

DINAMIKA TROFIK DAN RESPONS JARINGAN MAKANAN BERBASIS PLANKTON TERHADAP PENGAYAAN NUTRIEN DI SELURUH EKOSISTEM PERAIRAN: TINJAUAN SISTEMATIS MENGGUNAKAN PRISMA

(Trophic Dynamics and Plankton-Based Food Web Responses to Nutrient Enrichment Across Aquatic Ecosystems: A Systematic Review Using PRISMA)

Catur Detik Nugroho*, Muhammad Fathan Nur Hakim, Dawam Luthfiyan Fathur Rohman, Reyhan Raffi Haridza Ali, Salwa Indah Agustin

Jurusan Manajemen Sumberdaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Kelautan Universitas Jenderal Soedirman
Corresponding author: detik.nugroho@mhs.unsoed.ac.id*

Received: 22 Agustus 2026, Revised: 10 Oktober 2026, Accepted: 20 Oktober 2026

ABSTRAK: Eutrofikasi merupakan fenomena peningkatan nutrisi yang berdampak luas terhadap struktur dan fungsi ekosistem perairan, terutama melalui perubahan dinamika trofik dan jaringan makanan berbasis plankton. Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji respons plankton terhadap pengayaan nutrisi, sebagian besar masih dilakukan secara parsial dan belum mengintegrasikan perbandingan lintas ekosistem. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dinamika trofik dan struktur *food web* berbasis plankton sebagai respons terhadap eutrofikasi, membandingkan pola respons antarekosistem marine, coastal, dan estuarine, serta mengidentifikasi kesenjangan penelitian yang masih ada. Metode yang digunakan adalah Tinjauan Literatur Sistematis (Systematic Literature Review/SLR) dengan pendekatan PRISMA melalui pencarian di database Scopus menggunakan kombinasi kata kunci berbasis Boolean, serta seleksi artikel berdasarkan kriteria inklusi yang telah ditetapkan. Hasil analisis menunjukkan bahwa pengayaan nutrisi meningkatkan produktivitas primer, namun tidak selalu diikuti oleh peningkatan efisiensi transfer energi ke tingkat trofik yang lebih tinggi akibat dominasi spesies oportunistik dan peran jalur mikroba dalam menjebak energi. Secara komparatif, respons antarekosistem menunjukkan pola yang berbeda, di mana ekosistem laut cenderung terbatas oleh nutrisi, ekosistem pesisir lebih responsif namun rentan tidak stabil, dan ekosistem estuari bersifat fluktuatif akibat variabilitas lingkungan. Selain itu, kajian ini mengidentifikasi adanya kesenjangan penelitian berupa dominasi pendekatan parsial, keterbatasan data jangka panjang, serta kurangnya integrasi lintas ekosistem dan pemodelan trofik. Dengan demikian, diperlukan pendekatan penelitian yang lebih integratif dan komparatif untuk meningkatkan pemahaman mengenai dinamika trofik dan jaringan makanan berbasis plankton dalam konteks eutrofikasi serta mendukung pengelolaan ekosistem perairan yang berkelanjutan.

Kata Kunci: Eutrofikasi, dinamika trofik, *food web plankton*, pengayaan nutrisi, ekosistem pesisir

ABSTRACT: Eutrophication is a phenomenon characterized by increased nutrient levels that has far-reaching impacts on the structure and function of aquatic ecosystems, particularly



through changes in trophic dynamics and plankton-based food webs. Although various studies have examined plankton responses to nutrient enrichment, most remain fragmented and have not yet integrated cross-ecosystem comparisons. Therefore, this study aims to analyze trophic dynamics and plankton-based food web structure in response to eutrophication, compare response patterns across marine, coastal, and estuarine ecosystems, and identify existing research gaps. The method used was a Systematic Literature Review (SLR) following the PRISMA guidelines, involving a search of the Scopus database using a combination of Boolean-based keywords, as well as article selection based on predefined inclusion criteria. Analysis results indicate that nutrient enrichment increases primary productivity; however, this is not always accompanied by an increase in energy transfer efficiency to higher trophic levels due to the dominance of opportunistic species and the role of microbial pathways in trapping energy. Comparatively, responses across ecosystems exhibit distinct patterns, where marine ecosystems tend to be nutrient-limited, coastal ecosystems are more responsive yet prone to instability, and estuarine ecosystems are fluctuating due to environmental variability. Furthermore, this study identifies research gaps, including a predominance of fragmented approaches, a lack of long-term data, and insufficient cross-ecosystem integration and trophic modelling. Consequently, a more integrative and comparative research approach is needed to enhance understanding of trophic dynamics and plankton-based food webs in the context of eutrophication and to support the sustainable management of aquatic ecosystems.

Keywords: Eutrophication, trophic dynamics, plankton food web, nutrient enrichment, coastal ecosystems

PENDAHULUAN

Eutrofikasi merupakan permasalahan ekologis berupa peningkatan kesuburan perairan akibat pengayaan nutrisi, terutama nitrogen (N) dan fosfor (P), yang berasal dari aktivitas antropogenik, seperti pembuangan limbah domestik, limpasan pertanian, dan kegiatan industri. Masukan nutrisi dari daratan dapat mencapai perairan melalui aliran sungai, limpasan permukaan, dan saluran pembuangan, sehingga memengaruhi kondisi ekosistem pesisir, estuari, dan laut. Pengayaan nutrisi dapat mendorong pertumbuhan alga dan fitoplankton secara berlebihan (*algal blooms*), terutama ketika ketersediaan nutrisi menjadi faktor pembatas pertumbuhan. Selanjutnya, kematian dan penguraian biomassa alga meningkatkan konsumsi oksigen dalam proses dekomposisi, yang dapat menyebabkan penurunan oksigen terlarut (*dissolved oxygen* atau DO) dan memicu hipoksia sehingga mengganggu keseimbangan ekosistem perairan (Akinawo, 2023; Hasan et al., 2023). Permasalahan tersebut dapat diperparah oleh meningkatnya beban limbah yang tidak diolah secara memadai, sehingga menurunkan kualitas lingkungan perairan dan mengancam keberlanjutan sumber daya akuatik

(Sadilla & Prarikeslan, 2025). Perubahan kondisi perairan akibat tekanan antropogenik juga dapat tercermin melalui perubahan komunitas organisme benthik, termasuk meiofauna yang berpotensi digunakan sebagai bioindikator kondisi ekosistem (Yusal & Hasyim, 2022). Dengan demikian, eutrofikasi tidak hanya berkaitan dengan peningkatan ketersediaan nutrisi, tetapi juga dengan perubahan kondisi fisik, kimia, dan biologis perairan yang berpotensi memengaruhi fungsi ekosistem secara keseluruhan.

Dampak eutrofikasi terhadap ekosistem perairan berkaitan erat dengan perubahan komunitas plankton, terutama fitoplankton sebagai produsen primer. Pengayaan nutrisi dapat meningkatkan pertumbuhan dan akumulasi biomassa fitoplankton apabila ketersediaan unsur hara sebelumnya membatasi pertumbuhannya. Namun, biomassa (Samudra et al., 2024) fitoplankton perlu dibedakan dari produktivitas primer karena biomassa menunjukkan jumlah materi fitoplankton yang terdapat pada waktu tertentu, sedangkan produktivitas primer menggambarkan laju pembentukan bahan organik melalui fotosintesis per satuan waktu. Oleh karena itu, peningkatan biomassa tidak

selalu menunjukkan peningkatan produktivitas primer yang sebanding karena proses fotosintesis juga dipengaruhi oleh ketersediaan cahaya, suhu, dan kondisi lingkungan lainnya. Dalam kondisi tertentu, pengayaan nutrisi yang berlebihan dapat memicu *harmful algal blooms* (HABs), meningkatkan akumulasi bahan organik, dan berkontribusi terhadap penurunan oksigen terlarut serta terbentuknya zona hipoksia yang mengancam organisme akuatik (Wang, 2024). Proses dekomposisi bahan organik juga dapat meningkatkan konsentrasi CO₂ terlarut dan berkontribusi terhadap penurunan pH perairan, sehingga menambah tekanan ekologis ketika hipoksia dan pengasaman terjadi secara bersamaan (Kessouri et al., 2021). Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan kematian organisme, degradasi habitat penting seperti padang lamun dan terumbu karang, serta penurunan fungsi dan layanan ekosistem perairan (Laoli et al., 2026).

Fitoplankton sebagai produsen primer, menyediakan bahan organik yang menjadi dasar aliran energi dalam jaringan makanan (*food web*) perairan, sedangkan zooplankton berperan sebagai konsumen yang menghubungkan produksi fitoplankton dengan tingkat trofik yang lebih tinggi. Perubahan kelimpahan, komposisi, dan karakteristik fitoplankton akibat pengayaan nutrisi dapat memicu efek *bottom-up*, yaitu perubahan pada tingkat trofik rendah yang memengaruhi organisme pada tingkat trofik berikutnya. Meskipun demikian, peningkatan biomassa fitoplankton tidak selalu diikuti oleh peningkatan efisiensi transfer energi karena kelompok fitoplankton yang mendominasi belum tentu dapat dimanfaatkan secara optimal oleh zooplankton. Ketidaksesuaian antara ketersediaan produsen dan kebutuhan konsumen dapat menimbulkan *trophic mismatch* atau membatasi penyaluran energi menuju tingkat trofik yang lebih tinggi ketika organisme dominan sulit dikonsumsi secara efektif (Rahmah et al., 2022). Dinamika tersebut menjadi semakin kompleks pada ekosistem tropis yang memiliki variasi musim, kondisi hidrologi, dan masukan nutrisi dari daratan yang beragam (Guilderson et al., 2024). Oleh karena itu, dampak eutrofikasi perlu dipahami tidak

hanya berdasarkan perubahan biomassa plankton, tetapi juga melalui perubahan hubungan trofik dan efisiensi aliran energi dalam jaringan makanan.

Perubahan struktur jaringan makanan akibat eutrofikasi memiliki implikasi terhadap produktivitas perikanan dan keberlanjutan pemanfaatan sumber daya perairan. Peningkatan biomassa fitoplankton tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan produksi ikan karena perubahan komposisi komunitas plankton dapat memengaruhi ketersediaan serta kualitas makanan bagi organisme pada tingkat trofik yang lebih tinggi (Rahmadya et al., 2024). Dominasi kelompok fitoplankton yang kurang sesuai sebagai sumber makanan bagi zooplankton berpotensi membatasi transfer energi ke tingkat trofik berikutnya. Selain itu, perubahan ukuran dan kandungan nutrisi plankton dapat memengaruhi kualitas sumber makanan dan efisiensi pemanfaatan energi oleh konsumen, yang selanjutnya berpotensi memengaruhi struktur komunitas ikan dan stabilitas hasil perikanan (Yanti et al., 2024). Hubungan tersebut menunjukkan bahwa respons ekosistem terhadap pengayaan nutrisi tidak cukup dievaluasi hanya berdasarkan peningkatan kelimpahan atau biomassa fitoplankton, tetapi juga perlu mempertimbangkan perubahan komposisi komunitas, interaksi trofik, dan proses transfer energi yang menentukan keberlanjutan fungsi ekosistem.

Respons plankton terhadap pengayaan nutrisi dapat berbeda antarekosistem karena setiap sistem perairan memiliki karakteristik lingkungan yang berbeda. Ekosistem laut, pesisir, dan estuari memiliki variasi hidrodinamika, salinitas, kedalaman, pencampuran kolom air, serta pola masukan nutrisi yang dapat memengaruhi distribusi dan dinamika komunitas plankton. Secara spasial, perbedaan kondisi lokal dapat menghasilkan variasi kelimpahan, biomassa, komposisi, dan dominansi plankton antarlokasi. Sementara itu, secara temporal, perubahan musim, suhu, intensitas cahaya, dan dinamika pencampuran kolom air dapat memengaruhi ketersediaan nutrisi serta perkembangan komunitas plankton (Nurmalitasari & Sudarsono, 2023; Reis et al.,

2025). Oleh karena itu, pengaruh pengayaan nutrisi perlu dianalisis dengan mempertimbangkan konteks lingkungan tempat penelitian dilakukan. Dalam tinjauan sistematis ini, informasi mengenai lokasi dan tipe ekosistem, musim atau periode pengamatan, konsentrasi nutrisi, kondisi lingkungan, serta metode penelitian akan diekstraksi dari studi primer apabila tersedia. Informasi tersebut kemudian dibandingkan untuk mengidentifikasi pola respons konsisten serta perbedaan dinamika trofik dan jaringan makanan antarekosistem. Pengurangan masukan nutrisi melalui pembatasan limpasan pertanian dan pengolahan limbah domestik, disertai pendekatan berbasis ekosistem seperti restorasi lahan basah dan mangrove, dapat membantu menekan beban nutrisi yang masuk ke perairan (Ulpa et al., 2025; Nan et al., 2023). Namun, pemulihan ekosistem yang telah mengalami eutrofikasi berat tidak selalu berlangsung cepat karena perubahan kondisi lingkungan dan struktur komunitas dapat bertahan setelah tekanan nutrisi berkurang (Nurfadilah & Lukman, 2020).

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji eutrofikasi, perubahan komunitas plankton, dan dampaknya terhadap ekosistem perairan, hasil penelitian tersebut masih tersebar pada beragam tipe ekosistem, lokasi, dan pendekatan metodologis. Sebagian penelitian berfokus pada kejadian HABs, perubahan kualitas air, atau respons komunitas plankton secara individual, sehingga hubungan antara pengayaan nutrisi, dinamika trofik, struktur jaringan makanan, dan efisiensi transfer energi belum selalu dianalisis secara terintegrasi. Kajian mengenai HABs di Indonesia juga menunjukkan pentingnya pengembangan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai fenomena tersebut dalam konteks ekosistem perairan yang berbeda (Sidabutar et al., 2024). Selain itu, variasi hidrodinamika, salinitas, masukan nutrisi, dan kondisi lingkungan antarekosistem dapat menghasilkan respons plankton yang berbeda, sehingga temuan dari satu sistem perairan tidak selalu dapat digeneralisasikan ke sistem lainnya. Perbedaan lokasi dan periode pengamatan, parameter yang diukur, serta penggunaan metode observasi lapangan, eksperimen, dan pemodelan juga menyulitkan perbandingan hasil penelitian.

Kondisi tersebut menunjukkan perlunya sintesis yang tidak hanya merangkum temuan individual, tetapi juga membandingkan hasil penelitian untuk memahami pola umum, variasi respons, dan faktor lingkungan yang berkaitan dengan dinamika trofik akibat pengayaan nutrisi.

Berdasarkan permasalahan tersebut, kesenjangan penelitian (*research gap*) terletak pada masih terbatasnya sintesis komparatif yang mengintegrasikan respons plankton, dinamika trofik, struktur jaringan makanan, dan efisiensi transfer energi akibat pengayaan nutrisi pada ekosistem laut, pesisir, dan estuari. Keterbatasan integrasi hasil penelitian lintas ekosistem menyulitkan identifikasi pola respons yang konsisten, penjelasan mengenai faktor lingkungan yang berkontribusi terhadap perbedaan respons, serta pemahaman mengenai perubahan hubungan trofik pada kondisi pengayaan nutrisi yang berbeda. Oleh karena itu, diperlukan tinjauan literatur sistematis (*Systematic Literature Review* atau SLR) untuk mengumpulkan, mengevaluasi, dan membandingkan bukti ilmiah secara terstruktur. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis dinamika trofik dan struktur jaringan makanan berbasis plankton sebagai respons terhadap eutrofikasi dan pengayaan nutrisi pada ekosistem laut, pesisir, dan estuari; (2) membandingkan respons tersebut untuk mengidentifikasi pola umum dan perbedaan antarekosistem dengan mempertimbangkan karakteristik lingkungan serta variasi spasial dan temporal yang dilaporkan; dan (3) mengidentifikasi kesenjangan penelitian yang berkaitan dengan pendekatan metodologis, ketersediaan data, serta keterbatasan sintesis lintas ekosistem. Hasil kajian ini diharapkan memberikan pemahaman yang lebih terintegrasi mengenai hubungan antara pengayaan nutrisi, dinamika trofik, dan jaringan makanan berbasis plankton, sekaligus menjadi landasan bagi pengembangan penelitian lanjutan dan pengelolaan ekosistem perairan yang berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah tinjauan literatur sistematis dengan

pendekatan PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Pendekatan ini digunakan untuk mengidentifikasi, menyeleksi, serta mensintesis berbagai hasil penelitian empiris secara sistematis dan komprehensif (Page et al., 2021). Penelitian ini menggunakan database Scopus sebagai sumber utama literatur karena memiliki cakupan jurnal ilmiah bereputasi yang luas dan terindeks secara internasional. Teknik pengambilan artikel dilakukan melalui pencarian literatur menggunakan kombinasi kata kunci yang disusun dalam bentuk rumus Boolean untuk memperoleh hasil yang relevan pada judul, abstrak, dan kata kunci (Booth et al., 2021). Rumus Boolean yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Kriteria inklusi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu: (1) artikel diterbitkan dalam rentang tahun 2016–2026; (2) artikel berupa *research article*; (3) ditulis dalam Bahasa Inggris; (4) tersedia secara *open access*; dan (5) relevan dengan topik dinamika trofik, plankton, serta eutrofikasi pada ekosistem laut, pesisir, dan estuari. Artikel yang tidak memenuhi kriteria inklusi, seperti buku, prosiding, artikel nonilmiah, serta penelitian yang berfokus pada ekosistem perairan tawar (danau, sungai) dan akuakultur, atau tidak memiliki keterkaitan langsung dengan variabel penelitian, dikeluarkan dari analisis. Tahapan seleksi artikel mengikuti

alur PRISMA (Gambar 1) yang meliputi identifikasi, *screening*, *eligibility*, dan *inclusion*, sehingga artikel yang diperoleh benar-benar sesuai dengan tujuan penelitian serta dianalisis secara kualitatif untuk mengidentifikasi pola, hubungan, dan kesenjangan penelitian terkait dinamika trofik dan respons ekosistem terhadap peningkatan nutrien.

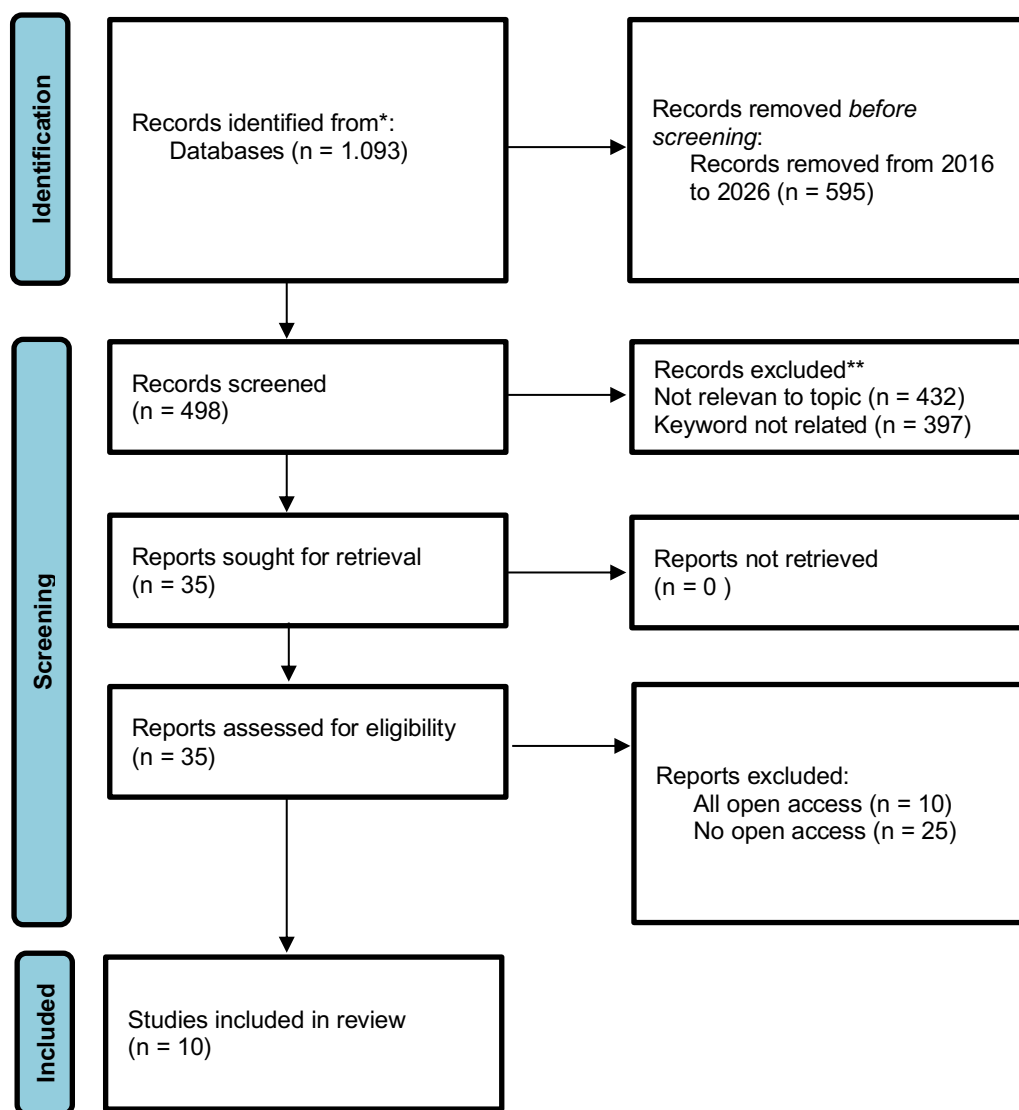
HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik dan Distribusi Studi

Berdasarkan hasil seleksi PRISMA, tujuh studi yang dianalisis mencakup berbagai ekosistem perairan mulai dari laut terbuka, pesisir, hingga estuari, dengan fokus utama pada dinamika plankton, pengayaan nutrien, serta implikasi terhadap sistem trofik. Secara umum, sebagian besar studi berfokus pada respons plankton terhadap faktor lingkungan, sementara hanya satu studi yang secara eksplisit mengkaji struktur jaringan makanan berbasis plankton melalui pendekatan pemodelan (Di Pane et al., 2024). Sebagaimana dirangkum pada Tabel 2, variasi lokasi dan pendekatan penelitian menunjukkan bahwa dinamika plankton merupakan fokus utama dalam kajian ekosistem perairan, sementara integrasi ke dalam analisis trofik dan jaringan makanan masih terbatas.

Tabel 1. Rumus Boolean Penelitian

Keywords	Explanation
("trophic dynamics" OR "food web") AND	Frasa ini digunakan untuk mengidentifikasi penelitian yang membahas dinamika trofik dan struktur jaringan makanan dalam ekosistem perairan, termasuk aliran energi antar tingkat trofik.
(plankton OR phytoplankton) AND	Frasa ini bertujuan untuk memfokuskan pencarian pada organisme plankton, khususnya fitoplankton sebagai produsen primer dalam ekosistem perairan.
(eutrophication OR nutrient) AND	Frasa ini digunakan untuk menjaring penelitian yang berkaitan dengan peningkatan nutrien dan proses eutrofikasi yang mempengaruhi struktur dan fungsi ekosistem.
(coastal OR marine OR estuary) AND	Frasa ini digunakan untuk membatasi pencarian pada ekosistem laut, pesisir, dan estuary.
NOT ("freshwater lake" OR river OR aquaculture)	Frasa ini digunakan untuk mengecualikan penelitian yang berfokus pada ekosistem perairan tawar seperti danau, sungai, serta sistem akuakultur agar hasil pencarian lebih spesifik pada ekosistem laut dan pesisir.



Gambar 1. Identifikasi dan skrining artikel

Tabel 2. Karakteristik dan Cakupan Studi Terpilih

No	Penulis (Tahun)	Lokasi	Ekosistem	Variabel Utama	Fokus
1	Taylor et al. (2025)	Global	Laut	Nutrien	Ikan (trofik atas)
2	Holland et al. (2023)	NE Atlantic	Laut	Plankton	Tren
3	Holland et al. (2024)	NE Atlantic	Laut	Plankton	Variabilitas
4	Reis et al. (2025)	Brazil	Shelf	Plankton	Distribusi
5	Cabrerizo et al. (2022)	Marine	Laut	Fosfor	Plankton
6	Di Pane et al. (2024)	Coastal	Laut	Nutrien	Food web
7	Stumpner et al. (2020)	Estuari	Tawar	Nutrien	Fitoplankton

Respons Plankton terhadap Pengayaan Nutrien

Pengayaan nutrisi, terutama fosfor, terbukti menjadi faktor utama yang memicu peningkatan biomassa plankton, khususnya pada

kelompok mikroba plankton (Cabrerizo et al., 2022). Namun demikian, respons plankton tidak selalu bersifat linear, karena pada beberapa kondisi justru terjadi penurunan kelimpahan plankton yang dipengaruhi oleh faktor

lingkungan lain seperti perubahan suhu dan dinamika perairan (Holland et al., 2023).

Selain itu, distribusi plankton juga menunjukkan variasi spasial yang signifikan sepanjang gradien lingkungan (Reis et al., 2025), sementara pada ekosistem estuari, perubahan nutrisi lebih banyak memengaruhi struktur komunitas dibandingkan dengan biomassa total (Stumpner et al., 2020). Sejalan dengan hal tersebut, pengayaan nutrisi skala dekadal (jangka panjang) di estuari dalam terbukti secara signifikan mengubah interaksi mikrop plankton, yang pada akhirnya memicu munculnya stresor ekosistem terkait eutrofikasi (Safi et al., 2022). Pola ini menunjukkan bahwa respons plankton terhadap nutrisi bersifat kompleks dan kontekstual (Tabel 3). Hasil dan pembahasan harus menjelaskan tentang temuan penelitian yang dapat disajikan dalam bentuk teks/tabel/gambar, serta keterkaitan penelitian dan implikasinya dalam bidang manajemen sumberdaya perairan (Lesmana et al., 2022).

Respons plankton terhadap pengayaan nutrisi bukan hubungan linear sederhana, melainkan hasil interaksi antara ketersediaan sumber daya dan kondisi lingkungan yang dinamis. Penambahan nitrogen dan fosfor dapat meningkatkan pertumbuhan fitoplankton bila unsur tersebut menjadi faktor pembatas. Namun, biomassa (jumlah materi fitoplankton pada waktu tertentu) berbeda dari produktivitas primer (laju pembentukan bahan organik melalui fotosintesis per satuan waktu), sehingga kenaikan biomassa tidak selalu sebanding dengan kenaikan produktivitas karena fotosintesis juga dipengaruhi cahaya, suhu, nutrisi lain, serta pencampuran dan stratifikasi kolom air (Dokulil & Qian, 2021; Arfina, 2025). Pengayaan berlebihan dapat memicu eutrofikasi dan mengubah struktur komunitas karena tiap kelompok plankton merespons secara berbeda

(Stumpner et al., 2020). Spesies tertentu yang mampu memanfaatkan kondisi kaya nutrisi dapat mendominasi sehingga keanekaragaman berpotensi menurun (Olli et al., 2023). Dengan demikian, peningkatan nutrisi tidak selalu menguntungkan dan dapat mengubah struktur komunitas serta mengganggu keseimbangan ekosistem dalam jangka panjang.

Komunitas plankton memiliki implikasi yang lebih mendalam terhadap fungsi ekosistem, terutama dalam kaitannya dengan efisiensi aliran energi dan struktur trofik. Variasi kualitas biokimia antar jenis plankton, seperti kandungan lipid, protein, dan rasio C:N:P, sehingga menyebabkan dominansi spesies tertentu dapat secara langsung memengaruhi efisiensi transfer energi menuju tingkat trofik yang lebih tinggi (Laoli et al., 2026). Penelitian oleh Spilling et al (2023) menjelaskan bahwa peningkatan biomassa tidak selalu diikuti oleh meningkatnya energi yang tersedia bagi konsumen, karena dominasi spesies berukuran kecil atau berkualitas nutrisi rendah justru dapat menurunkan kualitas energi yang ditransfer sehingga efisiensi aliran energi ke tingkat trofik berikutnya menjadi melemah. Pola ini sejalan dengan temuan pada berbagai sistem laut yang menunjukkan bahwa perubahan struktur komunitas lebih berperan dalam menentukan dinamika ekosistem dibandingkan sekadar peningkatan total biomassa (Holland et al., 2023). Tingginya produktivitas primer tidak secara otomatis mencerminkan tingginya produktivitas sekunder, karena kualitas sumber energi menjadi faktor pembatas utama dalam proses transfer energi. Oleh karena itu, kualitas plankton menjadi faktor kunci dalam menentukan efektivitas aliran energi serta keberlanjutan fungsi ekosistem secara keseluruhan (Nurmalitasari & Sudarsono, 2023; Mustakim et al., 2026).

Tabel 3. Sintesis respons plankton terhadap pengayaan nutrisi

Penulis (Tahun)	Kondisi Nutrien	Respons Plankton	Pola
Cabrerizo et al. (2022)	Fosfor tinggi	Biomassa meningkat	Bloom
Stumpner et al. (2020)	Fluktuatif	Komunitas berubah	Adaptif
Reis et al. (2025)	Gradien	Distribusi bervariasi	Spasial
Holland et al. (2023)	Tidak stabil	Penurunan plankton	Non-linear

Variabilitas spasial dan temporal berperan penting dalam menentukan respons plankton terhadap nutrisi karena distribusi dan dinamika plankton dipengaruhi oleh heterogenitas lingkungan. Secara spasial, variasi konsentrasi nutrisi, arus, kedalaman, dan ketersediaan cahaya menyebabkan sebaran plankton tidak merata, sedangkan secara temporal, perubahan musim memengaruhi respons plankton melalui fluktuasi suhu, intensitas cahaya, dan pencampuran kolom air (Nurmalitasari & Sudarsono, 2023). Interaksi antara berbagai faktor tersebut menghasilkan dinamika yang kompleks, sulit diprediksi, dan sangat kontekstual, sehingga pendekatan yang hanya berfokus pada satu variabel tidak mampu menangkap keseluruhan kompleksitas sistem secara utuh (Reis et al., 2025). Pengayaan nutrisi di perairan pesisir tidak hanya merombak rasio ketersediaan hara, tetapi juga memicu pergeseran strategi ekologi komunitas plankton dari *K-strategist* menjadi *r-strategist*. Sebagaimana dijelaskan oleh Papanikolopoulou et al. (2018), kondisi eutrofik memicu seleksi terhadap spesies oportunistik berukuran relatif kecil dengan laju pertumbuhan cepat dan reproduksi tinggi (*r-strategist*), sehingga mendominasi struktur komunitas dibandingkan dengan spesies berukuran besar yang tumbuh lebih lambat (*K-strategist*). Dominansi plankton berukuran mikro dan piko ini secara langsung memperkuat *microbial loop*, mengingat tingginya laju eksudasi Bahan Organik Terlarut (*Dissolved Organic Matter*/DOM) dari sel-sel berukuran kecil tersebut yang memicu ledakan populasi bakteri heterotrof. Akibatnya, alur energi primer yang seharusnya disalurkan melalui rantai makanan klasik secara langsung ke konsumen tingkat atas justru terperangkap dalam siklus daur ulang mikroba yang melintasi jenjang trofik bertingkat, mulai dari bakteri, flagellata heterotrof, hingga ciliata. Sejalan dengan temuan

Di Pane et al. (2024), bertambahnya tingkatan trofik mikro ini memperbesar disipasi energi akibat respirasi seluler pada setiap tingkatan, sehingga menciptakan efek leher botol trofik (*trophic bottleneck*) yang menekan efisiensi transfer energi ke konsumen puncak serta mengubah dinamika pompa karbon biologis di perairan. Pergeseran ini berimplikasi pada perubahan stabilitas komunitas dan efisiensi aliran energi, sehingga memperkuat pentingnya mempertimbangkan aspek spasial, temporal, dan strategi hidup organisme dalam analisis ekosistem perairan.

Dinamika Trofik dalam Sistem Perairan

Peningkatan produktivitas primer akibat pengayaan nutrisi berimplikasi langsung terhadap dinamika trofik melalui mekanisme bottom-up control. Cabrerizo et al. (2022) menunjukkan bahwa peningkatan nutrisi meningkatkan produksi pada tingkat produsen, namun tidak selalu diikuti oleh peningkatan efisiensi transfer energi ke tingkat trofik yang lebih tinggi. Sebagian besar energi justru terakumulasi dalam *microbial loop*, sehingga mengurangi aliran energi menuju konsumen tingkat atas. Kondisi ini diperkuat oleh eutrofikasi, karena peningkatan nutrisi di perairan memperbesar dominasi jalur mikroba dalam mendaur ulang energi dan materi organik (Karpowicz et al., 2020;Yogaswara, 2020). Tekanan trofik ini semakin nyata ketika interaksi mikrop plankton yang merespons pengayaan nutrisi jangka panjang turut memperburuk kondisi lingkungan seperti hipoksia, sehingga efisiensi rantai makanan menuju konsumen puncak semakin terhambat (Safi et al., 2022). Hal ini didukung oleh Taylor et al. (2025) yang menunjukkan bahwa perubahan nutrisi dapat berdampak pada ikan sebagai konsumen puncak, meskipun hubungan tersebut tidak selalu langsung (Tabel 4).

Tabel 4. Sintesis dampak trofik dan implikasi ekologis

Penulis (Tahun)	Dampak Utama	Level Trofik	Implikasi
Cabrerizo et al. (2022)	Eutrofikasi	Produsen	Overgrowth
Di Pane et al. (2024)	Microbial loop	Mikroba	Energi terjebak
Taylor et al. (2025)	Dampak ikan	Konsumen	Perikanan terganggu
Stumpner et al. (2020)	Perubahan komunitas	Produsen	Instabilitas

Cutrim et al. (2026) menunjukkan bahwa pengayaan nutrisi menjadi penggerak utama dinamika trofik melalui mekanisme *bottom-up control*, yaitu peningkatan sumberdaya pada produsen primer dapat memicu perubahan pada tingkat trofik di atasnya. Namun, efektivitas proses ini ditentukan oleh efisiensi transfer energi antar tingkat trofik. Energi dari produsen primer menurun signifikan pada setiap perpindahan tingkat trofik karena digunakan untuk metabolisme, respirasi, pertumbuhan, dan aktivitas biologis lainnya, sehingga hanya sebagian kecil yang diteruskan ke konsumen tingkat lebih tinggi (Mehner et al., 2022; Armengol et al., 2019). Keterbatasan struktural yang inheren ini tidak dapat diatasi hanya dengan menambah nutrisi. Efisiensi transfer juga dipengaruhi oleh kualitas sumber energi dan struktur komunitas dalam jaringan makanan, sehingga peningkatan nutrisi tidak selalu meningkatkan produktivitas tingkat trofik yang lebih tinggi (Cabrerizo et al., 2022).

Perubahan komposisi plankton sebagai produsen primer memengaruhi kualitas energi yang ditransfer, karena setiap jenis plankton berbeda dalam karakteristik biokimia dan ukuran (Aliviyanti et al., 2025). Konsumen bergantung tidak hanya pada jumlah makanan, tetapi juga pada kualitasnya, yaitu ukuran partikel, kandungan nutrisi, serta kemudahan dicerna dan diasimilasi. Muhtadi et al. (2020) menjelaskan bahwa ketidaksesuaian antara kebutuhan konsumen dan karakteristik plankton, baik ukuran maupun nutrisi, menurunkan efisiensi pemanfaatan energi dan memicu *decoupling*, yaitu kondisi ketika peningkatan produksi primer tidak diikuti peningkatan produksi pada tingkat trofik yang lebih tinggi. Fenomena ini juga ditemukan di berbagai sistem pesisir akibat perubahan struktur komunitas plankton yang kurang mendukung kebutuhan konsumen (Di Pane et al., 2024).

Selain itu, pergeseran komunitas produsen primer memicu pemanjangan jalur trofik (*trophic lengthening*). Dominasi produsen tertentu, seperti sianobakteri berfilamen atau kelompok *r-strategist*, memperpanjang jalur transfer energi dan mengganggu jaringan makanan pelagis (Steinkopf et al., 2024). Pemanjangan ini

meningkatkan disipasi energi melalui respirasi mikroba sehingga memperkuat efek leher botol trofik (*trophic bottleneck*) yang membatasi transfer energi ke konsumen tingkat atas (Di Pane et al., 2024). Dengan demikian, hubungan antar tingkat trofik bersifat kompleks dan tidak linier, dipengaruhi oleh banyak faktor yang saling berinteraksi dalam ekosistem.

Proses lain yang memperumit dinamika trofik adalah keberadaan jalur alternatif dalam aliran energi, seperti detritus dan komunitas mikroba, yang berperan penting dalam mendaur ulang bahan organik dan menjaga keberlanjutan siklus nutrisi, namun pada saat yang sama dapat mengalihkan sebagian energi dari rantai makanan utama sehingga mengurangi ketersediaan energi bagi konsumen tingkat atas (Takarina et al., 2019). Selain itu, interaksi *top-down* seperti predasi juga berperan dalam memodifikasi respons sistem terhadap perubahan nutrisi, misalnya melalui pengendalian populasi herbivora atau perubahan tekanan pada tingkat trofik tertentu. Penelitian Damar et al (2020) menjelaskan bahwa kombinasi antara kontrol *bottom-up* dan *top-down* menghasilkan dinamika trofik yang kompleks dan tidak linier, di mana peningkatan nutrisi tidak selalu diikuti oleh peningkatan efisiensi sistem secara keseluruhan akibat adanya interaksi antar tingkat trofik yang saling memengaruhi aliran energi dalam ekosistem. Kondisi ini menunjukkan bahwa distribusi energi dalam ekosistem tidak hanya ditentukan oleh ketersediaan sumber daya, tetapi juga oleh struktur interaksi biotik yang terjadi di dalamnya (Jayaramaiah et al., 2024). Oleh karena itu, analisis trofik perlu dilakukan secara menyeluruh dengan mempertimbangkan seluruh jalur aliran energi dan interaksi antar komponen ekosistem agar diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif.

Respons Jaringan Makanan Berbasis Plankton

Dominasi jalur mikroba akibat pengayaan nutrisi memberikan implikasi signifikan terhadap efisiensi transfer energi trofik. Sebagaimana ditunjukkan oleh Di Pane et al. (2024), peningkatan masukan nutrisi memperkuat struktur *microbial loop* yang

melibatkan jenjang trofik bertingkat melalui bakteri, flagellata heterotrof, ciliata, hingga mesozooplankton, berbeda dari rantai makanan klasik yang memiliki alur pendek dari diatom menuju kopepoda dan ikan. Penambahan jejaring trofik mikro ini memperbesar disipasi energi melalui respirasi pada setiap tingkatan, sehingga menciptakan efek leher botol trofik (*trophic bottleneck*). Temuan Di Pane et al. (2024), tersebut menjelaskan mengapa peningkatan produktivitas primer di perairan pesisir tidak secara linier meningkatkan biomassa konsumen tingkat tinggi, melainkan justru meningkatkan laju respirasi sistemik yang berpotensi memicu kondisi hipoksia serta menurunkan efisiensi ekspor karbon ke sedimen dalam, yang menyebabkan penyederhanaan struktur jaringan makanan dan penurunan kompleksitas interaksi trofik (Tabel 5).

Selain itu, peningkatan biomassa plankton tidak selalu meningkatkan produktivitas trofik secara keseluruhan, karena energi yang dihasilkan cenderung terperangkap dalam jalur mikroba, merujuk pada disipasi energi metabolisme yang tinggi akibat bertambahnya jenjang trofik mikro dari bakteri heterotrof, flagellata, hingga ciliata. Tingginya laju respirasi pada setiap tingkatan mikroba menyebabkan sebagian besar energi primer terkonversi kembali menjadi karbon dioksida dan panas, sehingga hanya sebagian kecil energi yang berhasil ditransfer ke tingkatan trofik yang lebih tinggi seperti zooplankton besar dan ikan (Di Pane et al., 2024). Hal ini menunjukkan adanya ketidakefisienan dalam transfer energi, yang berdampak pada organisme tingkat trofik yang lebih tinggi.

Perubahan dalam jaringan makanan mencerminkan konsekuensi sistemik dari dinamika plankton dan trofik yang terjadi akibat pengayaan nutrisi. Menurut penelitian

(Handayani et al., 2026) menjelaskan bahwa jaringan makanan tidak hanya menggambarkan hubungan antar organisme, tetapi juga merepresentasikan aliran energi dan materi dalam ekosistem. Peningkatan konsentrasi nutrisi di perairan diketahui mampu mengubah distribusi energi dalam jaringan makanan secara signifikan, yang tercermin dari terjadinya pergeseran jalur aliran energi dari rantai makanan berbasis detritus menuju rantai berbasis fitoplankton atau sebaliknya, serta perubahan efisiensi dan intensitas transfer energi antar tingkat trofik akibat meningkatnya produktivitas primer dan respons organisme pada berbagai level trofik (Canning dan Death, 2021; Kelly dan Schallenberg, 2019). Perubahan tersebut tidak hanya berdampak pada komposisi komunitas, tetapi juga memengaruhi stabilitas dan fungsi ekosistem secara keseluruhan, termasuk potensi terjadinya ketidakseimbangan trofik. Hal ini sejalan dengan penelitian Canning & Death, (2021) menunjukkan bahwa peningkatan nutrisi secara signifikan mengubah dinamika trofik dengan mengubah komposisi komunitas, meningkatkan respirasi komunitas, dan melemahkan kaskade trofik sehingga struktur dan stabilitas jaring makanan menjadi lebih rentan terhadap gangguan lingkungan. Oleh karena itu, struktur jaringan makanan menjadi indikator penting yang dapat digunakan untuk mengevaluasi perubahan fungsi, ketahanan, dan stabilitas ekosistem perairan (Di Pane et al., 2024). Peningkatan nutrisi dalam jumlah besar juga dapat menyebabkan proliferasi makroalga, fitoplankton dan epifit yang dapat menyebabkan perubahan struktur produsen primer dan mengubah kontribusi sumber karbon organik bagi ikan dan invertebrata sehingga memengaruhi struktur trofik dalam hubungan antar organisme berdasarkan proses makan dan aliran energi dalam ekosistem (Cui et al., 2021).

Tabel 5. Sintesis perubahan struktur jaringan makanan

Penulis (Tahun)	Nutrien	Respons Plankton	Dampak Trofik	Food Web
Cabrerizo et al. (2022)	↑ P	Biomassa ↑	Energi ↑	sederhana
Di Pane et al. (2024)	↑ Nutrien	Mikroba ↑	Transfer ↓	microbial loop
Taylor et al. (2025)	↑ Nutrien	–	Konsumen terdampak	terganggu

Keterangan: Simbol ↑ menunjukkan peningkatan, ↓ menunjukkan penurunan, dan – menunjukkan data tidak tersedia

Peningkatan nutrisi didominasi oleh jalur mikroba yang tidak hanya mengubah arah aliran energi, tetapi juga memodifikasi struktur interaksi trofik melalui berkurangnya keterhubungan antar tingkat trofik yang lebih tinggi, yang pada akhirnya mengarah pada penyederhanaan struktur jaringan makanan. Pola tersebut umumnya dikaitkan dengan peningkatan tekanan nutrisi, khususnya pada sistem perairan laut terbuka, di mana proses daur ulang internal menjadi lebih dominan dibandingkan dengan transfer energi ke konsumen tingkat atas (Cabrerizo et al., 2022). Penyederhanaan ini menunjukkan bahwa peningkatan ketersediaan energi dalam ekosistem tidak selalu diikuti oleh peningkatan kompleksitas jaringan makanan, melainkan dapat menghasilkan sistem yang lebih sederhana namun kurang efisien dalam mentransfer energi ke tingkat trofik yang lebih tinggi. Hal ini sejalan dengan penelitian Steinkopf et al. (2024), yang mengatakan bahwa ledakan populasi sianobakteri berfilamen dapat mengubah aliran energi dalam jaringan makanan yang ada di perairan. Perubahan tersebut terjadi ketika zooplankton yang pada awalnya memakan fitoplankton mulai beralih memakan mikrozooplankton. Menyebabkan posisi trofik zooplankton meningkat dan rantai makanan menjadi lebih panjang. Kondisi tersebut dapat mengurangi efisiensi energi menuju konsumen tingkat tinggi seperti ikan, karena energi harus melewati lebih banyak tingkat trofik sebelum mencapai konsumen tersebut.

Penyederhanaan struktur jaringan makanan memiliki implikasi yang signifikan terhadap stabilitas ekosistem, karena sistem dengan tingkat kompleksitas yang lebih rendah umumnya menunjukkan resiliensi yang lebih lemah terhadap berbagai gangguan lingkungan

serta memiliki kemampuan pemulihan yang terbatas setelah terjadi tekanan (Taylor et al., 2025; Canning dan Death, 2021). Kondisi ini juga meningkatkan kerentanan ekosistem terhadap fluktuasi populasi dan perubahan kondisi lingkungan, akibat berkurangnya jalur alternatif dalam aliran energi dan interaksi trofik yang dapat menopang kestabilan sistem. Dalam jangka panjang, perubahan tersebut berpotensi memengaruhi keberlanjutan fungsi ekosistem secara keseluruhan, termasuk menurunnya produktivitas perikanan yang sangat bergantung pada efisiensi transfer energi antar tingkat trofik (Handayani et al., 2026). Lebih lanjut, perubahan dalam struktur jaringan makanan mencerminkan adanya proses reorganisasi internal ekosistem sebagai bentuk respons adaptif terhadap tekanan lingkungan, seperti peningkatan nutrisi atau perubahan kondisi fisikokimia perairan. Menurut Tjenemundan et al. (2025) menjelaskan analisis jaringan makanan perlu dilakukan secara komprehensif dan terintegrasi untuk memahami dinamika ekosistem secara menyeluruh serta merumuskan strategi pengelolaan yang tepat.

Variasi Metodologi dan Implikasi Analisis

Pendekatan metodologi yang digunakan dalam studi-studi tersebut bervariasi, mulai dari observasi lapangan hingga pemodelan jaringan (Tabel 6). Di Pane et al. (2024) menggunakan pendekatan pemodelan yang memungkinkan analisis interaksi trofik secara lebih komprehensif dibandingkan dengan metode observasional yang digunakan pada studi lainnya. Perbedaan metodologi ini memengaruhi kedalaman analisis, di mana studi berbasis model cenderung memberikan gambaran lebih detail mengenai aliran energi dan struktur jaringan makanan.

Tabel 6. Perbandingan pendekatan metodologi dalam studi

Penulis (Tahun)	Metode	Kelebihan	Keterbatasan
Pane et al. (2024)	Model jaringan	detail trofik	kompleks
Cabrerizo et al. (2022)	Eksperimen	kontrol nutrisi	terbatas
Holland et al. (2023)	Time-series	tren jangka panjang	variabel luar
Reis et al. (2025)	Spatial	distribusi	tidak trofik

Al Tanto et al. (2018) menjelaskan bahwa variasi metodologi dalam studi ekologi perairan menentukan hasil dan arah interpretasi penelitian, karena setiap metode memiliki pendekatan dan tingkat ketelitian yang berbeda. Metode observasional menggambarkan kondisi alami ekosistem secara langsung di lapangan, tetapi terbatas dalam mengidentifikasi hubungan sebab-akibat karena banyak variabel tidak terkendali. Pendekatan eksperimental menguji hipotesis secara terkontrol melalui manipulasi variabel sehingga hubungan kausal lebih jelas dan terukur, namun kurang merepresentasikan kompleksitas lingkungan alami (Canning & Death, 2021; Kelly & Schallenberg, 2019). Pemodelan menawarkan kerangka yang lebih integratif untuk memahami interaksi trofik dan aliran energi, tetapi akurasi bergantung pada asumsi dan kualitas data, sementara perbedaan skala analisis dapat memengaruhi interpretasi. Eddy et al. (2021) menegaskan bahwa tidak ada satu metode pun yang mampu menjelaskan seluruh dinamika ekosistem. Karena itu, pendekatan integratif yang menggabungkan observasi, eksperimen, dan pemodelan diperlukan untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif terhadap sistem ekologi dan interaksi kompleksnya (Sari & Saputra, 2025).

Integrasi Dinamika Trofik pada Berbagai Ekosistem Perairan

Dinamika trofik dan respons jaringan makanan berbasis plankton terhadap pengayaan nutrisi menunjukkan variasi yang signifikan ketika ditinjau pada skala lintas ekosistem, khususnya antara laut terbuka, pesisir, dan estuari/perairan tawar. Pada ekosistem laut terbuka, ketersediaan nutrisi umumnya menjadi faktor pembatas utama sehingga setiap peningkatan nutrisi dapat memicu respons yang relatif jelas pada tingkat produsen primer (Cabrerizo et al., 2022). Namun, keterbatasan tersebut juga menyebabkan sistem cenderung memiliki aliran energi yang lebih sederhana dan efisiensi transfer yang terbatas. Kondisi ini membuat peningkatan produktivitas pada tingkat plankton tidak selalu diikuti oleh peningkatan pada tingkat trofik yang lebih tinggi. Selain itu, rendahnya kompleksitas komunitas dalam beberapa kondisi dapat membatasi jalur alternatif

dalam aliran energi. Menurut Chen et al (2021), stratifikasi vertikal yang mengontrol rasio nutrisi di laut terbuka menyebabkan sistem menjadi kurang responsif terhadap perubahan tambahan ketersediaan nutrisi, sehingga menunjukkan karakter respons yang lebih terkontrol namun relatif kurang fleksibel terhadap dinamika lingkungan.

Ekosistem pesisir memiliki produktivitas lebih tinggi dan menerima input nutrisi daratan yang lebih besar, sehingga respons plankton terhadap pengayaan nutrisi cenderung lebih cepat dan intensif (Reis et al., 2025). Peningkatan nutrisi di sistem ini sering mengubah komposisi komunitas plankton secara signifikan, termasuk dominasi spesies oportunistik yang dapat mengarah pada kondisi eutrofik (Stumpner et al., 2020). Kondisi tersebut tidak hanya memengaruhi produsen, tetapi juga distribusi energi dan keseimbangan aliran energi antar tingkat trofik. Sistem pesisir juga lebih rentan terhadap perubahan struktur jaringan makanan akibat tingginya tekanan lingkungan (Di Pane et al., 2024). Variabilitas input nutrisi membuat sistem lebih dinamis, tetapi kurang stabil dalam jangka panjang. Peningkatan produktivitas berkorelasi dengan meningkatnya kerentanan terhadap gangguan, sehingga tingginya aliran energi tidak otomatis mencerminkan stabilitas sistem (Ávila-Thieme et al., 2021).

Pada ekosistem estuari dan perairan tawar, dinamika trofik lebih fluktuatif karena tingginya variabilitas lingkungan dan interaksi antara faktor darat dan laut. Input nutrisi yang episodik serta perubahan salinitas dan aliran air membuat respons plankton sangat dinamis (Evita et al., 2021). Variasi ini menimbulkan ketidakpastian pola distribusi energi dan ketidakstabilan struktur trofik serta jaringan makanan, yang sering berubah dalam waktu relatif singkat (Holland et al., 2024). Dominasi jalur mikroba juga memperkuat siklus energi pada tingkat trofik rendah sehingga mengurangi efisiensi transfer energi ke tingkat yang lebih tinggi (Holland et al., 2024). Perbandingan antar ekosistem menunjukkan bahwa respons terhadap pengayaan nutrisi tidak universal, melainkan bergantung pada karakteristik lingkungan, sehingga integrasi lintas ekosistem diperlukan

untuk pemahaman yang lebih komprehensif (Rahmadya et al., 2024).

Sintesis tinjauan lintas ekosistem menunjukkan bahwa pengayaan nutrisi secara konsisten meningkatkan produktivitas primer, tetapi menurunkan efisiensi transfer energi ke tingkat trofik yang lebih tinggi akibat dominasi microbial loop dan pergeseran komunitas plankton menuju spesies oportunistik. Secara komparatif, ekosistem laut terbuka merespons langsung pada tingkat produsen primer, namun struktur trofiknya rentan karena keterbatasan nutrisi alami. Ekosistem pesisir menunjukkan respons eutrofikasi tercepat dan paling dinamis, tetapi berisiko mengalami penyederhanaan jaringan makanan dan instabilitas jangka panjang. Ekosistem estuari memperlihatkan dinamika trofik paling kompleks dan fluktuatif akibat kuatnya variabilitas input dari darat dan laut. Dengan demikian, dampak pengayaan nutrisi tidak sebatas ledakan populasi plankton (algal blooms), tetapi secara fundamental merombak struktur, stabilitas, dan efisiensi aliran energi jaringan makanan pada berbagai tipe ekosistem perairan (Rahmadya et al., 2024).

Selain itu, perbedaan pendekatan metodologis, yaitu observasi lapangan, eksperimen, dan pemodelan, menghasilkan interpretasi yang belum terintegrasi. Keterbatasan data jangka panjang dan kurangnya standar pengukuran antar studi juga menyulitkan perbandingan hasil secara konsisten. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan sintesis yang lebih terintegrasi untuk menjembatani kesenjangan tersebut dan meningkatkan pemahaman dinamika trofik berbasis plankton dalam berbagai konteks ekosistem perairan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa dinamika trofik dan struktur jaringan makanan berbasis plankton sebagai respons terhadap eutrofikasi dan pengayaan nutrisi merupakan proses yang kompleks dan tidak linier, dipengaruhi oleh interaksi antara ketersediaan nutrisi, struktur komunitas, dan kondisi fisik-kimia perairan. Respons antarekosistem berbeda: ekosistem laut dapat mengalami keterbatasan

nutrien, ekosistem pesisir responsif terhadap masukan nutrisi tetapi rentan terhadap ketidakstabilan ekologis, dan ekosistem estuari dipengaruhi oleh fluktuasi lingkungan. Peningkatan biomassa fitoplankton dan produktivitas primer juga tidak selalu diikuti oleh peningkatan efisiensi transfer energi ke tingkat trofik yang lebih tinggi.

Kajian ini mengidentifikasi kesenjangan penelitian, yaitu terbatasnya integrasi analisis komunitas plankton dengan struktur jaringan makanan, minimnya data pengamatan jangka panjang, serta belum optimalnya pendekatan komparatif lintas ekosistem dan pemodelan trofik. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan pendekatan integratif yang menggabungkan data jangka panjang, analisis komunitas plankton, dan pemodelan jaringan makanan. Tinjauan sistematis berikutnya dapat mengombinasikan beberapa basis data, seperti Scopus dan Web of Science (WoS), dengan strategi pencarian terstruktur, kriteria inklusi dan eksklusi yang konsisten, serta penghapusan artikel duplikat agar seleksi literatur transparan dan dapat direplikasi. Dengan demikian, sintesis lintas ekosistem yang lebih komprehensif dapat memperkuat dasar ilmiah bagi pengelolaan ekosistem perairan yang adaptif dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Akinawo, S. O. (2023). Eutrophication: Causes, Consequences, Physical, Chemical and Biological Techniques for Mitigation Strategies. *Environmental Challenges*, 12, 100733.
- Al Tanto, T., HR, N. N., & Ilham, I. (2018). Kualitas Air Laut Untuk Mendukung Wisata Bahari Dan Kehidupan Biota Laut (Studi Kasus: Sekitar Kapal Tenggelam Sophie Rickmers, Perairan Prialat Sabang). *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 11(2), 173–183.
- Aliviyanti, D., Akhidah, Y., & Asadi, M. A. (2025). Dinamika Faktor Oseanografi dan Struktur Komunitas Plankton di Perairan Selat Sempu, Malang, Indonesia. *Journal of Fisheries and Marine Research*, 9(3), 1–12.
- Arfina, S. (2025). Analisis Produktivitas Primer

- Perairan di Teluk Jakarta. *JKP-Jurnal Kelautan Dan Pesisir*, 2(2), 209–216.
- Armengol, L., Calbet, A., Franchy, G., Rodríguez-Santos, A., & Hernández-León, S. (2019). Planktonic Food Web Structure and Trophic Transfer Efficiency along a Productivity Gradient in the Tropical and Subtropical Atlantic Ocean. *Scientific Reports*, 9(2044), 1–19. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38507-9>
- Ávila-Thieme, M. I., Corcoran, D., Pérez-Matus, A., Wieters, E. A., Navarrete, S. A., Marquet, P. A., & Valdovinos, F. S. (2021). Alteration of Coastal Productivity and Artisanal Fisheries Interact to Affect a Marine Food Web. *Scientific Reports*, 11(1), 1765.
- Booth, A., Martyn-St James, M., Clowes, M., & Sutton, A. (2021). *Systematic Approaches to a Successful Literature Review*. SAGE Publications Ltd.
- Cabrerizo, M. J., Medina-Sánchez, J. M., González-Olalla, J. M., Sánchez-Gómez, D., & Carrillo, P. (2022). Microbial Plankton Responses to Multiple Environmental Drivers in Marine Ecosystems with Different Phosphorus Limitation Degrees. *Science of The Total Environment*, 816, 151491.
- Canning, A. D., & Death, R. G. (2021). The Influence of Nutrient Enrichment on Riverine Food Web Function and Stability. *Ecology and Evolution*, 11(2), 942–954.
- Chen, Z., Sun, J., Gu, T., Zhang, G., & Wei, Y. (2021). Nutrient Ratios Driven by Vertical Stratification Regulate Phytoplankton Community Structure in the Oligotrophic Western Pacific Ocean. *Ocean Science*, 17(6), 1775–1789.
- Cui, L., Jiang, Z., Huang, X., Chen, Q., Wu, Y., Liu, S., Li, J., & Macreadie, P. I. (2021). Eutrophication Reduces Seagrass Contribution to Coastal Food Webs. *Ecosphere*, 12(6), e03626.
- Cutrim, M. V. J., Nunes, Y. B. S., Sá, A. K. D. dos S., Cruz, Q. S. da, Azevedo-Cutrim, A. C. G. de, & Furtado, J. A. (2026). Seasonal Bottom-up and Top-down Control of Plankton in a Hypereutrophic Macrotidal Lagoon on Brazil's Equatorial Coast. *Environmental Monitoring and Assessment*, 198(4), 321.
- Damar, A., Colijn, F., Hesse, K., & Kurniawan, F. (2020). Coastal Phytoplankton Pigments Composition in Three Tropical Estuaries of Indonesia. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5), 311.
- Di Pane, J., Bourdaud, P., Horn, S., Moreno, H. D., & Meunier, C. L. (2024). Global Change Alters Coastal Plankton Food Webs by Promoting the Microbial Loop: An Inverse Modelling and Network Analysis Approach on a Mesocosm Experiment. *Science of the Total Environment*, 921, 171272.
- Dokulil, M. T., & Qian, K. (2021). Photosynthesis, Carbon Acquisition and Primary Productivity of Phytoplankton: A Review Dedicated to Colin Reynolds. *Hydrobiologia*, 848(1), 77–94.
- Eddy, T. D., Bernhardt, J. R., Blanchard, J. L., Cheung, W. W. L., Colléter, M., Du Pontavice, H., Fulton, E. A., Gascuel, D., Kearney, K. A., & Petrik, C. M. (2021). Energy Flow Through Marine Ecosystems: Confronting Transfer Efficiency. *Trends in Ecology & Evolution*, 36(1), 76–86.
- Evita, I. N. M., Hariyati, R., & Hidayat, J. W. (2021). Kelimpahan dan Keanekaragaman Plankton Sebagai Bioindikator Kualitas Air di Perairan Pantai Sayung Kabupaten Demak Jawa Tengah. *Bioma: Berkala Ilmiah Biologi*, 23(1), 25–32.
- Guilderson, T. ., Glynn, D. ., & McCarthy, M. . (2024). Tropical Decadal Variability in Nutrient Supply and Phytoplankton Community in the Central Equatorial Pacific During the Late Holocene. *Scientific Reports*, 14(1), 4161.
- Handayani, L. D., Rahayu, I. D., & L, A. S. W. (2026). Sistematis Literatur Review: Dampak Perubahan Komunitas Organisme Terhadap Ketahanan Jaring-Jaring Makanan Laut. *Jurnal Ruaya: Jurnal Penelitian dan Kajian Ilmu Perikanan dan Kelautan*, 14(01), 53–59.
- Hasan, B. M. R., Islam, M. S., Kundu, P., & Mallick, U. K. (2023). Modeling the Effects of Algal Bloom on Dissolved Oxygen in Eutrophic Water Bodies. *Journal of Mathematics*, 2023(1), 2335570.
- Holland, M. M., Atkinson, A., Best, M., Bresnan, E., Devlin, M., Goberville, E., Hélaouët, P., Machairopoulou, M., Faith, M., & Thompson, M. S. A. (2024). Predictors of Long-term Variability in NE Atlantic Plankton Communities. *Science of the Total Environment*, 952, 175793.
- Holland, M. M., Louchart, A., Artigas, L. F., Ostle, C., Atkinson, A., Rombouts, I., Graves, C. A., Devlin, M., Heyden, B., & Machairopoulou, M. (2023). Major Declines in NE Atlantic Plankton Contrast with More Stable Populations in the rapidly warming North Sea. *Science of the Total Environment*, 898,

- 165505.
- Jayaramaiah, R. H., Egidi, E., Macdonald, C. A., & Singh, B. K. (2024). Linking Biodiversity and Biotic Interactions to Ecosystem Functioning. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, 3(3), e12119.
- Karpowicz, M., Zieliński, P., Grabowska, M., Ejsmont-Karabin, J., Kozłowska, J., & Feniova, I. (2020). Effect of Eutrophication and Humification on Nutrient Cycles and Transfer Efficiency of Matter in Freshwater Food Webs. *Hydrobiologia*, 847(11), 2521–2540.
- Kelly, D. J., & Schallenberg, M. (2019). Assessing Food Web Structure in Relation to Nutrient Enrichment, Macrophyte Collapse and Lake Resilience in Shallow Lowland Lakes. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 53(4), 603–619.
- Kessouri, F., McWilliams, J. C., Bianchi, D., Sutula, M., Renault, L., Deutsch, C., Feely, R. A., McLaughlin, K., Ho, M., & Howard, E. M. (2021). Coastal Eutrophication Drives Acidification, Oxygen Loss, and Ecosystem Change in a Major Oceanic Upwelling System. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(21), e2018856118.
- Laoli, D., Telaumbanua, B. V., Zebua, R. D., Dawolo, J., & Zebua, N. (2026). Studi Kelimpahan Fitoplankton Dan Zooplankton Di Perairan Nou, Kota Gunungsitoli, Sumatera Utara. *Jurnal Ruaya: Jurnal Penelitian dan Kajian Ilmu Perikanan dan Kelautan*, 14(01).
- Lesmana, L. J. A., Widigdo, B., Krisanti, M., & Adrianto, L. (2022). Kesesuaian Budidaya Lobster Sistem Keramba Jaring Apung di Teluk Jor, Lombok Timur, Nusa Tenggara Barat. *Journal of Aquatic and Fisheries Sciences*, 1(2), 49–57. <https://doi.org/10.32734/jafs.v1i2.8854>
- Mehner, T., Attermeyer, K., Brauns, M., Brothers, S., Hilt, S., Scharnweber, K., Dorst, R. M., Vanni, M. J., & Gaedke, U. (2022). Trophic Transfer Efficiency in Lakes. *Ecosystems*, 25(8), 1628–1652. <https://doi.org/10.1007/s10021-022-00776-3>
- Muhtadi, A., Pulungan, A., Nurmayyah, Fadlhin, A., Melati, P., Sinaga, R. Z., Uliya, R., Rizki, M., Rohim, N., Ifanda, D., Leidonald, R., Wahyuningsih, H., & Hasani, Q. (2020). The Dynamics of the Plankton Community on Lake Siombak, a Tropical Tidal Lake in North Sumatra, Indonesia. *BIODIVERSITAS*, 21(8), 3707–3719. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d210838>
- Mustakim, M., Abdunnur, A., Rafi'i, A., & Novia, R. (2026). Struktur Komunitas Plankton di Perairan Kota Bangun. *Saintek Perikanan: Indonesian Journal of Fisheries Science and Technology*, 22(1), 9–18.
- Nan, X., Lavrić, S., Mancuso, G., & Toscano, A. (2023). Effects of Design and Operational Conditions on the Performance of Constructed Wetlands for Agricultural Pollution Control–Critical Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(7), 434.
- Nurfadilah, N., & Lukman, M. (2020). Kelimpahan Jenis Plankton di Perairan Muara Sungai Pangkep Sulawesi Selatan. *Manfish Journal*, 1(2), 58–62.
- Nurmalitasari, M., & Sudarsono. (2023). Keanekaragaman Plankton dan Tingkat Produktivitas Primer Antara Dua Musim di Perairan Kabupaten Bantul. *Kingdom (The Journal of Biological Studies)*, 9(1), 16–34.
- Olli, K., Nyman, E., & Tamminen, T. (2023). Half-Century Trends in Alpha and Beta Diversity of Phytoplankton Summer Communities in the Helsinki Archipelago, the Baltic Sea. *Journal of Plankton Research*, 45(1), 146–162.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M. A. H., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 Statement: an Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews. *Bmj*, 372, 1–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Papanikolopoulou, L. A., Smeti, E., Roelke, D. L., Dimitrakopoulos, P. G., Kokkoris, G. D., Danielidis, D. B., & Spatharis, S. (2018). Interplay Between r- and K-strategists Leads to Phytoplankton Underyielding Under Pulsed Resource Supply. *Oecologia*, 186(September), 755–764.
- Rahmadya, A., Rohaningsih, D., Novianti, R., Waluyo, A., & Aisyah, S. (2024). Plankton Community Structure in the Estuaries of Banten Bay, Banten Province, Indonesia. *LIMNOTEK Perairan Darat Tropis di Indonesia*, 30(2), 69–83.
- Rahmah, N., Zulfikar, A., & Apriadi, T. (2022). Kelimpahan Fitoplankton dan Kaitannya

- dengan Beberapa Parameter Lingkungan Perairan di Estuari Sei Carang, Tanjungpinang. *Journal of Marine Research*, 11(2), 189–200.
- Reis, C., Nunes, L., Matos, T., Chust, G., Coutinho, R., Mariani, P., Scherer, M., & Fernandes, L. (2025). Mapping Marine Plankton Abundance Along Ecological Gradients in the South Brazilian Shelf. *Marine Environmental Research*, 212, 107494. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2025.107494>
- Sadilla, F., & Prarikeslan, W. (2025). Analisis Dampak Sampah Domestik terhadap Lingkungan Perairan Pesisir dan Kesehatan. *Jurnal Sehat Mandiri*, 20(1), 80–90.
- Safi, K., Zeldis, J., Tait, L., Robinson, K., Gall, M., & Thompson, K. (2022). Microplankton Interactions with Decadal-Scale Nutrient Enrichment in a Deep Wstuary, with Implications for Eutrophication—Related Ecosystem Stressors. *Estuaries and Coasts*, 45(8), 2472–2491.
- Samudra, S. R., Islami, S. F., Sanjayasari, D., Firdaus, A. M., Putri, A. K., Fikriyya, N., & Attaqi, A. N. (2024). Phytoplankton Community Structure in PB. Soedirman Reservoir, Banjarnegara District, Central Java, Indonesia. *Biodiversitas: Journal of Biological Diversity*, 25(5), 2161–2169. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d250534>
- Sari, R., & Saputra, A. (2025). Model Literasi Ekologi Integratif Berbasis Komunitas untuk Mahasiswa Calon Guru Biologi: Desain, Implementasi, dan Evaluasi. *Insight of Biology*, 1(3), 69–74.
- Sidabutar, T., Srimariana, E. S., Cappenberg, H., & Wouthuyzen, S. (2024). Comprehensive Analysis of Harmful Algal Blooms in Indonesia: from Occurrence to Impact. *BIO Web of Conferences*, 87, 2003.
- Spilling, K., Mart'ın, M. A. S., Granlund, M., Schulz, K. G., Spisla, C., Vanharanta, M., Goldenberg, S. U., & Riebesell, U. (2023). Microzooplankton Communities and Their Grazing of Phytoplankton Under Artificial Upwelling in the Oligotrophic Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1286899.
- Steinkopf, M., Krumme, U., Schulz-Bull, D., Wodarg, D., & Loick-Wilde, N. (2024). Trophic Lengthening Triggered by Filamentous, N₂-fixing cyanobacteria Disrupts Pelagic but not Benthic Food Webs in a Large Estuarine Ecosystem. *Ecology and Evolution*, 14(2), e11048.
- Stumpner, E. B., Bergamaschi, B. A., Kraus, T. E. C., Parker, A. E., Wilkerson, F. P., Downing, B. D., Dugdale, R. C., Murrell, M. C., Carpenter, K. D., & Orlando, J. L. (2020). Spatial Variability of Phytoplankton in a Shallow Tidal Freshwater System Reveals Complex Controls on Abundance and Community Structure. *Science of the Total Environment*, 700, 134392.
- Takarina, N. D., Nurliansyah, W., & Wardhana, W. (2019). Relationship Between Environmental Parameters and the Plankton Community of the Batuhideung Fishing Grounds, Pandeglang, Banten, Indonesia. *BIODIVERSITAS*, 20(1), 171–180. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d200120>
- Taylor, V. F., Buckman, K. L., Chen, C. Y., & Kraft, J. (2025). Geographic and Ecological Drivers of Contaminants and Nutrients in Commercial Fish Species. *Science of The Total Environment*, 986, 179786.
- Tjenemundan, D., Ruagadi, H., Yakobus, I. K., Ngguna, Y., Tobondo, Y., & Tudjuka, S. (2025). Analisis Kualitatif Ekosistem dan Interaksi Timbal Balik Makhluk Hidup di Kabupaten Poso: Kajian Pustaka Menuju Formulasi Kebijakan Lingkungan Berbasis Green Ecology. *Pandelo'e*, 5(1), 74–84.
- Ulpa, M., Ihsan, M., & Suprayogi, D. (2025). Analisis Keanekaragaman dan Kelimpahan Fitoplankton di Sungai Rawas, Sumatra Selatan. *Biosel Biology Science and Education*, 14(1), 22–36.
- Wang, W. (2024). Eutrophication Mechanisms and Their Impacts on Coastal Marine Ecosystems. *International Journal of Marine Science*, 14.
- Yanti, Efrina, Apriadi, T., & Zulfikar, A. (2024). Keanekaragaman Fitoplankton dan Kaitannya Dengan Kondisi Perairan di Senggarang Besar, Kota Tanjungpinang, Kepulauan Riau. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 17(1), 55–64.
- Yogaswara, D. (2020). Distribusi dan Siklus Nutrient di Perairan Estuari serta Pengendaliannya. *Oseana*, 45(1), 28–39.
- Yusal, M. S., & Hasyim, A. (2022). Kajian Kualitas Air Berdasarkan Keanekaragaman Meiofauna dan Parameter Fisika-Kimia di Pesisir Losari, Makassar. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(1), 45–57. <https://doi.org/10.14710/jil.20.1.45-57>