelitian yang relevan. Fokus kajian meliputi kandungan nutrisi SCP, pengaruh terhadap pertumbuhan, efisiensi pakan, sistem imun, kesehatan usus, dan aspek ekonomi produksi pakan. Artikel review ini menggunakan pendekatan studi pustaka dengan strategi pencarian tematik yang berfokus pada topik utama, yaitu Protein Sel Tunggal (SCP) sebagai alternatif tepung ikan dalam pakan udang vaname (*Litopenaeus vannamei*). Database yang digunakan mencakup jurnal nasional dan internasional bereputasi seperti *Aquaculture*, *Fish & Shellfish Immunology*, *Bioresource Technology*, serta jurnal nasional seperti *Media Akuakultur* dan *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, yang seluruhnya terverifikasi melalui DOI. Kata kunci pencarian meliputi tiga level, yaitu kata kunci utama (*Single-Cell Protein, feed, growth, immune system, Litopenaeus vannamei*), kata kunci tambahan (*marine yeast, β -glukan, probiotics, fish meal replacement, immunostimulant*), serta kata kunci spesifik terkait spesies dan bahan (*Debaryomyces hansenii, Candida tropicalis, Clostridium autoethanogenum*). Kriteria inklusi mencakup artikel yang relevan dengan nutrisi udang, khamir laut, formulasi pakan, dan keberlanjutan akuakultur dalam rentang tahun 1976 hingga 2026, baik berbahasa Inggris maupun Indonesia. Sementara itu, kriteria eksklusi meliputi artikel yang tidak berfokus pada akuakultur serta topik-topik yang belum banyak dibahas dalam literatur seperti kelayakan ekonomi, stabilitas penyimpanan, dan regulasi.

Proses analisis literatur dilakukan melalui analisis deskriptif komparatif yang mencakup beberapa tahapan sistematis. Pertama, artikel-artikel yang telah terkumpul diklasifikasikan ke dalam sub-topik seperti kandungan nutrisi SCP (40–80% protein), pengaruh terhadap pertumbuhan dan efisiensi pakan (FCR, bobot akhir), respons sistem imun (total hemocyte

count, aktivitas fenoloksidase), kesehatan saluran pencernaan (struktur vili, mikrobiota usus), serta produksi massal khamir laut melalui fermentasi. Kedua, penulis melakukan sintesis dan perbandingan antar penelitian, misalnya membandingkan hasil Ma et al. (2023) yang menunjukkan daya cerna protein ragi yang tinggi dengan temuan Feng et al. (2026) bahwa substitusi tepung ikan kadar tinggi justru menekan pertumbuhan, sehingga diperoleh batas optimal substitusi. Ketiga, penulis mengidentifikasi pola konsisten seperti peran β -glukan dalam meningkatkan imunitas non-spesifik, sekaligus mengidentifikasi gap penelitian bahwa sebagian besar percobaan masih berskala laboratorium dan jangka pendek, serta belum mempertimbangkan kompleksitas kondisi tambak nyata. Pada akhirnya, penulis menyimpulkan bahwa SCP berpotensi menjadi komponen utama pakan udang masa depan, namun formulasi harus memperhatikan keseimbangan asam amino esensial, palatabilitas, dan tingkat substitusi optimal, serta merekomendasikan arah riset menuju pakan fungsional, teknologi nano, dan pengujian skala lapangan untuk memastikan kelayakan ekonomi dan keamanan lingkungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Protein Sel Tunggal

Protein sel tunggal memiliki kandungan protein berkisar 40–80% tergantung jenis mikroorganisme. Khamir laut seperti *Debaryomyces hansenii*, *Candida tropicalis*, dan *Rhodotorula sp.* memiliki kandungan asam amino esensial yang baik serta mampu tumbuh pada kondisi lingkungan yang beragam (Gundupalli et al., 2024; Nalage et al., 2016; Schulz dan Oslage, 1976; Nyssölä et al., 2022).

Khamir laut tidak hanya berfungsi sebagai sumber protein tetapi juga menghasilkan metabolit bioaktif seperti β -glukan, mannan oligosakarida, vitamin, dan enzim ekstraseluler. Senyawa tersebut berkontribusi terhadap peningkatan sistem imun dan kesehatan usus (Akramienė et al 2007; Anusha et al 2014; Barsanti dan Gualtieri, 2023; Cao et al., 2026; Ghosh et al 2023).

Fungi dan mikroorganisme laut sebagai sumber senyawa bioaktif. Fungi laut dari sedimen maupun tambak udang diketahui mampu menghasilkan senyawa antimikroba, antioksidan, dan enzim ekstraseluler (Ameen et al., 2021; Chi et al., 2005; Chi et al., 2006; Yao et al., 2023; Rani et al., 2021; Onomu dan Okuthe, 2024; Dharmaraj, 2010). Potensi ini penting karena penyakit merupakan salah satu kendala utama dalam budidaya udang intensif. Infeksi jamur, bakteri, maupun virus dapat menurunkan produktivitas dan menyebabkan kematian massal. Dengan adanya bahan bioaktif dari mikroorganisme laut, pakan dapat dikembangkan tidak hanya sebagai sumber nutrisi, tetapi juga sebagai pakan fungsional yang mendukung Kesehatan (Bessadok et al., 2022; Ochoa-Alvarez et al., 2026; Wahjuningrum et al., 2025).

Khamir laut adalah mikroorganisme bersel tunggal yang memiliki potensi besar dalam industri akuakultur dan bioteknologi karena kandungan protein tinggi, kemampuan menghasilkan senyawa bioaktif, serta adaptasi terhadap kondisi laut yang ekstrem. Produksi khamir laut biasanya dilakukan melalui fermentasi terkontrol menggunakan media cair yang kaya nutrisi, termasuk sumber karbon, nitrogen, vitamin, dan mineral. Proses ini dapat dilakukan secara batch, fed-batch, atau kontinu, tergantung pada skala produksi dan tujuan akhir, seperti pakan hewan, sumber protein sel tunggal (SCP), atau produksi enzim dan metabolit bioaktif (Bessadok et al., 2022; Bolu et al., 2024).

Pemilihan spesies khamir laut menjadi faktor kunci dalam produksi karena setiap spesies memiliki karakteristik pertumbuhan, toleransi salinitas, suhu, dan kemampuan biosintesis metabolit yang berbeda. Spesies seperti *Candida tropicalis*, *Debaryomyces hansenii*, dan *Rhodotorula sp.* sering digunakan karena kestabilan metaboliknya dan kandungan protein tinggi. Identifikasi molekuler melalui analisis ITS (Internal Transcribed Spacer) digunakan untuk memastikan kemurnian dan spesies yang digunakan dalam fermentasi (Bolu et al., 2024; Bessadok et al., 2022).

Produksi khamir laut juga dapat dioptimalkan dengan penggunaan substrat alternatif, seperti limbah agroindustri atau hasil samping fermentasi, untuk meningkatkan keberlanjutan dan menurunkan biaya. Kondisi fermentasi, seperti pH, aerasi, suhu, dan kecepatan agitasi, sangat mempengaruhi laju pertumbuhan, akumulasi biomassa, dan kualitas protein yang dihasilkan. Teknik ini memungkinkan khamir laut tidak hanya menjadi sumber nutrisi, tetapi juga menghasilkan senyawa fungsional, seperti β -glukan, vitamin, dan enzim, yang bermanfaat untuk kesehatan hewan budidaya (Ochoa-Alvarez et al., 2022; Sarlin & Philip, 2018).

Secara keseluruhan, produksi khamir laut menawarkan peluang besar untuk mendukung industri akuakultur berkelanjutan. Selain substitusi protein hewani dalam pakan, khamir laut juga

mendukung sistem imun dan kesehatan usus udang melalui metabolit bioaktifnya. Pemanfaatan khamir laut diharapkan dapat menekan ketergantungan pada fishmeal, meningkatkan efisiensi pakan, dan mendukung ekonomi sirkular dalam produksi pakan akuakultur (Guo et al., 2022; Bessadok et al., 2022).

Produksi Massal Khamir Laut

Produksi massal khamir laut biasanya dilakukan melalui fermentasi terkontrol dalam media cair yang kaya nutrisi, baik menggunakan fermentasi batch, fed-batch, maupun kontinu. Parameter penting dalam produksi termasuk pH, suhu, aerasi, dan kecepatan agitasi, yang memengaruhi pertumbuhan biomassa dan kandungan protein. Media berbasis air laut sering digunakan untuk mendukung pertumbuhan optimal, sedangkan penggunaan substrat murah seperti limbah agroindustri atau hasil samping fermentasi dapat menekan biaya produksi dan meningkatkan keberlanjutan (Zaky et al., 2014; Sarkar dan Rao, 2014).

Tantangan utama dalam produksi massal khamir laut meliputi kontrol mutu, potensi produksi mikotoksin, dan optimasi proses fermentasi skala besar. Pengembangan teknik bioreaktor modern, optimasi media, serta monitoring parameter pertumbuhan dan metabolit sangat penting untuk menghasilkan biomassa berkualitas tinggi secara konsisten. Dengan penerapan teknologi fermentasi yang tepat, khamir laut dapat menjadi alternatif protein berkelanjutan yang efisien secara ekonomi dan memiliki aplikasi luas di industri pakan, farmasi, dan bioteknologi (Zaky et al., 2014; Sarkar dan Rao, 2014).

Khamir proteolitik adalah jenis ragi yang menghasilkan enzim protease tingkat tinggi untuk menghidrolisis protein menjadi peptida dan asam amino. Spesies seperti *Candida* sp., *Pichia* sp., *Saccharomyces* sp., dan *Debaryomyces hansenii* sering digunakan dalam industri pangan, fermentasi (kopi, keju, kecap), dan pengolahan limbah (Pratama et al 2024; Putri et al 2024).

Pengaruh terhadap Pertumbuhan dan Sistem Imun

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa suplementasi khamir dapat meningkatkan penambahan bobot, laju pertumbuhan spesifik, dan efisiensi pemanfaatan pakan. SCP mampu memperbaiki nilai feed conversion ratio (FCR) sehingga biaya produksi menjadi lebih efisien (Safdari et al., 2025; Jones et al 2020;).

β -glukan dari khamir terbukti meningkatkan aktivitas hemosit, fenoloksidase, dan respons imun non-spesifik. Pemberian SCP berbasis khamir mampu meningkatkan ketahanan terhadap infeksi *Vibrio harveyi* dan White Spot Syndrome Virus (WSSV) (Azzahra et al., 2024; Zhong et al 2026; Le et al 2025; Suharyadi et al 2025; Cheng et al 2026; Guo et al 2022; Gao et al 2025).

Beberapa artikel menunjukkan bahwa kesehatan udang tidak hanya ditentukan oleh komposisi protein dan energi, tetapi juga oleh komponen fungsional dalam pakan. Guo et al. (2022) membuktikan bahwa kultur ragi dapat memperbaiki status kesehatan saluran cerna juvenil *Litopenaeus vannamei*. Pemberian yeast culture 0,5-1,0% meningkatkan tinggi vili, aktivitas enzim imun, ekspresi gen antimikroba, serta kelimpahan *Lactobacillus*. Efek ini menunjukkan bahwa ragi tidak sekadar sumber nutrisi, tetapi juga berperan sebagai modulator mikrobiota dan respons imun mukosal. Dengan demikian, pakan fungsional berbasis ragi dapat menjadi strategi pencegahan penyakit yang lebih aman dibandingkan penggunaan antibiotik.

Hasil serupa tampak pada penelitian Azzahra et al. (2024), yang menguji kombinasi beta-glukan *Saccharomyces cerevisiae* dan bakteri endofit daun *Sonneratia alba* terhadap udang vaname yang diinfeksi *V. harveyi*. Formulasi terbaik menghasilkan total hemocyte count $7,54 \times 10^6$ sel/ml dan survival rate 85%. Temuan ini penting karena beta-glukan bekerja sebagai imunostimulan nonspesifik, sedangkan bakteri endofit mangrove memberi aktivitas antibakteri. Kombinasi keduanya memperlihatkan pendekatan sinergis antara penguatan imunitas inang dan penghambatan patogen. Strategi ini layak dikembangkan untuk budidaya intensif, terutama pada fase rentan ketika tekanan penyakit meningkat.

Vibrio harveyi muncul sebagai isu sentral dalam beberapa artikel. Zhong et al. (2026) melaporkan strain *V. harveyi* yang sangat virulen dan resisten terhadap banyak obat pada Chu's croaker. Strain tersebut membawa gen resistensi antimikroba dan faktor virulensi yang berkaitan dengan adhesi, motilitas, serta modulasi imun. Artikel ini memberi peringatan bahwa penggunaan antibiotik yang tidak terkendali dapat memperkuat risiko resistensi dan mempersempit pilihan terapi. Karena itu, pengendalian penyakit perlu bergeser ke pencegahan berbasis biosekuriti, vaksin, probiotik, imunostimulan, dan pemantauan genomik patogen.

Le et al. (2025) menawarkan pendekatan vaksinasi mukosal melalui kandidat vaksin hidup atenuasi *V. harveyi* VH 2886 pada Asian seabass. Vaksin tersebut tidak menimbulkan mortalitas pada uji keamanan dan memberikan relative percent survival hingga 72% ketika dikombinasikan dengan booster oral. Walaupun objeknya ikan kakap putih, prinsipnya relevan bagi akuakultur laut secara umum. Vaksin mukosal melalui perendaman dan pakan lebih praktis dibandingkan injeksi, terutama untuk produksi skala besar. Namun, riset lanjutan tetap diperlukan untuk memastikan stabilitas genetik, keamanan lingkungan, dan efektivitas pada berbagai spesies.

Pendekatan lain ditunjukkan oleh Suharyadi et al. (2025), yang menguji nanopartikel Fe₃O₄ berlapis kitosan terhadap *V. harveyi* dan toksisitasnya pada udang vaname. Hasilnya menunjukkan aktivitas antibakteri dengan toksisitas rendah pada udang. Teknologi nano membuka peluang sebagai pelapis pakan, pembawa bahan aktif, atau agen penghambat bakteri. Akan tetapi, penerapannya harus hati-hati karena nanopartikel dapat memiliki dampak ekologis jika dosis, stabilitas, dan residunya tidak dikendalikan. Karena itu, nanoteknologi akuakultur harus selalu disertai evaluasi toksikologi dan keamanan lingkungan.

Marine yeast dan beta-glucan menjadi fokus penting karena dapat memperkuat respons imun bawaan. Bessadok et al. (2022) menunjukkan bahwa ragi laut memiliki kandungan protein, lipid, asam amino esensial, dan potensi sebagai single-cell protein atau single-cell oil. Ochoa-Alvarez et al. (2026) melaporkan bahwa beta-glucan dari ragi laut mampu meningkatkan total hemocyte count dan survival udang setelah uji WSSV. Temuan Wahjuningrum et al. (2025) juga mendukung potensi bahan alga, herbal, dan fungi sebagai imunostimulan alami, terutama fungi *Nodulisporium* sp. KT29 yang memperbaiki pertumbuhan, struktur mikrovili usus, dan resistensi terhadap *Vibrio harveyi*.

Produksi berbasis mikroba dapat mengurangi ketergantungan pada ekstraksi sumber daya laut, menekan emisi karbon, dan menghasilkan peptida dengan stabilitas tinggi. Model ini memperlihatkan bahwa masa depan akuakultur dan pangan laut akan semakin terkait dengan bioinformatika, fermentasi, dan rekayasa protein.

Kesehatan Saluran Pencernaan

Kultur khamir memperbaiki struktur vili usus, meningkatkan populasi bakteri menguntungkan, serta menekan inflamasi pada saluran pencernaan. Efek ini berdampak pada peningkatan pencernaan nutrient (Zhang et al., 2020; Liu et al., 2026; Liu et al., 2024; Zhang et al 2022; Feng et al 2022; Wang et al 2022). Campuran asam amino arginin, lisin, dan metionin memperbaiki pertumbuhan, fagositosis, antioksidan, serta struktur mikrobiota usus (Lv et al., 2026). Enzyme-hydrolyzed marine protein pada level 1% memperbaiki nafsu makan, kesehatan usus, dan metabolisme lipid-protein pada diet reduced fish meal (Li et al., 2025). Sementara itu, moist fermented feed dengan frekuensi tepat mendukung kesehatan hepatopankreas dan menurunkan kelimpahan *Vibrio* serta *Pseudomonas* (Zhang et al., 2025).

Banyak studi menggabungkan parameter fisiologis, mikrobiota, histologi, enzim antioksidan, dan ekspresi gen. Pendekatan tersebut memberi gambaran mekanisme yang lebih jelas. Namun, beberapa kelemahan tetap terlihat. Banyak percobaan berlangsung singkat, memakai skala laboratorium, atau dilakukan pada kondisi lingkungan yang sangat terkontrol. Kondisi tambak nyata lebih kompleks karena melibatkan salinitas, kualitas air, kepadatan, variasi pakan komersial, serta tekanan patogen yang berubah. Selain itu, sebagian artikel belum membahas kelayakan ekonomi, stabilitas bahan saat penyimpanan, regulasi, dan penerimaan industri pakan. Karena itu, formulasi pakan modern perlu memakai prinsip fungsional. Pakan bukan hanya sumber energi dan protein, tetapi juga alat manajemen kesehatan.

Keberlanjutan dan Ekonomi

Dari sisi ekonomi, bahan baku alternatif perlu dinilai bukan hanya dari harga per kilogram, tetapi juga dari biaya produksi per kilogram biomassa udang (Zuorro et al., 2021; Fonseca & Santos, 2026; Carvalho et al 2022). Parameter FCR, pertumbuhan harian, survival rate, dan biaya pengelolaan air harus dihitung bersama. Artikel tentang SCP, probiotik, dan khamir menunjukkan hasil positif, tetapi adopsi lapangan membutuhkan kepastian pasokan bahan, standar mutu, keamanan hayati, dan kemudahan penggunaan. Tanpa standar tersebut, inovasi pakan sulit diterapkan secara konsisten oleh petambak kecil maupun tambak intensif berskala besar.

Dukungan terhadap potensi protein mikroba juga terlihat pada penelitian Maryana, Anam, dan Nugrahani (2016), Andriyanto, Giri, dan Marzuqi (2018), serta Manik (2019). Maryana

et al. (2016) membuktikan bahwa limbah cair tahu dapat menjadi substrat pertumbuhan *Rhizopus oryzae* untuk produksi protein sel tunggal. Nilai penting artikel ini terletak pada pendekatan ekonomi sirkular, yaitu mengubah limbah organik menjadi bahan bernilai. Andriyanto et al. (2018) menunjukkan bahwa kombinasi protein sel tunggal dan spent grains dapat menggantikan protein tepung ikan sampai 30% pada pakan kerapu hibrid tanpa menurunkan performa secara nyata. Manik (2019) menambahkan bahwa khamir laut dalam pakan sidat mampu meningkatkan retensi lemak dan daya cerna energi, terutama pada perlakuan khamir laut tereduksi. Walaupun objeknya tidak selalu udang vaname, ketiga artikel tersebut memperkuat dasar ilmiah bahwa sumber protein mikroba layak dikembangkan sebagai bahan pakan alternatif.

Artikel-artikel yang dikaji menunjukkan bahwa keberlanjutan budidaya udang vaname sangat bergantung pada inovasi pakan, penggunaan probiotik yang terukur (Dhewantara et al., 2022; Georges et al 2024; Andriyanto, 2018), pengelolaan kualitas air, dan adopsi teknologi manajemen yang sesuai dengan kapasitas petambak (Dwinafiah & Hasan, 2023; Nurhidayanti, 2025). Protein sel tunggal, khamir, limbah organik terolah, dan pakan terfermentasi membuka peluang untuk mengurangi ketergantungan pada tepung ikan (Maryana, 2016). Namun, inovasi tersebut perlu disertai pengujian dosis, analisis biaya, dan monitoring kualitas air secara disiplin agar peningkatan produksi tidak mengorbankan kesehatan udang maupun lingkungan tambak (Purnamasari, 2017; Felix 2023).

Analisis Komparatif

Berdasarkan kajian terhadap berbagai sumber literatur, terdapat perbandingan yang signifikan antara Protein Sel Tunggal (SCP) dari khamir laut dengan sumber protein lainnya. Dari segi kandungan nutrisi, SCP khamir laut memiliki kadar protein yang bervariasi antara 40 hingga 80 persen tergantung spesiesnya, serta kaya akan senyawa bioaktif seperti β -glukan, mannan oligosakarida, vitamin, dan enzim yang tidak dimiliki oleh tepung ikan maupun protein bakteri. Dari segi efek imunomodulator, khamir laut seperti *Debaryomyces hansenii* secara konsisten mampu meningkatkan total hemocyte count (THC) dan aktivitas fenoloksidase pada udang vaname, sebagaimana dilaporkan oleh Ochoa-Alvarez et al. (2026), sementara tepung ikan tidak memiliki efek imunostimulan sama sekali. Dari segi kesehatan usus, penelitian Guo et al. (2022) membuktikan bahwa pemberian kultur ragi 0,5 hingga 1,0 persen mampu meningkatkan tinggi vili usus dan populasi bakteri *Lactobacillus* yang menguntungkan. Namun demikian, dari segi palatabilitas, SCP masih memerlukan optimalisasi karena substitusi kadar tinggi justru dapat menekan respons makan udang, sebagaimana ditemukan oleh Feng et al. (2026) pada penggunaan *Clostridium autoethanogenum*. Perbandingan antar spesies khamir laut juga menunjukkan keunggulan yang berbeda-beda, di mana *D. hansenii* unggul dalam aktivitas proteolitik dan toleransi salinitas, *Candida tropicalis* unggul dalam stabilitas metabolik, dan *Rhodotorula* sp. unggul dalam kandungan lipid dan pigmen karotenoid. Sementara itu, perbandingan tingkat substitusi optimal menunjukkan bahwa batas maksimal penggantian tepung ikan dengan SCP sangat bergantung pada jenis mikroorganisme, spesies target, serta ketersediaan kompensasi asam amino esensial dan attractant pakan.

Gap Penelitian

Meskipun literatur yang terkumpul cukup komprehensif, terdapat beberapa celah penelitian yang masih perlu diisi oleh riset-riset selanjutnya. Gap pertama adalah masalah skala dan durasi percobaan, di mana mayoritas penelitian dilakukan dalam skala laboratorium dengan durasi singkat dan kondisi lingkungan yang sangat terkontrol, padahal kondisi tambak nyata jauh lebih kompleks dengan fluktuasi salinitas, suhu, kualitas air, kepadatan tinggi, serta tekanan patogen yang berubah secara dinamis. Gap kedua adalah kelayakan ekonomi, di mana sebagian besar artikel belum membahas analisis biaya secara komprehensif — bahan baku alternatif perlu dinilai dari biaya produksi per kilogram biomassa udang yang mencakup FCR, pertumbuhan harian, survival rate, dan biaya pengelolaan air, bukan sekadar harga per kilogram pakan. Gap ketiga berkaitan dengan stabilitas bahan dan regulasi, di mana stabilitas SCP selama penyimpanan dan distribusi belum banyak dikaji, termasuk risiko produksi mikotoksin pada khamir laut, potensi degradasi nutrisi, dan perubahan palatabilitas selama penyimpanan. Gap keempat adalah penerimaan industri dan adopsi lapangan, di mana tanpa kepastian pasokan bahan baku, standar mutu, keamanan hayati, dan kemudahan penggunaan, inovasi pakan sulit diterapkan secara konsisten oleh petambak kecil maupun tambak intensif skala besar. Gap kelima menyangkut keamanan lingkungan dari teknologi baru seperti nanopartikel Fe_3O_4 yang

menunjukkan potensi antibakteri, namun dampak ekologis jangka panjang dari akumulasinya di lingkungan tambak belum dievaluasi secara memadai. Gap keenam adalah kurangnya integrasi multidisiplin, di mana banyak studi hanya berfokus pada satu aspek secara terpisah, padahal pendekatan sistemik yang menggabungkan data fisiologis, mikrobiota, histologi, enzim antioksidan, dan ekspresi gen secara simultan masih jarang dilakukan.

Implikasi Ilmiah

Temuan-temuan dalam review ini memiliki implikasi yang luas bagi perkembangan ilmu pengetahuan di bidang akuakultur. Pertama, dalam ilmu nutrisi akuakultur, terjadi pergeseran paradigma bahwa pakan tidak lagi dipandang sekadar sumber energi dan protein, melainkan sebagai alat manajemen kesehatan atau functional feed. SCP membuktikan bahwa komponen bioaktif seperti β -glukan dan mannan oligosakarida mampu memodulasi sistem imun dan mikrobiota usus udang secara simultan. Selain itu, temuan Feng et al. (2026) bahwa substitusi SCP kadar tinggi justru menekan pertumbuhan menegaskan bahwa kualitas protein tidak dapat dinilai dari kadar protein semata, melainkan profil asam amino esensial, rasio keseimbangan, dan suplementasi kompensatoris seperti resveratrol menjadi faktor penentu keberhasilan formulasi. Kedua, dalam ilmu imunologi dan mikrobiologi, β -glukan dari khamir laut berfungsi sebagai imunoprolifaksis alami yang dapat mengurangi ketergantungan pada antibiotik, sebuah kontribusi strategis dalam menghadapi krisis resistensi antimikroba yang semakin mengkhawatirkan. Modulasi mikrobiota usus oleh SCP juga mengindikasikan bahwa bahan ini berpotensi sebagai prebiotik yang memperkuat gut barrier dan menekan kolonisasi patogen seperti *Vibrio harveyi*.

Ketiga, dalam bidang bioteknologi dan keberlanjutan, pemanfaatan limbah agroindustri sebagai substrat fermentasi khamir laut menunjukkan bahwa produksi SCP dapat diintegrasikan dengan sistem pengelolaan limbah, mengurangi emisi karbon sekaligus menghasilkan protein bernilai tinggi — sebuah penerapan nyata dari konsep ekonomi sirkular. Gao et al. (2025) menunjukkan bahwa kecerdasan buatan dapat digunakan untuk merancang peptida antioksidan melalui yeast synbio factories, yang berarti masa depan produksi SCP tidak hanya bergantung pada isolasi strain alami tetapi juga pada rekayasa metabolik dan desain protein berbasis AI. Keempat, dalam manajemen penyakit, ancaman *Vibrio harveyi* multiresisten dan WSSV menuntut pendekatan terpadu yang menggabungkan vaksin mukosal, nanopartikel, dan imunostimulan berbasis SCP sebagai strategi tiga jalur: penguatan imunitas inang, penghambatan patogen, dan biosekuriti. Kelima, secara metodologis, review ini merekomendasikan bahwa penelitian ke depan perlu menggunakan pendekatan integratif yang menggabungkan parameter fisiologis, histologi, mikrobiota, enzim antioksidan, dan ekspresi gen secara simultan, serta melakukan validasi pada skala tambak komersial dengan mempertimbangkan variabilitas lingkungan, dosis ekonomis, keamanan lingkungan, dan konsistensi hasil antar siklus budidaya. Tanpa standar mutu dan keamanan hayati yang jelas, serta tanpa kerangka regulasi dan sertifikasi yang memadai, SCP akan sulit diterima secara luas oleh industri pakan, sehingga riset tentang aspek-aspek tersebut merupakan prasyarat penting untuk komersialisasi di masa depan.

KESIMPULAN

Secara keseluruhan, artikel-artikel yang ditinjau menunjukkan bahwa inovasi akuakultur bergerak ke arah integrasi nutrisi, imunologi, mikrobiologi, dan bioteknologi. Udang dan hasil sampingnya memiliki nilai gizi dan bioaktif tinggi. Pakan berbasis yeast culture, beta-glukan, dan bakteri endofit dapat memperbaiki kesehatan saluran cerna, memperkuat imun, dan meningkatkan kelangsungan hidup. Pada saat yang sama, ancaman *V. harveyi* dan WSSV menuntut strategi pengendalian yang lebih presisi melalui vaksin, nanopartikel, pemantauan genomik, dan modulasi enzimatis. Namun, setiap inovasi perlu diuji pada skala lapangan, dosis ekonomis, keamanan lingkungan, dan konsistensi hasil. Dengan demikian, akuakultur berkelanjutan tidak cukup hanya mengejar produktivitas, tetapi juga harus menjamin kesehatan organisme, efisiensi sumber daya, keamanan pangan, dan pengurangan limbah.

REFERENSI

- Ameen, F., AlNadhari, S., & Al-Homaidan, A. A. (2021). Marine microorganisms as an untapped source of bioactive compounds. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(1), 224-231.
- Akramienė, D., Kondrotas, A., Didžiapetrienė, J. and Kėvelaitis, E. 2007. Effects of β -glucans on the immune system. *Medicina (Kaunas)*. 43: 597-606.

- Andriyanto, W., Giri, N. A., & Marzuqi, M. (2018). Aplikasi protein sel tunggal dan spent grains dalam formulasi pakan untuk pemeliharaan kerapu hibrid (*Epinephelus fuscoguttatus* x *Epinephelus polypekadion*). *Media Akuakultur*, 13(1), 41-47.
- Anusha, S.U., Sundar, S.K. and Williams Prakash, G. 2014. Studies on the isolation and characterisation of marine yeast, glucan production and immunostimulatory activity on *Carassius auratus*. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 3 : 230-40.
- Azzahra, A. S., Mufidah, S., Turahmi, S., The, B. B., & Praja, R. N. (2024). The effectiveness of beta-glucan *Saccharomyces cerevisiae* and endophytic bacteria *Sonneratia alba* leaves on the immune response of *Litopenaeus vannamei* infected with *Vibrio harveyi*. *Journal of Aquaculture Science*, 9(2), 128-141. <https://doi.org/10.20473/joas.v9i1.61492>
- Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2023). Glucans, paramylon and other algae bioactive molecules. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6), 5844.
- Berčák, J., Vietoris, V., Korčok, M., Rusková, A., Durec, J., & Neomániová, K. (2025). Organoleptic properties and neuroimaging response on the perception of edible gels. *Heliyon*, 11, e41649. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41649>
- Bessadok, B., Jaouadi, B., Brück, T., Santulli, A., Messina, C.M., & Sadok, S. (2022). Molecular Identification and Biochemical Characterization of Novel Marine Yeast Strains with Potential Application in Industrial Biotechnology. *Fermentation*, 8, 538.
- Bolu, W.O.R.S., Setyati, W.A., & Sedjati, S. (2024). Identifikasi Molekuler dan Uji Potensi Khamir Laut sebagai Penghasil Enzim Ekstraseluler. *Journal of Marine Research*, 13(2), 257-264.
- Cao, Y., Fan, Z., Jiang, L., Zhou, Y., Zhu, B., Xu, J., ... & Cai, G. (2026). Systematic evaluation and strategic utilization of bioactive constituents in solid-state fermentation-derived yeast culture. *Systems Microbiology and Biomanufacturing*, 6(1), 23.
- Carvalho Pereira, J., Lemoine, A., Neubauer, P., & Junne, S. (2022). Perspectives for improving circular economy in brackish shrimp aquaculture. *Aquaculture Research*, 53(4), 1169-1180.
- Cetinkaya, T., & Ayseli, M. T. (2024). A systematic review on nano-delivery systems enriched with aromatic compounds: Flavor, odor, and chemical quality perspectives in fish. *Food Chemistry Advances*, 5, 100750. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100750>
- Chen, B., Chen, A., Zhong, J., Dong, A., Chen, X., Chen, M., Yao, R., Zhao, W., & Niu, J. (2025). Responses in growth performance, antioxidant capacity, hepatopancreas morphology, and non-specific immune function after functional protein peptide replace fishmeal in the Pacific white shrimp. *Aquaculture Reports*, 44, 103010. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.103010>
- Chen, M., Chen, X. Q., Tian, L. X., Liu, Y. J., & Niu, J. (2020). Enhanced intestinal health, immune responses and ammonia resistance in Pacific white shrimp fed dietary hydrolyzed yeast and *Bacillus licheniformis*. *Aquaculture Reports*, 17, 100385. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100385>
- Cheng, C., Shen, T., Li, S., He, H., & Jiang, F. (2026). Arylsulfatase *LvArs2* regulates glycosaminoglycan sulfation and modulates white spot syndrome virus burden in *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture Reports*, 48, 103498. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2026.103498>
- Chi, Z., Liu, Z. Q. and Gao, L. M. 2005. Marine yeasts and their applications in mariculture. *Coll. Pap. Nat. Conf. High Tech. Mar. Biotechnol.* 3 : 243-47.
- Chi, Z., Liu, Z., Gao, L., Gong, F., Ma, C., Wang, X.H. and Li, H.F. 2006. Marine yeasts and their applications in mariculture. *J Ocean Univ China*. 5 : 251-56.
- Chi, Z.M., Ma, C., Wang, P. and Li, H.F. 2007. Optimization of medium and cultivation conditions for alkaline protease production by the marine yeast *Aureobasidium pullulans*. *Bioresour Technol.* 98 : 534- 38.
- Chi, Z., Zhe, C., Tong, Z., Liu, G., Li, J. and Wang, X. 2009. Production, characterization and gene cloning of the extracellular enzymes from the marine-derived yeasts and their potential applications. *Biotechnol Advances*. 27: 236-255.
- Darsiani, Annisa, C. N., Zulfiani, Yuniati, D., Haser, T. F., Mahfud, C. R., Tartila, S. S. Q., Harahap, A., & Febri, S. P. (2024). Potential reduction of stress levels and improving vaname growth performance with probiotic application. *Journal of Aquaculture Science*, 9(2), 63-73. <https://doi.org/10.20473/joas.v9i2.58448>
- Deng, D., Mei, C., Mai, K., Tan, B. P., Ai, Q., & Ma, H. (2012). Effects of a yeast-based additive on growth and immune responses of white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, and

- aquaculture environment. *Aquaculture Research*, 1-10. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2012.03139.x>
- Dharmaraj, S. (2010). Marine Streptomyces as a novel source of bioactive substances. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 26(12), 2123-2139.
- Dhewantara, Y. L., Danakusumah, E., & Mubarak, H. A. (2022). Penambahan probiotik *Lactobacillus plantarum* terhadap pertumbuhan udang vaname (*Litopenaeus vannamei*). *Journal of Aquaculture Science*, 7(1), 13-21. <https://doi.org/10.31093/joas.v7i1.207>
- Dwinafiah, R., & Hasan, S. A. Z. (2023). Optimalisasi produksi perikanan berkualitas berbasis digital yang aman, dan ramah lingkungan sebagai peningkatan ekonomi masyarakat pesisir. *Riset Sains dan Teknologi Kelautan*, 6(2), 141-145.
- Feng, Z., Zhong, Y., He, G., Sun, H., Chen, Y., Zhou, W., & Lin, S. (2022). Yeast culture improved the growth performance, liver function, intestinal barrier and microbiota of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*) fed high-starch diet. *Fish & Shellfish Immunology*, 120, 706-715.
- Felix, N., Manikandan, K., Uma, A., & Kaushik, S. J. (2023). Evaluation of single cell protein on the growth performance, digestibility and immune gene expression of Pacific white shrimp, *Penaeus vannamei*. *Animal Feed Science and Technology*, 296, 115549. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115549>
- Fonseca, A. C. M., & Dos Santos, M. T. (2026). Techno-economic and environmental assessment of shrimp waste biorefinery routes. *Bioresource Technology*, 134380.
- Gao, L., Zhou, T., Yuan, J., Zhang, S., Hong, K., Zhang, Z., Hau, L. C., Cheang, W. S., Zhou, C., & Wu, X. (2025). AI-powered de novo architecturing of marine-mimetic antioxidant peptides in yeast synbio factories. *Chemical Engineering Journal*, 524, 169604. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.169604>
- Georges, A., Nasmia, Tahya, A. M., Rosyida, E., Safir, M., Rukka, A. H., & Madinawati. (2024). Pengaruh konsentrasi probiotik (*Lactobacillus* sp.) berbeda dalam pakan komersil terfermentasi terhadap pertumbuhan udang kaki putih (*Penaeus vannamei*). *Jurnal Ilmiah AgriSains*, 25(1), 11-20. <https://doi.org/10.22487/jiagrisains.v25i1.2024.11-20>
- Gisbert, E., Ruiz, A., Torrecillas, S., Cruz-Quintana, Y., Bertomeu, E., Saromines, C., Melenchon, F., Ntokou, E., Pascual, I., Reinoso, S., Sarih, S., Solovye, M. M., Furones, M. D., & Thorring, N. W. (2025). Methanotrophic bacterial meal as an alternative feed ingredient for whiteleg shrimp diets. *Aquaculture Reports*, 45, 103094. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.103094>
- Ghosh, K., Hari Krishnan, R., Mukhopadhyay, A., & Ringø, E. (2023). Fungi and actinobacteria: alternative probiotics for sustainable aquaculture. *Fishes*, 8(12), 575.
- Gong, P., Liu, H., Cao, J., Gou, D., Wang, X., Ding, J., Chang, Y., & Zuo, R. (2025). Dietary carbohydrate to lipid ratios affect the somatic growth, gonad yield and organoleptic quality of *Strongylocentrotus intermedius* adults. *Aquaculture Reports*, 44, 103023. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.103023>
- Guo, Y., Zhang, L., Liang, Y., Li, P., Zhang, T., Meng, F., Liu, B., Zhang, H., Fu, W., Wang, W., Liang, J., & Tian, X. (2022). Effects of dietary yeast culture on health status in digestive tract of juvenile Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Fish and Shellfish Immunology Reports*, 3, 100065. <https://doi.org/10.1016/j.fsirep.2022.100065>
- Gundupalli, M. P., Ansari, S., da Costa, J. P. V., Qiu, F., Anderson, J., Luckert, M., & Bressler, D. C. (2024). Bacterial single cell protein (BSCP): a sustainable protein source from methylobacterium species. *Trends in Food Science & Technology*, 147, 104426.
- Guo, Y., Zhang, L., Liang, Y., et al. (2022). Effects of dietary yeast culture on health status in digestive tract of juvenile Pacific white shrimp.
- Guo et al. (2022). Effects of dietary yeast culture on health status in digestive tract of juvenile Pacific white shrimp.
- Ibrahim, J. A. A., Botcha, S., & Prattipati, S. D. (2025). Marine actinomycetes: A promising source of novel therapeutics and pharmaceutical bioactive compounds. *The Microbe*, 7, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.microb.2025.100383>
- Jones, S. W., Karpol, A., Friedman, S., Maru, B. T., & Tracy, B. P. (2020). Recent advances in single cell protein use as a feed ingredient in aquaculture. *Current opinion in biotechnology*, 61, 189-197.
- Kandaiah, R., & Ramasamy, M. (2014). Effect of feed addition of distillery yeast biomass protein hydrolysates in common carp (*Cyprinus carpio* L.) fingerlings diets. *World*, 6(6), 524-531.

- Kutty, S.N., Philip, R. and Damodaran, R. 2013. Marine yeasts in the slope sediments of Arabian Sea and Bay of Bengal. *Euro. J. Exp. Bio.* 3: 311-327.
- Kutty, S.N. and Philip, R. 2008. Marine yeasts – a review. *Yeast*. 25: 465–483.
- Le, T. T. T., Tossawas, P., Panphut, W., Sangsuriya, P., Phiwsaiya, K., Dong, H. T., & Senapin, S. (2025). Evaluation of a live attenuated *Vibrio harveyi* VH 2886 mutant for mucosal vaccination in Asian seabass (*Lates calcarifer*). *Comparative Immunology Reports*, 9, 200252. <https://doi.org/10.1016/j.cirep.2025.200252>
- Li, H., Chi, Z., Wang, X., Duan, X., Ma, L. and Gao, L. 2007a. Purification and characterization of extracellular amylase from the marine yeast *Aureobasidium pullulans* N13d and its raw potato starch digestion. *Enz and Microb Tech.* 40: 1006-1012.
- Li, X., Chi, Z., Liu, Z., Li, Z., Wang, X. and Hirimuthugoda, N.Y. 2007b. Purification and Characterization of Extracellular Phytase from a Marine Yeast *Kodamaea ohmeri* BG3. *Mar Biotechnol.* 10 : 190-197.
- Li, X., Xu, T., He, Y., Jin, M., Zhang, Y., Tang, F., & Zhou, Q. (2025). Dietary enzyme-hydrolyzed marine proteins supplementation promotes appetite, enhances lipid and protein metabolism in *Litopenaeus vannamei* fed reduced fish meal diets. *Aquaculture Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.103026>
- Limtong, S., Deejing, S., Yongmanitchai, W. and Santisopasri, W. 1998. Construction of high ethanol fermenting halotolerant hybrid by intergeneric protoplast fusion of *Saccharomyces cerevisiae* and *Zygosaccharomyces rouxii*. *Kasetsart J.* 32 : 213–223.
- Lin, C.S.K., Luque, R., Clark, J.H., Webb, C. and Du, C. 2011. A seawater-based biorefining strategy for fermentative production and chemical transformations of succinic acid. *Ener Environ Sci.* 4: 1471–1479.
- Liu, G.L., Ke, W., Ming, X.H., Muhammad, A.B. and Zhen, M.C. 2012. Purification and characterization of the cold-active killer toxin from the psychrotolerant yeast *Mrakia frigida* isolated from sea sediments in Antarctica. *Proc Biochem.* 47: 822-827.
- Liu, Z., Liu, Q., Zhang, D., Wei, S., Sun, Q., Xia, Q., Shi, W., Ji, H., & Liu, S. (2021). Comparison of the proximate composition and nutritional profile of byproducts and edible parts of five species of shrimp. *Foods*, 10, 2603. <https://doi.org/10.3390/foods10112603>
- Liu, S., Yang, L., Zhang, Y., Chen, H., Li, X., Xu, Z., ... & Liu, D. (2024). Review of yeast culture concerning the interactions between gut microbiota and young ruminant animals. *Frontiers in Veterinary Science*, 11, 1335765.
- Liu, S., Hao, P., Chen, H., Li, X., Xu, X., Du, R., ... & Liu, D. (2026). Effects of Compound Yeast Culture on the Intestinal Morphology, Intestinal Function, and Microorganisms of Weaned Lambs. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 1-23.
- Lv, C., Wu, J., Liu, Y., Zhang, W., Yang, D., & Zhao, J. (2026). Effects of the amino acid mixture on growth performance, non-specific immunity and intestinal health in Pacific white shrimp. *Comparative Immunology Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.cirep.2026.200282>
- Ma, C., Xia, S., Song, J., Hou, Y., Hao, T., Shen, S., Li, K., Xue, C., & Jiang, X. (2023). Yeast protein as a novel dietary protein source. *Current Research in Food Science*, 7, 100555. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100555>
- Manik, R. R. D. S. (2019). Penggunaan khamir laut dalam pakan *Anguilla bicolor* terhadap retensi lemak dan daya cerna energi. *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, 11(1), 77-80. <https://doi.org/10.20473/jipk.v11i1.12027>
- Maryana, L., Anam, S., & Nugrahani, A. W. (2016). Produksi protein sel tunggal dari kultur *Rhizopus oryzae* dengan medium limbah cair tahu. *Galenika Journal of Pharmacy*, 2(2), 132-137.
- Mariyam, S., Alherbawi, M., McKay, G., & Al-Ansari, T. (2025). A predictive model for biomass waste pyrolysis yield: Exploring the correlation of proximate analysis and product composition. *Energy Conversion and Management*: X, 25, 100831. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100831>
- Morey-Yagi, S. R., Kato, S., Yamaguchi, A., Takemura, A., Kuroishikawa, Y., Terada, K., Morishita, H., & Numata, K. (2026). Acetone-based lysis of marine purple photosynthetic bacterium, *Rhodovulum sulfidophilum*, for efficient biomass utilization. *Bioresource Technology*, 443, 133846. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133846>
- Meshram, M. M., Rajesh, M., Suyani, N. K., & Rajesh, K. M. (2021). Diet composition, feeding dynamics and proximate composition of obtuse barracuda. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 47, 429-434. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2021.09.005>

- Nalage, D., Khedkar, G., Kalyankar, A., Sarkate, A., Ghodke, S., Bedre, V. B., & Khedkar, C. D. (2016). Single cell proteins. *Encyclopedia of food and health*, 4, 790-794.
- Nguyen, K. Q., Hussain, A. S., Araujo, A. N., Strebel, L. M., Corby, T. L., Rhodes, M. A., Bruce, T. J., Cuéllar-Anjel, J., & Davis, D. A. (2026). Effects of different soybean protein sources on growth performance, feed utilization efficiency, intestinal histology, and physiological gene expression of Pacific white shrimp. *Aquaculture*, 611, 743021. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2025.743021>
- Novriadi, R., Istiqomah, I., Isnansetyo, A., Balk, D., Jolly-Breithaupt, M., & Davies, S. (2023). Corn fermented protein in production diets for Pacific white legged shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture Reports*, 30, 101571. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101571>
- Nunes, A. J. P., Dalen, L. L., Leonardi, G., & Burri, L. (2022). Developing sustainable, cost-effective and high-performance shrimp feed formulations containing low fish meal levels. *Aquaculture Reports*, 27, 101422. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2022.101422>
- Nurhidayanti, M. (2025). Evaluasi pengelolaan kualitas air untuk budidaya udang vannamei secara intensif. *Jurnal Perikanan Indonesia*, 1(1), 22-28.
- Nyyssölä, A., Suhonen, A., Ritala, A., & Oksman-Caldentey, K. M. (2022). The role of single cell protein in cellular agriculture. *Current Opinion in Biotechnology*, 75, 102686.
- Ochoa-Alvarez, N.A., Magallon-Barajas, F.J., Morelos-Castro, R.M., et al. (2022). Evaluation of marine yeasts Beta-glucans in the growth performance, defense and antioxidant response systems in *L. vannamei*.
- Ochoa-Alvarez, N. A., Magallon-Barajas, F. J., Morelos-Castro, R. M., Casillas-Hernandez, R., & Ramirez-Orozco, J. M. (2026). Evaluation of marine yeasts beta-glucans in the growth performance, defense and antioxidant response systems in *Litopenaeus vannamei*. *Fish and Shellfish Immunology*, 174, 111320. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2026.111320>
- Okpala-Ezennia, K. P., Nlewadim, A. A., Ikeogu, C. F., & Okoye, T. C. (2026). Chronic consequences of atrazine exposure on growth, proximate composition and histological integrity in *Clarias gariepinus* and its hybrid progeny. *Environmental Pollution and Management*, 2, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.epm.2025.03.002>
- Onomu, A. J., & Okuthe, G. E. (2024). The application of fungi and their secondary metabolites in aquaculture. *Journal of Fungi*, 10(10), 711.
- Pandey, D., Khanal, P., & Atanassova, M. (2026). Marine enzymes for food and animal feed: A systematic review of current applications and future perspectives. *Future Foods*, 13, 100988.
- Paul, R., Wolfe, J., Hebert, P. and Sinkula, M. 2003. Investing in nanotechnology. *Nature Biotechnol.* 21: 1134-1147.
- Pensupa, N., Jin, M., Kokolski, M., Archer, D.B. and Du, C. 2013. A solid state fungal fermentation-based strategy for the hydrolysis of wheat straw. *Bioresour Technol.* 149: 261-267. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2026.100988>
- Pratama, A., Gumilar, J., Putranto, W. S., & Rukayadi, Y. (2024). Isolation, Identification, and Characteristics of Local Yeast Isolates with Proteolytic Capability Obtained from Traditional Processed Indonesian Duck Eggs. *Journal of Pure & Applied Microbiology*, 18(3).
- Purushothaman, K., Vu, N. T., Loh, J. Y., Liang, B., Domingos, J. A., & Vij, S. (2026). Stability of muscle fatty acids and proximate composition across phenotypic traits in Malabar red snapper. *Journal of Food Composition and Analysis*, 153, 109133. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2026.109133>
- Purnamasari, I., Purnama, D., & Utami, M. A. F. (2017). Pertumbuhan udang vaname (*Litopenaeus vannamei*) di tambak intensif. *Jurnal Enggano*, 2(1), 58-67.
- Putri, C. M., Rustama, M. M., & Putranto, W. S. (2024). Skrining Bakteri Asam Laktat dan Khamir Potensial Proteolitik Ekstraseluler dan Milk Clotting Activity Dari Ekstrak Dan Fresh Cheese Stroberi (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Jurnal Teknologi Hasil Peternakan*, 5(1), 61-82.
- Rani, A., Saini, K. C., Bast, F., Mehariya, S., Bhatia, S. K., Lavecchia, R., & Zuurro, A. (2021). Microorganisms: a potential source of bioactive molecules for antioxidant applications. *Molecules*, 26(4), 1142.
- Reis, J., Oliveira, M., Neves, A., Abreu, M., Andrade, R., Ramos, C., Roseiro, C., Partidário, A., Vida, M., Costa, G., Lucas, R., Alvarenga, N., & Dias, I. (2025). Effects of diets using fruit and vegetables by-products and fishmeal on the proximate and fatty acid composition

- of edible insect powder. Science Talks, 14, 100463. <https://doi.org/10.1016/j.sctalk.2025.100463>
- Rhishipal, R. and Philip, R. 1998. Selection of marine yeasts for the generation of single cell protein from prawn- shell. Bioresour Technol. 65: 255–266.
- Rogers, M., Bare, R., Gray, A., Scott-Moelder, T., & Heintz, R. (2019). Assessment of two feeds on survival, proximate composition, and amino acid carbon isotope discrimination in hatchery-reared Chinook salmon. Fisheries Research, 219, 105303. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2019.06.001>
- Safdari, Z., Ariffin, M. K. A., Supeni, E. E., & Sultan, M. T. H. (2025). Fulfilling Feed Demands: Industrial Production of *Saccharomyces cerevisiae* as Key Protein Source for Aquaculture, Poultry and Livestock. Pertanika Journal of Science & Technology, 33(2).
- Sanusi, M. S., Oke, O. L., Raji, A. O., Henshaw, F., & Bello, A. B. (2025). Effects of boiling and ultrasound treatment on proximate composition, minerals and in vitro protein digestibility of *Cirina butyrospermi* powder. Journal of Agriculture and Food Research, 19, 101608. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101608>
- Sarkar, A., & Rao, B. (2016). Marine yeast: A potential candidate for biotechnological applications-A review. Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences, 18(3), 627-634.
- Saravanakumar, K., Senthilraja, P. and Kathiresan, K. 2013. Bioethanol production by mangrove-derived marine yeast *Sacchromyces cerevisiae*. J King Saud Univ Sci. 25: 121–127.
- Sarkar, S., Pramanik, A., Mitra, A. and Mukherjee, J. 2010. Bioprocessing Data for the Production of Marine Enzymes. Mar. Drugs. 8: 1323-172.
- Sarlin, P.J., & Philip, R. (2018). Efficacy of Marine Yeasts as Feed Supplement for *Fenneropenaeus indicus* in Culture Systems.
- Sarlin, P.J. and Philip, R. 2011. Efficacy of marine yeasts and baker 's yeast as immunostimulants in *Fenneropenaeus indicus*: a comparative study. Aquaculture. 321: 173-178.
- Schulz, E., & Oslage, H. J. (1976). Composition and nutritive value of single-cell protein (SCP). Animal Feed Science and Technology, 1(1), 9-24. Yao, H., Liu, S., Liu, T., Ren, D., Yang, Q., Zhou, Z., & Mao, J. (2023). Screening of marine sediment-derived microorganisms and their bioactive metabolites: a review. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 39(7), 172.
- Suharyadi, Yanuhar, U., Widodo, M. S., Faqih, A. R., Suryanto, H., & Caesar, N. R. (2025). Study of the toxicity of Fe₃O₄ nanoparticles on Pacific white leg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and the antibacterial efficacy against *Vibrio harveyi*. Journal of Hazardous Materials Advances, 18, 100674. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100674>
- Tadesse, D., Masresha, G., Lulekal, E., Getachew, P., & Belayneh, T. (2025). Proximate, mineral, and anti-nutrient compositions of selected wild edible plants consumed in Northwestern Ethiopia. Measurement: Food, 19, 100243. <https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2025.100243>
- Urkato, A. K., Monahan, F. J., Dunne, P. G., Yesuf, Y. K., Fahey, A. G., & Takele, T. A. (2026). Local feeding systems of Wolaita indigenous steers in Wolaita, Ethiopia: Effects on performance, carcass traits, muscle fatty acid composition and meat sensory quality. Journal of Agriculture and Food Research, 27, 102841. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2026.102841>
- Wang, Q., Ayiku, S., Liu, H., Tan, B., Dong, X., Chi, S., ... & Zhou, W. (2022). Dietary yeast culture facilitates the growth, immune response, digestive enzyme activity, intestinal microbiota and disease resistance against *Vibrio harveyi* of hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus*♀× *Epinephelus lanceolatus*♂). Aquaculture Research, 53(6), 2484-2500.
- Wahjuningrum, D., Gustilatov, M., Tarman, K., Sukenda, Effendi, I., Umam, K., Ulzanah, N., Miranti, S., & Kumala, F. B. (2025). Dietary comparison of algal, herbal, and fungal ingredients fed to Pacific white shrimp across cultivation sites. Comparative Immunology Reports. <https://doi.org/10.1016/j.cirep.2025.200237>
- Yildirim-Aksoy, M., Eljack, R., Beck, B. H., & Peatman, E. (2022). Nutritional evaluation of frass from black soldier fly larvae as potential feed ingredient for Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. Aquaculture Reports, 27, 101353. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2022.101353>
- Zaky, A. S., Tucker, G. A., Daw, Z. Y., & Du, C. (2014). Marine yeast isolation and industrial application. FEMS yeast research, 14(6), 813-825.

- Zhang, J. C., Chen, P., Zhang, C., Khalil, M. M., Zhang, N. Y., Qi, D. S., ... & Sun, L. H. (2020). Yeast culture promotes the production of aged laying hens by improving intestinal digestive enzyme activities and the intestinal health status. *Poultry science*, 99(4), 2026-2032.
- Zhang, J., He, H., Yuan, Y., Wan, K., Li, L., & Liu, A. (2022). Effects of yeast culture supplementation on growth performance, nutrient digestibility, blood metabolites, and immune response in geese. *Animals*, 12(10), 1270.
- Zhang, Q., Teame, T., Yang, H., Wei, S., Ding, Q., Yao, Y., Yang, Y., Ran, C., Zhang, Z., & Zhou, Z. (2025). Effects of substitution of moist fermented feed for dry pellet feed on hepatopancreas and intestinal health, and intestinal microbiota homeostasis of Pacific white shrimp. *Aquaculture Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.103337>
- Zhong, Z., Fan, J., Su, H., Zhu, H., & Ma, D. (2023). Proximate compositions evaluation, histology and transcriptome analysis revealed the effects of formulated diets on muscle quality in *Micropterus salmoides*. *Reproduction and Breeding*, 3, 50-58. <https://doi.org/10.1016/j.repbre.2023.04.002>
- Zhong, L., Yan, L., Ye, X., Sun, J., Lin, F., Liu, H., Yan, K., Li, R., & Cai, W. (2026). Isolation, identification, and whole-genome analysis of a highly virulent and multidrug-resistant *Vibrio harveyi* strain associated with mass mortality of Chu's croaker (*Nibea coibor*). *Aquaculture Reports*, 48, 103540. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2026.103540>
- Zuorro, A., Moreno-Sader, K. A., & González-Delgado, Á. D. (2021). Evaluating the feasibility of a pilot-scale shrimp biorefinery via techno-economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128740.