Jurnal Media Akuatika
ISSN 2503-4324
Volume 11, Nomor 4, Oktober 2026

Respons Histologis dan Profil Darah Ikan Nila (*Oreochromis niloticus*) yang Diberi Pakan dengan Substitusi Tepung Kedelai oleh Tepung *Padina australis*

Intestinal Histological and Hematological Responses of Nile Tilapia (Oreochromis niloticus) Fed Diets Containing Padina australis Meal as a Soybean Meal Substitute

Sujabarlah, Muhaimin Hamzah, Kadir Sabilu, La Ode Baytul Abidin*

Program Studi Budidaya Perairan, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia

ABSTRAK: Pengembangan bahan pakan alternatif menjadi salah satu upaya untuk mengurangi ketergantungan pada bahan baku konvensional, seperti tepung kedelai, dalam formulasi pakan ikan. Makroalga *Padina australis* berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan substitusi, tetapi pengaruh penggunaannya terhadap kondisi fisiologis ikan perlu dievaluasi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh substitusi tepung kedelai dengan tepung *P. australis* terhadap histologi usus dan profil darah ikan nila (*Oreochromis niloticus*). Penelitian menggunakan rancangan acak lengkap dengan empat perlakuan dan tiga ulangan, yaitu TP-0 (0% tepung *P. australis*), TP-7,5 (7,5%), TP-15 (15%), dan TP-22,5 (22,5%), dengan penyesuaian proporsi tepung kedelai. Sebanyak 72 ekor ikan dipelihara selama 42 hari. Parameter yang diamati meliputi histologi usus, jumlah eritrosit, jumlah leukosit, dan kadar hemoglobin. Hasil pengamatan menunjukkan adanya enteritis haemorrhagica dan parasiticus pada TP-0, enteritis parasiticus pada TP-7,5, tidak ditemukan kelainan spesifik pada TP-15, serta enteritis haemorrhagica pada TP-22,5. Jumlah eritrosit dan kadar hemoglobin tertinggi ditemukan pada TP-15, masing-masing sebesar 4,18 ± 0,15 × 10^6 sel/mm^3 dan 6,67 ± 1,15 g/dL. Sementara itu, jumlah leukosit tertinggi ditemukan pada TP-22,5 sebesar 40,49 ± 2,58 × 10^4 sel/µL. Secara keseluruhan, substitusi tepung kedelai dengan tepung *P. australis* pada TP-15 menunjukkan kompatibilitas histologis dan fisiologis terbaik berdasarkan parameter yang diamati.
Kata kunci: *Padina australis*; Ikan nila; Substitusi tepung kedelai; Histologi usus; Profil darah.

ABSTRACT: The development of alternative feed ingredients is important for reducing dependence on conventional protein sources, such as soybean meal, in aquafeed formulations. The brown macroalga *Padina australis* may serve as an alternative ingredient; however, its effects on fish physiological conditions require further evaluation. This study evaluated the effects of soybean meal substitution with *P. australis* meal on intestinal histology and hematological profiles of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). The experiment employed a completely randomized design with four treatments and three replicates: TP-0 (0% *P. australis* meal), TP-7.5 (7.5%), TP-15 (15%), and TP-22.5 (22.5%), with corresponding adjustments in soybean meal inclusion. A total of 72 fish were reared for 42 days. The evaluated parameters included intestinal histology, erythrocyte count, leukocyte count, and hemoglobin concentration. Histological observations revealed enteritis parasiticus and haemorrhagica in TP-0, enteritis parasiticus in TP-7.5, no specific abnormalities in TP-15, and enteritis haemorrhagica in TP-22.5. The highest erythrocyte count and hemoglobin concentration were recorded in TP-15, reaching 4.18 ± 0.15 × 10^6 cells/mm^3 and 6.67 ± 1.15 g/dL, respectively. In contrast, the highest leukocyte count was observed in TP-22.5 (40.49 ± 2.58 × 10^4 cells/µL). Overall, replacing of soybean meal with *P. australis* meal in TP-15 demonstrated the most favorable histological and physiological compatibility based on the parameters evaluated.
Keywords: *Padina australis*; Nile tilapia; Soybean meal substitution; Intestinal histology; Hematological profile.

PENDAHULUAN

Akuakultur menghadapi kebutuhan untuk menghasilkan ikan secara efisien sekaligus mengurangi ketergantungan pada bahan pakan konvensional dan sumber daya yang berisiko tidak berkelanjutan. Pakan merupakan salah satu komponen biaya terbesar dalam produksi ikan, sedangkan peningkatan penggunaan bahan nabati dapat menimbulkan persoalan berupa ketidakseimbangan asam amino, rendahnya kecernaan, senyawa antinutrisi, dan perubahan kesehatan saluran pencernaan (Siddik *et al*., 2023; Hughes *et al*., 2025). Kondisi ini mendorong pencarian bahan lokal yang tidak hanya berfungsi sebagai sumber nutrien, tetapi

Penulis korespondensi: baytul.abidin@uho.ac.id

***Article history*:**
Diterima/*Received*: 30 Oktober 2026
Disetujui/*Accepted*: 4 November 2026
Diterbitkan/*Published*: 7 November 2026

juga memiliki komponen bioaktif untuk mendukung imunitas, status oksidatif, dan integritas usus ikan.

Makroalga merupakan salah satu kandidat bahan fungsional karena mengandung polisakarida struktural dan tersulfatasi, mineral, asam lemak, pigmen, serta senyawa fenolik yang dapat memengaruhi mikrobiota, aktivitas enzim pencernaan, dan respons imun ikan (Morais *et al*., 2020; Abdel-Latif *et al*., 2022; Siddik *et al*., 2023). Pada makroalga cokelat, alginat dan fucoidan menjadi komponen penting yang secara teoritis dapat berperan sebagai modulator mukosa dan imunitas. Fucoidan dari makroalga telah dilaporkan meningkatkan kesehatan usus dan respons imun pada beberapa ikan, sedangkan alginat dapat bersifat netral terhadap struktur usus bergantung pada sumber, dosis, dan karakteristik molekulnya (Cui *et al*., 2019; Mahgoub *et al*., 2020; Merrifield *et al*., 2011).

Padina australis merupakan makroalga cokelat yang tersedia di perairan tropis dan memiliki potensi sebagai bahan pakan lokal. Spesies ini dilaporkan mengandung protein, karbohidrat, mineral, asam amino, fucoxanthin, serta metabolit sekunder seperti fenolik, flavonoid, tanin, saponin, terpenoid, dan steroid (Salosso *et al*., 2020; Jaswir *et al*., 2011; Darem *et al*., 2024). Ekstrak *P. australis* pada ikan mas meningkatkan pertumbuhan, aktivitas enzim pencernaan, parameter imun, ekspresi gen terkait integritas usus, dan ketahanan terhadap Aeromonas hydrophila (Sheikhzadeh *et al*., 2022). Namun, ekstrak terpilih tidak setara dengan tepung utuh karena perbedaan konsentrasi, kelarutan, bioavailabilitas, dan matriks bahan. Penelitian mengenai tepung P. australis sebagai substituen tepung kedelai pada ikan nila masih terbatas, khususnya yang menghubungkan respons hematologi dengan perubahan histologi usus.

Ikan nila (*Oreochromis niloticus*) merupakan ikan omnivora yang cenderung memanfaatkan bahan nabati, tetapi kemampuan tersebut tidak berarti bahwa peningkatan inklusi suatu bahan alga selalu menghasilkan respons fisiologis yang lebih baik. Studi pada ikan nila menunjukkan bahwa bahan alga atau polisakarida dapat meningkatkan parameter darah, imunitas, dan morfometri usus pada dosis tertentu, tetapi responsnya dapat berubah pada tingkat inklusi yang lebih tinggi (Ashour *et al*., 2020; Negm *et al*., 2021; Siddik *et al*., 2024). Penelitian bahan nabati lain juga memperlihatkan bahwa perubahan komposisi pakan dapat menghasilkan adaptasi mukosa, perubahan panjang vili, atau respons inflamasi yang bergantung pada keseimbangan nutrien dan kondisi pemeliharaan (Refaey *et al*., 2023; El-Sayed *et al*., 2024; Ferreira *et al*., 2023). Kesenjangan antara potensi bioaktif *P. australis* dan bukti langsung mengenai keamanan serta kompatibilitas tepungnya pada jaringan usus dan darah nila menjadi masalah utama yang perlu dijawab.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh substitusi tepung kedelai dengan tepung *P. australis* terhadap histologi usus dan profil darah ikan nila. Histologi usus digunakan untuk mengidentifikasi perubahan struktural dan lesi inflamasi, sedangkan profil darah meliputi eritrosit, leukosit, dan hemoglobin sebagai indikator kondisi fisiologis serta respons imun. Pendekatan terpadu ini diharapkan dapat menentukan tingkat substitusi yang paling kompatibel secara deskriptif, sekaligus memperjelas apakah peningkatan penggunaan tepung P. australis berkaitan dengan perbaikan kondisi fisiologis atau justru dengan tanda gangguan jaringan dan stres. Hasil penelitian dapat menjadi dasar pengembangan pakan berbahan makroalga lokal yang diuji berdasarkan keamanan jaringan, bukan hanya pertumbuhan ikan.

METODE

Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan pada April–Mei 2022. Pemeliharaan ikan dan pembuatan pakan dilakukan di Laboratorium Budidaya, Pembenihan dan Produksi Perikanan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Halu Oleo, Kendari, Sulawesi Tenggara. Pengamatan profil darah dilakukan di Laboratorium Unit Produktivitas dan Lingkungan Perairan pada institusi yang sama. Pengamatan histologi usus dilakukan di Balai Besar Penelitian Veteriner Bogor, Jawa Barat.

Hewan uji dan kondisi pemeliharaan

Hewan uji berupa 72 ekor ikan nila berukuran 8–12 g yang diperoleh dari Cialam, Konda, Konawe Selatan, Sulawesi Tenggara. Ikan dipilih berdasarkan kondisi aktif, ukuran relatif seragam, dan tidak menunjukkan cacat morfologis. Sebelum perlakuan, ikan diaklimatisasi selama tujuh hari dalam bak fiber menggunakan air yang telah diendapkan selama dua hari dan diberi pakan komersial. Ikan kemudian dipuasakan selama 24 jam sebelum ditempatkan pada unit percobaan. Pemeliharaan dilakukan dalam 12 akuarium kaca berukuran 40 cm × 40 cm × 40 cm, masing-masing berisi enam ekor ikan dan dilengkapi aerasi. Ikan diberi pakan perlakuan sebanyak 5% biomassa per hari yang dibagi menjadi dua waktu pemberian, yaitu pukul 08.00 dan 17.00 WITA. Penyiponan dilakukan setiap pagi sebelum pemberian pakan, sedangkan penimbangan ikan dilakukan setiap dua minggu untuk menyesuaikan jumlah pakan.

Pembuatan dan formulasi pakan uji

Makroalga P. australis dikumpulkan dari perairan pantai, dibersihkan dari lumpur dan kotoran, kemudian dibilas menggunakan air tawar. Bahan dikeringkan hingga tidak lembap dan digiling menggunakan blender sampai menjadi tepung. Pakan uji dibuat dalam bentuk pelet dengan mencampurkan seluruh bahan baku secara homogen, menambahkan air sebanyak 25–30% dari total campuran, mencetak adonan menggunakan mesin penggiling, kemudian mengeringkannya hingga pelet tidak lembap. Komposisi formulasi pakan merujuk pada Ikhsan *et al*. (2026), disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Formulasi Pakan Uji

Bahan Baku Pakan	**Persentase bahan yang digunakan (%)**			
	TP-0	**TP-7,5**	**TP-15**	**TP-22,5**
Tepung ikan	30	30	30	30
Tepung kepala udang	20	20	20	20
Tepung kedelai	**30**	**22,5**	**15**	**7,5**
Tepung *P. australis* (TP)	**0**	**7,5**	**15**	**22,5**
Tepung jagung	8	8	8	8
Tepung sagu	4	4	4	4
Tepung dedak halus	6	6	6	6
Minyak sawit	1	1	1	1
Top Mix	1	1	1	1
Total	**100**	**100**	**100**	**100**

Desain Penelitian

Penelitian menggunakan rancangan acak lengkap dengan empat perlakuan dan tiga ulangan. Perlakuan yang diterapkan adalah sebagai berikut:

TP-0 : 0% tepung *P. australis*, 30% tepung kedelai
TP-7,5 : 7,5% tepung *P. australis* + 22,5% tepung kedelai
TP-15 : 15% tepung *P. australis* + 15% tepung kedelai
TP-22,5 : 22,5% tepung *P. australis* + 7,5% tepung kedelai

Pengamatan histologi usus

Pada akhir pemeliharaan, ikan dari setiap perlakuan diambil untuk pengamatan jaringan usus. Bagian usus yang diamati dipisahkan secara hati-hati, lalu dilakukan fiksasi menggunakan formalin 10% kemudian sampel dikirim ke Balai Besar Penelitian Veteriner Bogor untuk pengamatan histologi. Preparat histologi menggunakan pewarnaan hematoksilin-eosin sesuai prosedur laboratorium. Preparat diamati menggunakan mikroskop cahaya pada pembesaran 100× dan 200×. Evaluasi dilakukan secara deskriptif terhadap struktur vili mukosa, tunika muskularis, infiltrasi sel mononuklear, hemoragi, dan keberadaan cacing intestinal. Gambaran lesi diklasifikasikan berdasarkan temuan utama menjadi tidak ada kelainan spesifik, enteritis, enteritis parasiticus, atau enteritis haemorrhagica.

Pengambilan dan analisis profil darah

Profil darah diamati dua kali, yaitu sebelum pemberian pakan uji dan pada hari ke-42. Parameter yang dianalisis meliputi eritrosit, leukosit, dan hemoglobin. Sampel darah diambil

menggunakan spuit dan ditampung dalam tabung yang berisi antikoagulan untuk mencegah pembekuan.

Eritrosit

Sampel darah diencerkan menggunakan larutan Hayem. Darah dihisap dengan pipet eritrosit hingga skala 0,5, kemudian larutan Hayem ditambahkan hingga skala 101 dan dihomogenkan selama 3–5 menit. Dua tetes awal dibuang, selanjutnya suspensi darah diteteskan ke dalam haemocytometer Neubauer dan diamati menggunakan mikroskop pada pembesaran 400×. Jumlah eritrosit dihitung berdasarkan jumlah sel pada ruang hitung dan faktor pengenceran. Jumlah eritrosit dihitung berdasarkan metode Blaxhall & Daisley (1973) dengan persamaan sebagai berikut:

$$N = \frac{n}{V} \times P$$

Keterangan:
N : Jumlah sel eritrosit dalam 1 µL (sel/µL)
n : Jumlah sel eritrosit dalam 5 ruang hitung
V : Volume 5 ruang hitung (0,02 mm^3)
P : Faktor pengencer (200×)

Leukosit

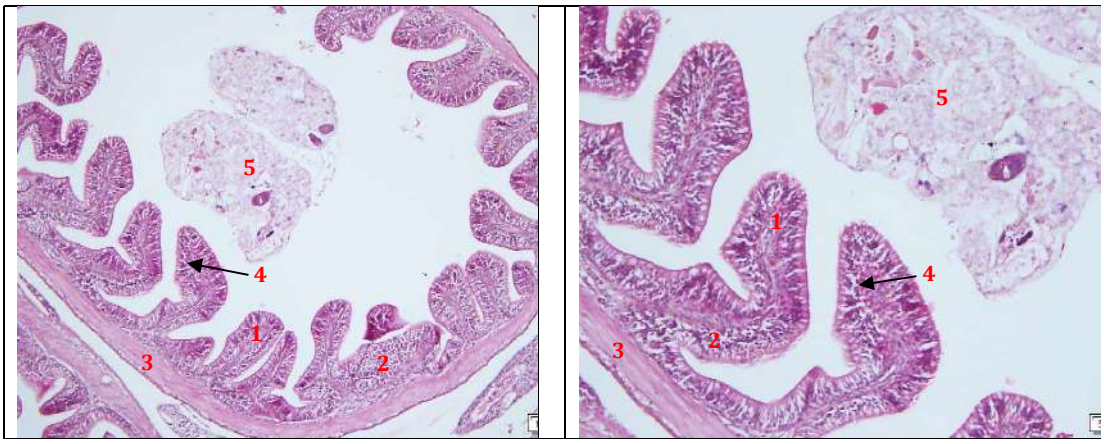
Sampel darah diencerkan menggunakan larutan Turk. Darah dihisap dengan pipet leukosit hingga skala 0,5, larutan Turk ditambahkan hingga skala 11, kemudian campuran dihomogenkan selama 3–5 menit. Suspensi darah diteteskan pada haemocytometer setelah tetesan awal dibuang. Leukosit dihitung pada lima ruang hitung menggunakan mikroskop.

Hemoglobin

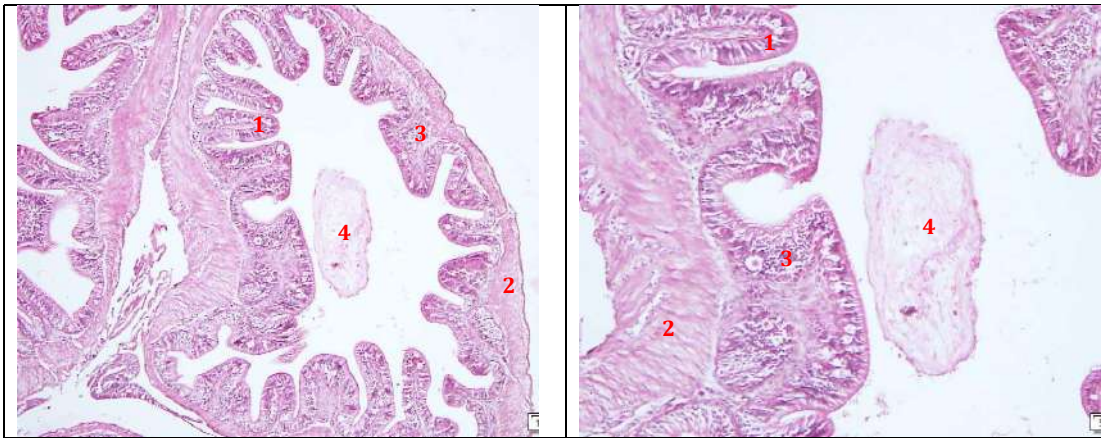
Kadar hemoglobin diukur menggunakan metode Sahli. Tabung Sahli diisi larutan HCl 0,1 N hingga skala 10. Darah sebanyak 0,02 mL ditambahkan ke dalam tabung, dicampur, dan didiamkan selama tiga menit. Akuades ditambahkan secara bertahap sampai warna larutan sama dengan standar pembanding. Hasil dinyatakan dalam g/dL.

HASIL

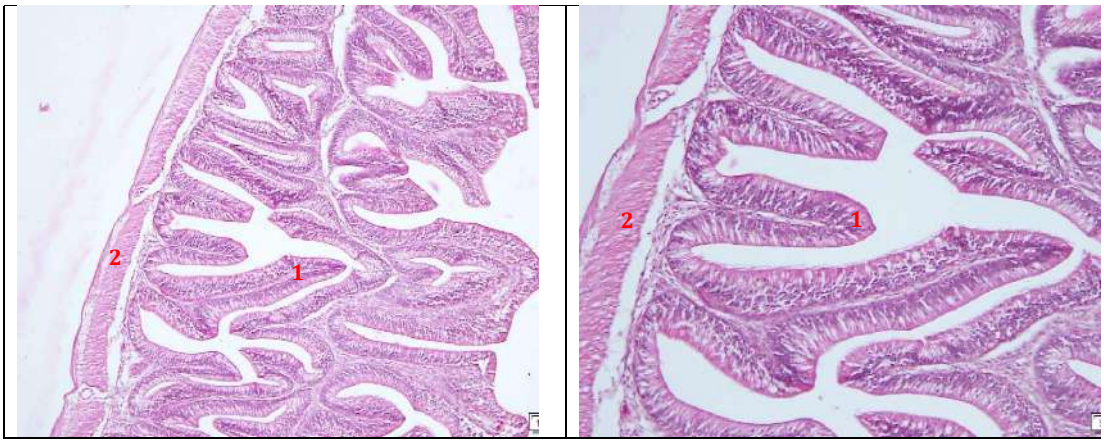
Hasil pengamatan histologi usus ikan nila menunjukkan adanya perbedaan gambaran jaringan antarperlakuan pakan. Pada perlakuan TP-0, ditemukan gambaran enteritis parasiticus yang ditandai oleh keberadaan cacing intestinal pada lumen atau jaringan usus, infiltrasi sel mononuklear, serta hemoragi. Struktur vili mukosa dan tunika muskularis masih dapat diamati, tetapi adanya infiltrasi sel mononuklear dan perdarahan menunjukkan respons inflamasi pada jaringan usus (Gambar 1). Pada perlakuan TP-7,5, preparat menunjukkan gambaran enteritis dengan ditemukannya cacing intestinal dan infiltrasi sel mononuklear. Vili mukosa dan tunika muskularis masih terlihat pada preparat (Gambar 2). Perlakuan TP-15 menunjukkan gambaran usus tanpa kelainan spesifik. Vili mukosa dan tunika muskularis tampak dapat dibedakan, Perlakuan TP-15 memperlihatkan kondisi jaringan yang paling mendekati gambaran normal di antara preparat yang diamati (Gambar 3). Sedangkan pada perlakuan TP-22,5, ditemukan gambaran enteritis haemorrhagica yang ditandai oleh adanya hemoragi dan infiltrasi sel mononuklear. Vili mukosa serta tunika muskularis masih dapat diamati. Gambaran ini menunjukkan adanya proses inflamasi yang disertai perdarahan pada jaringan usus (Gambar 4).



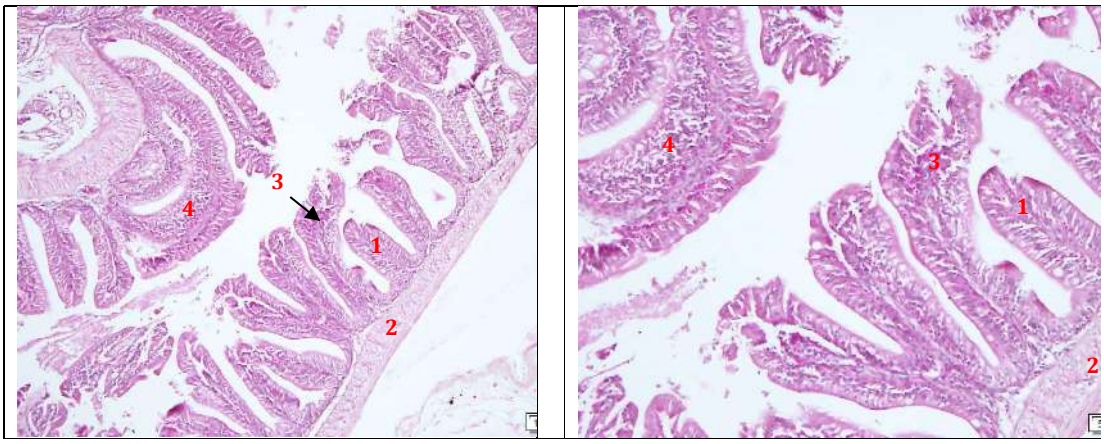
Gambar 1. Usus ikan nila pada perlakuan TP-0. (1) Villi mukosa, (2) Infiltrasi sel mononuclear, (3) Tunika muscularis, (4) Haemorrhagi, dan (5) Cacing intestinalis. Preparat diamati pada pembesaran 100× (kiri) dan 200× (kanan).



Gambar 2. Usus ikan nila pada perlakuan TP-7,5. (1) Villi mukosa, (2) Tunika muscularis, (3) Infiltrasi sel mononuclear, dan (4) Cacing intestinalis. Preparat diamati pada pembesaran 100× (kiri) dan 200× (kanan).

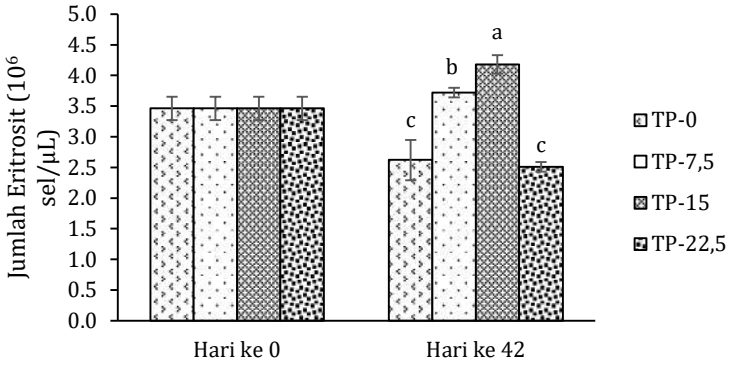


Gambar 3. Usus ikan nila pada perlakuan TP-15, tanpa ada kelainan spesifik. (1) Villi mukosa, dan (2) Tunika muscularis. Preparat diamati pada pembesaran 100× (kiri) dan 200× (kanan).



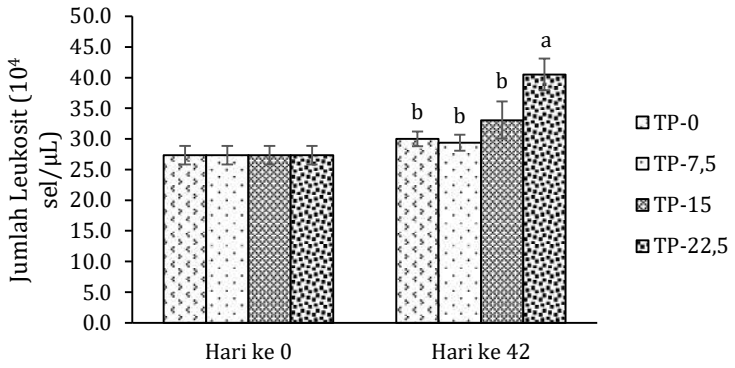
Gambar 4. Usus ikan nila pada perlakuan TP-22,5, tanpa ada kelainan spesifik. (1) Villi mukosa, (2) Tunika muscularis, (3) Haemorrhagi, dan (4) Infiltrasi sel mononuklear. Preparat diamati pada pembesaran 100× (kiri) dan 200× (kanan).

Hasil pengamatan profil darah ikan nila meliputi jumlah eritrosit, leukosit, dan hemoglobin, yang diukur sebelum pemberian pakan uji dan setelah 42 hari pemeliharaan. Nilai awal digunakan sebagai gambaran kondisi fisiologis ikan sebelum perlakuan, sedangkan nilai akhir digunakan untuk mengevaluasi respons ikan terhadap pakan yang mengandung tepung *P. australis*. Jumlah eritrosit ikan nila sebelum perlakuan sebesar 3,46±0,19×10^6 sel/mm^3. Setelah pemberian pakan uji, jumlah eritrosit tertinggi terdapat pada perlakuan TP-15 sebesar 4,18±0,15×10^6 sel/mm^3, kemudian perlakuan TP-7,5 sebesar 3,72±0,08×10^6 sel/mm^3. Perlakuan TP-0 dan TP-22,5 masing-masing menunjukkan jumlah eritrosit sebesar 2,62±0,33×10^6 sel/mm^3 dan 2,51±0,08×10^6 sel/mm^3. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa substitusi tepung kedelai dengan tepung *P. australis* memberikan pengaruh berbeda nyata terhadap jumlah eritrosit ikan nila (Gambar 5).



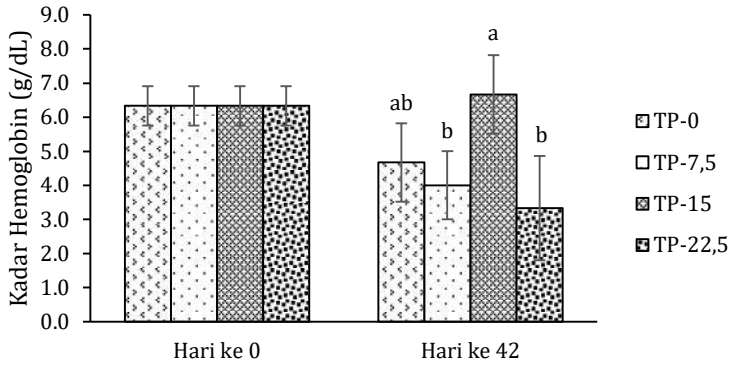
Gambar 5. Jumlah eritrosit ikan nila sebelum dan setelah pemberian pakan perlakuan. Huruf superskrip yang berbeda pada nilai setelah perlakuan menunjukkan perbedaan nyata ($p < 0,05$).

Jumlah leukosit ikan nila sebelum perlakuan adalah 27,34±1,50×10^4 sel/mm^3. Setelah perlakuan, jumlah leukosit tertinggi diperoleh pada perlakuan TP-22,5 sebesar 40,49±2,58×10^4 sel/µL, diikuti perlakuan TP-15 sebesar 33,07±3,01×10^4 sel/mm^3, perlakuan TP-0 sebesar 29,99±1,19×10^4 sel/mm^3, dan perlakuan TP-7,5 sebesar 29,36±1,31×10^4 sel/mm^3. Berdasarkan analisis ragam, variasi tepung *P. australis* dalam pakan memberikan pengaruh berbeda nyata terhadap jumlah leukosit ikan nila (Gambar 6).



Gambar 6. Jumlah leukosit ikan nila sebelum dan setelah pemberian pakan perlakuan. Huruf superskrip yang berbeda pada nilai setelah perlakuan menunjukkan perbedaan nyata ($p < 0,05$).

Kadar hemoglobin ikan nila sebelum perlakuan adalah 6,33±0,58 g/dL. Setelah 42 hari pemeliharaan, kadar hemoglobin tertinggi diperoleh pada perlakuan TP-15 sebesar 6,67±1,15 g/dL, diikuti perlakuan TP-0 sebesar 4,67±1,15 g/dL, perlakuan TP-7,5 sebesar 4,00±1,00 g/dL, dan perlakuan TP-22,5 sebesar 3,33±1,53 g/dL. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa substitusi tepung kedelai dengan tepung *P. australis* memberikan pengaruh berbeda nyata terhadap kadar hemoglobin ikan nila (Gambar 7).



Gambar 7. Kadar hemoglobin ikan nila sebelum dan setelah pemberian pakan perlakuan. Huruf superskrip yang berbeda pada nilai setelah perlakuan menunjukkan perbedaan nyata ($p < 0,05$).

PEMBAHASAN

Pemberian pakan dengan substitusi tepung kedelai oleh tepung *P. australis* menghasilkan respons jaringan dan hematologi yang tidak linier. Perlakuan TP-0 menunjukkan enteritis parasiticus disertai cacing intestinal, infiltrasi sel mononuklear, dan hemoragi; perlakuan TP-7,5 menunjukkan enteritis dengan cacing intestinal dan infiltrasi sel mononuklear; perlakuan TP-15 tidak menunjukkan kelainan spesifik; sedangkan perlakuan TP-22,5 menunjukkan enteritis haemorrhagica dengan hemoragi dan infiltrasi sel mononuklear. Pada profil darah, eritrosit dan hemoglobin tertinggi pada TP-15, sedangkan leukosit tertinggi pada TP-22,5. Pola parameter-spesifik ini menunjukkan bahwa *P. australis* kemungkinan berinteraksi dengan status nutrisi, oksigenasi, imunitas, dan stres metabolik secara berbeda, bukan melalui satu mekanisme tunggal.

Infiltrasi sel mononuklear menunjukkan respons imun seluler, tetapi tidak otomatis berarti perbaikan imunitas. Temuan tersebut harus dibaca bersama integritas vili, epitel, lamina propria, nekrosis, dan deskuamasi. Karena vili mukosa dan tunika muskularis masih dapat dikenali pada seluruh kelompok, bukti yang tersedia lebih mendukung adanya inflamasi

fokal atau multifokal daripada kerusakan transmural. Mukosa usus berfungsi sebagai permukaan absorpsi sekaligus barier imun yang berinteraksi dengan antigen pakan, mikrobiota, dan agen infeksius (Ferreira *et al*., 2023; Zhang *et al*., 2024). Kehadiran cacing pada TP-0 dan TP-7,5 merupakan faktor pengganggu penting karena iritasi mekanis dapat meningkatkan permeabilitas, infiltrasi sel radang, dan perdarahan. Oleh karena itu, enteritis pada kedua jenis perlakuan belum dapat diatribusikan sepenuhnya kepada pakan tanpa data prevalensi, intensitas, dan lokasi parasit.

Pada TP-15 yang tidak menunjukkan kelainan spesifik memberikan indikasi bahwa inklusi sedang mungkin lebih kompatibel dengan jaringan usus pada kondisi penelitian ini. Substitusi tepung kedelai juga mengubah kadar protein, abu, mineral, polisakarida, dan senyawa minor, sehingga efek yang diamati merupakan hasil interaksi formulasi, bukan hanya efek bioaktif *P. australis*. Respons makroalga bersifat bergantung pada spesies ikan, bentuk bahan, tingkat inklusi, dan keseimbangan nutrien; inklusi tinggi dapat menimbulkan adaptasi mukosa atau penurunan pemanfaatan nutrien (Hughes *et al*., 2025; Melchor-Martínez *et al*., 2025; Kong *et al*., 2024).

Makroalga *P. australis* mengandung fucoidan, alginat, karbohidrat struktural, fenolik, florotanin, pigmen, mineral, dan metabolit sekunder yang secara teoritis dapat memengaruhi mukosa, enzim pencernaan, mikrobiota, serta imunitas. Namun, tepung utuh tidak ekuivalen dengan ekstrak atau polisakarida terpurifikasi. Hasil riset lainnya menunjukkan bahwa ekstrak *P. australis* 200–400 mg/kg meningkatkan pertumbuhan, enzim pencernaan, respons imun, dan ekspresi gen integritas usus pada ikan mas (Sheikhzadeh *et al*., 2022). Fucoidan dari *Undaria pinnatifida* meningkatkan sel goblet dan enzim pencernaan pada gibel carp (Cui *et al*., 2019), sedangkan fucoidan pada nila meningkatkan ukuran vili dan limfosit intraepitel (Mahgoub *et al*., 2020). Sebaliknya, asam alginat 5 g/kg tidak mengubah morfologi usus atau mikrobiota nila (Merrifield *et al*., 2011). Perbedaan ini menegaskan bahwa efek makroalga ditentukan oleh identitas molekul, bobot molekul, derajat sulfatasi, kecernaan, matriks pakan, dan dosis efektif.

Kombinasi eritrosit dan hemoglobin menunjukkan respons eritropoietik paling konsisten pada TP-15, dengan eritrosit $4{,}18\pm0{,}15\times10^{6}$ sel/mm^{3} dan hemoglobin 6,67 g/dL. Respons pada TP-15 dapat berkaitan dengan keseimbangan antara kontribusi nutrien kedelai dan komponen fungsional *P. australis*. Inklusi diduga menyediakan senyawa bioaktif tanpa meningkatkan beban abu, serat, atau faktor penghambat kecernaan secara berlebihan. Makroalga umumnya lebih tepat diposisikan sebagai bahan fungsional atau suplemen daripada pengganti langsung sumber protein utama karena kandungan protein dan profil asam aminonya dapat membatasi pemanfaatan ikan (Hughes *et al*., 2025; Melchor-Martínez *et al*., 2025). Dengan demikian, performa eritrositik pada TP-15 tidak boleh dianggap hanya sebagai efek imunostimulator, tetapi juga perlu dikaitkan dengan kualitas formulasi, konsumsi pakan, pertumbuhan, dan kecernaan.

Jumlah leukosit pada angka yang ditampilkan paling tinggi pada TP-22,5, yaitu $40{,}49\pm2{,}58\times10^{4}$ sel/µL. Leukositosis dapat mencerminkan stimulasi imunitas bawaan, tetapi juga inflamasi, infeksi, atau stres. Karena TP-22,5 menunjukkan enteritis haemorrhagica dan infiltrasi sel mononuklear, leukosit tinggi lebih tepat dipandang sebagai sinyal respons terhadap gangguan jaringan sampai tersedia bukti aktivasi protektif. Hubungan histologi dan hematologi ini masih berupa asosiasi karena tidak ada korelasi individual antara skor lesi dan leukosit, diferensial leukosit, atau konfirmasi penyebab hemoragi. Pada TP-0 dan TP-7,5, parasit juga berpotensi memengaruhi leukosit sehingga respons darah tidak dapat dikaitkan sepenuhnya dengan *P. australis*.

Hemoglobin pada TP-15 yang tertinggi mendukung interpretasi bahwa tingkat substitusi tersebut lebih kompatibel dengan transport oksigen. Sebaliknya, hemoglobin rendah pada TP-22,5 dapat berkaitan dengan ketidakseimbangan nutrien atau beban fisiologis lebih besar, tetapi mekanisme tersebut belum dapat dibuktikan. Senyawa fenolik dan tanin dapat bersifat antioksidan serta imunomodulator, namun pada kadar tertentu juga dapat berinteraksi dengan protein atau enzim pencernaan. Karena kadar tanin dan fenolik total pakan belum diukur, penjelasan ini harus diposisikan sebagai hipotesis.

Temuan ini sejalan sebagian dengan studi makroalga pada nila. Ekstrak rumput laut dapat meningkatkan hematologi, imunitas nonspesifik, dan status antioksidan saat ikan menghadapi *Aeromonas hydrophila* (Ashour *et al*., 2020), sementara *Sargassum* membantu menekan stres oksidatif dan imunosupresi pada kepadatan tinggi (Negm *et al*., 2021). Ekstrak *Gracilaria* juga meningkatkan eritrosit dan ekspresi gen penghalang usus saat stres suhu (Siddik *et al*., 2024). Namun, hasil tersebut berasal dari ekstrak atau spesies berbeda sehingga tidak membuktikan bahwa tepung *P. australis* dosis tinggi selalu menguntungkan.

Secara integratif, TP-15 tampak sebagai perlakuan paling seimbang berdasarkan jumlah eritrosit dan hemoglobin tertinggi serta tidak menunjukkan leukositosis setinggi TP-22,5. Perlakuan TP-22,5 memiliki leukosit tertinggi, namun juga eritrosit dan hemoglobin terendah serta enteritis haemorrhagica, sehingga lebih tepat dipandang sebagai sinyal kewaspadaan fisiologis daripada bukti keunggulan imun. Kesimpulan paling defensibel ialah substitusi tepung kedelai dengan *P. australis* memodulasi histologi usus dan darah secara tidak linier, dengan kompatibilitas deskriptif terbaik pada TP-15. Validasi perlu mencakup morfometri vili, skor lesi, pemeriksaan parasit, indeks eritrosit, diferensial leukosit, kortisol, proksimat pakan, dan analisis fenolik/tanin.

KESIMPULAN

Substitusi tepung kedelai dengan tepung *P. australis* menghasilkan respons histologis usus dan hematologis yang tidak linier pada ikan nila. Perlakuan TP-15 (15% tepung *P. australis*) menunjukkan kompatibilitas terbaik, ditandai oleh tidak adanya kelainan spesifik pada jaringan usus serta jumlah eritrosit ($4{,}18 \pm 0{,}15 \times 10^6$ sel/mm^3) dan kadar hemoglobin ($6{,}67 \pm 1{,}15$ g/dL) tertinggi. Sebaliknya, peningkatan inklusi *P. australis* hingga 22,5% menunjukkan indikasi gangguan fisiologis dan histologis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada staff Laboratorium Budidaya, Pembenihan dan Produksi Perikanan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Halu Oleo, atas dukungan fasilitas selama pelaksanaan penelitian. Sebagian data yang dipublikasikan dalam naskah ini merupakan bagian dari skripsi atas nama Sujabarlah. Penelitian ini dilaksanakan dengan menggunakan dana dari tim peneliti tanpa pendanaan khusus dari lembaga pendanaan publik, komersial, atau sektor nirlaba.

DAFTAR PUSTAKA

Abdel-Latif, H. M. R., Dawood, M. A. O., Alagawany, M., Faggio, C., Nowosad, J., & Kucharczyk, D. (2022). Health benefits and potential applications of fucoidan extracted from brown seaweeds in aquaculture: An updated review. *Fish & Shellfish Immunology, 122*, 115–130. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2022.01.039

Ashour, M., Mabrouk, M. M., Ayoub, H. F., El-Feky, M. M. M., Sharawy, Z. Z., Hoseinifar, S. H., Rossi, W., Doan, H. V., El-Haroun, E., & Goda, A. M. A.-S. (2020). Effect of dietary seaweed extract supplementation on growth, feed utilization, hematological indices, and non-specific immunity of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* challenged with *Aeromonas hydrophila*. *Journal of Applied Phycology, 32*, 3467–3479. https://doi.org/10.1007/s10811-020-02178-1

Blaxhall, P. C., & Daisley, K. W. (1973). Routine haematological methods for use with fish blood. *Journal of Fish Biology, 5*(6), 771–781. https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1973.tb04510.x

Cui, H., Wang, Z., Liu, J., Wang, Y., Wang, Z., Fu, J., Wan, Z., Li, R., Li, Q., Fitton, J. H., Liu, Y., & Zhang, M. (2019). Effects of a highly purified fucoidan from *Undaria pinnatifida* on

growth performance and intestine health status of gibel carp *Carassius auratus gibelio*. *Aquaculture Nutrition, 26*, 47–59. https://doi.org/10.1111/anu.12966

Darem, J., Tabarsa, M., You, S., Lee, D.-J., & Yelithao, K. (2024). Insights into structural and molecular variations of alginates and fucoidans isolated from *Padina australis* under different mechanical and enzymatic conditions. *Food and Bioprocess Technology*, *18*, 785–806. https://doi.org/10.1007/s11947-024-03498-7

El-Sayed, A.-F. M., Fagnon, M. S., Hamdan, A. M., Chabrillat, T., Araujo, C., Bouriquet, J., Kerros, S., & Zeid, S. M. S. (2024). Dietary effect of a plant-based mixture (Phyto AquaMeric) on growth performance, biochemical analysis, intestinal histology, gene expression and environmental parameters of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Fishes, 9*(9), 358. https://doi.org/10.3390/fishes9090358

Ferreira, M., Sousa, V., Oliveira, M. B. P. P., Canadas-Sousa, A., Abreu, H., Dias, J. P., Kiron, V., & Valente, L. M. P. (2023). An in-depth characterisation of European seabass intestinal segments for assessing the impact of an algae-based functional diet on intestinal health. *Scientific Reports, 13*, 12054. https://doi.org/10.1038/s41598-023-38826-y

Hughes, A. D., Twigg, G. C., Msuya, F. E., Padmakumar, K. P., & Tocher, D. R. (2025). The use of macroalgae in feeds for finfish aquaculture. *Frontiers in Aquaculture, 4*, 1570842. https://doi.org/10.3389/faquc.2025.1570842

Ikhsan, L., Hamzah, M., & Abidin, L. O. B. (2026). Evaluation of soybean meal substitution with *Padina australis* on growth performance and feed utilization efficiency of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Journal of Fish Health, 6*(3), 413–423. https://doi.org/10.29303/jfh.v6i3.11079

Jaswir, I., Noviendri, D., Salleh, H. M., Taher, M., & Miyashita, K. (2011). Isolation of fucoxanthin and fatty acids analysis of *Padina australis* and cytotoxic effect of fucoxanthin on human lung cancer (H1299) cell lines. *African Journal of Biotechnology, 10*(81), 18855–18862. https://doi.org/10.5897/AJB11.2765

Kong, Q., Yang, Z., Su, Q., Yang, J., Xiao, G., Liu, D., & Tang, H. (2024). Effects of kelp meal (*Laminaria japonica*) on the growth, nutrition, and intestinal health of the largemouth bass (*Micropterus salmoides*). *Aquaculture Reports, 38*, 102525. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102525

Kustantinah, Hidayah, N., Noviandi, C. T., Astuti, A., & Paradhipta, D. H. V. (2022). Nutrients content of four tropical seaweed species from Kelapa Beach, Tuban, Indonesia and their potential as ruminant feed. *Biodiversitas, 23*, 6191–6197. https://doi.org/10.13057/biodiv/d231213

Mahgoub, H. A., El-Adl, M. A. M., Ghanem, H. M., & Martyniuk, C. J. (2020). The effect of fucoidan or potassium permanganate on growth performance, intestinal pathology, and antioxidant status in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Fish Physiology and Biochemistry, 46*, 2109–2131. https://doi.org/10.1007/s10695-020-00858-w

Marmelo, I., Dias, M., Grade, A., Pousão-Ferreira, P., Diniz, M., Marques, A., & Maulvault, A. L. (2024). Immunomodulatory and antioxidant effects of functional aquafeeds biofortified with whole Laminaria digitata in juvenile gilthead seabream (*Sparus aurata*). *Frontiers in Marine Science, 11*, 1325244. https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1325244

Melchor-Martínez, E. M., Reyes, A. G., Peña-Rodríguez, A., Delgado-Cortez, I. G., & Flores-Contreras, E. A. (2025). Utilization of brown algae and pre-treatment strategies as a source of bioactive nutrients for aquaculture species. *Journal of Applied Phycology, 37*(3), 2121–2146. https://doi.org/10.1007/s10811-025-03508-x

Merrifield, D. L., Harper, G. M., Mustafa, S., Carnevali, O., Picchietti, S., & Davies, S. J. (2011). Effect of dietary alginic acid on juvenile tilapia (*Oreochromis niloticus*) intestinal microbial balance, intestinal histology and growth performance. *Cell and Tissue Research, 344*, 135–146. https://doi.org/10.1007/s00441-010-1125-y

Messina, M. C., Bulfon, C., Beraldo, P., Tibaldi, E., & Cardinaletti, G. (2018). Intestinal morpho-physiology and innate immune status of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) in response to diets including a blend of two marine microalgae, *Tisochrysis lutea* and *Tetraselmis suecica*. *Aquaculture, 495*, 290–299. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.09.054

Morais, T., Inácio, A. C., Coutinho, T., Ministro, M., Cotas, J., Pereira, L., & Cruz, M. T. (2020). Seaweed potential in the animal feed: A review. *Journal of Marine Science and Engineering, 8*(8), 559. https://doi.org/10.3390/jmse8080559

Negm, S. S., Ismael, N. E. M., Attia, A. I. A., El Asely, A. M., & Naiel, M. A. E. (2021). The efficiency of dietary Sargassum aquifolium on the performance, innate immune responses, antioxidant activity, and intestinal microbiota of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) raised at high stocking density. *Journal of Applied Phycology, 33*, 4067–4082. https://doi.org/10.1007/s10811-021-02572-3

Refaey, M. M., Mehrim, A. I., Zenhom, O. A., Areda, H. A., Ragaza, J. A., & Hassaan, M. S. (2023). Fresh Azolla, *Azolla pinnata* as a complementary feed for *Oreochromis niloticus*: Growth, digestive enzymes, intestinal morphology, physiological responses, and flesh quality. *Aquaculture Nutrition, 2023*, 1403704. https://doi.org/10.1155/2023/1403704

Roberts, R. J. (2012). Fish pathology (4th ed.). Wiley-Blackwell.

Salosso, Y., Aisiah, S., Lumban Toruan, L. N., & Pasaribu, W. (2020). Nutrient content, active compound and antibacterial activity of *Padina australis* against *Aeromonas hydropilla*. *Pharmacognosy Journal, 12*(4), 771–776. https://doi.org/10.5530/pj.2020.12.110

Sheikhzadeh, N., Ahmadifar, E., Soltani, M., Tayefi-Nasrabadi, H., Mousavi, S., & Naiel, M. A. E. (2022). Brown seaweed (*Padina australis*) extract can promote performance, innate immune responses, digestive enzyme activities, intestinal gene expression and resistance against *Aeromonas hydrophila* in common carp (*Cyprinus carpio*). *Animals, 12*(23), 3389. https://doi.org/10.3390/ani12233389

Siddik, M. A. B., Francis, P., Foysal, M. J., & Francis, D. S. (2024). Dietary seaweed extract mitigates oxidative stress in Nile tilapia by modulating inflammatory response and gut microbiota. *Frontiers in Immunology, 15*, 1471261. https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1471261

Siddik, M. A. B., Francis, P., Rohani, M. F., Azam, M. S., Mock, T. S., & Francis, D. S. (2023). Seaweed and seaweed-based functional metabolites as potential modulators of growth, immune and antioxidant responses, and gut microbiota in fish. *Antioxidants, 12*(12), 2066. https://doi.org/10.3390/antiox12122066

Zhang, B., Yang, H.-L., Cai, G.-H., Nie, Q.-J., & Sun, Y.-Z. (2024). The interactions between the host immunity and intestinal microorganisms in fish. *Applied Microbiology and Biotechnology, 108*, 30. https://doi.org/10.1007/s00253-023-12934-1