

Studi Hubungan Kelimpahan Fitoplankton dan Ketersediaan Nutrien pada Tambak di Kampung Pegat Batumbuk, Kalimantan Timur Menggunakan *Generalized Poisson Regression*

Meliana Harliani¹, Nurfadilah¹, dan Dewi Embong Bulan^{1*}

¹Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia; e-mail: dewi.embong@fpik.unmul.ac.id

ABSTRAK

Fitoplankton merupakan organisme pertama yang terpengaruh oleh perubahan di perairan karena sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan seperti pencemaran. Pencemaran air dan peningkatan nutrien dari limbah tambak dapat memengaruhi pertumbuhan fitoplankton, yang berdampak pada kualitas air. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan kelimpahan fitoplankton dengan ketersediaan nutrien di dalam tambak, dan memprediksi jumlah fitoplankton per kelas terhadap peningkatan nutrien menggunakan pendekatan *Generalized Poisson Regression* (GPR). Data dikumpulkan pada bulan Januari-Februari 2023 di Tambak Kampung Pegat Batumbuk, Berau pada tiga lokasi penelitian yaitu tambak terbengkalai, tambak tradisional dan perairan mangrove, masing-masing lokasi terdiri dari tiga stasiun penelitian. Analisis data dilakukan menggunakan *Rstudio* versi 2023.2.1 dengan paket VGAM, car, ggplot2, dan MASS. Hasil GPR menunjukkan bahwa konsentrasi nitrat secara signifikan berkorelasi positif dengan peningkatan kelimpahan fitoplankton, terutama pada kelas Bacillariophyceae. Kenaikan konsentrasi nitrat sebesar 1 mg/L diperkirakan akan meningkatkan kelimpahan Bacillariophyceae sebesar 4,58 atau setara dengan 97.154 sel/L di tambak terbengkalai, 2,41 atau setara dengan 1.114 sel/L di tambak tradisional, dan 5,59 atau setara dengan 267.896 sel/L di perairan mangrove. Studi ini mengindikasikan bahwa nitrat merupakan nutrien pembatas utama pertumbuhan fitoplankton di perairan tambak Pegat Batumbuk, Berau. Hasil penelitian ini dapat menjadi rujukan dalam pengelolaan tambak yang berkelanjutan.

Kata kunci: Fitoplankton, Nitrat, Fosfat, Tambak, *Generalized Poisson Regression*

ABSTRACT

Phytoplankton are the first organisms to be affected by changes in water because they are susceptible to pollution. Water pollution and increased nutrients from pond effluents can affect phytoplankton growth, which impacts water quality. This study aims to analyze the relationship between phytoplankton and nutrient availability and predict the number of phytoplankton per class against increasing nutrients using the Generalized Poisson Regression (GPR) approach. Data were collected in January-February 2023 at the Pegat Batumbuk Village Pond, Berau, at three research stations, namely abandoned ponds, traditional ponds, and mangrove waters, each consisting of three research stations. Data analysis was conducted using RStudio version 2023.2.1 with VGAM, car, ggplot2, and MASS packages. GPR results showed that nitrate concentration was significantly positively correlated with increased phytoplankton abundance, especially in the Bacillariophyceae class. A 1 mg/L increase in nitrate concentration is expected to increase Bacillariophyceae abundance by 4.58, or equivalent to 97,154 cells/L in abandoned ponds, 2.41, or equivalent to 1,114 cells/L in traditional ponds, and 5.59, or equivalent to 267,896 cells/L in mangrove waters. This indicates nitrate is the main limiting nutrient for phytoplankton growth in Pegat Batumbuk pond, Berau. The results of this study can be used as a reference in the management of ponds.

Keywords: Phytoplankton, Nitrate, Phosphate, Pond, Generalized Poisson Regression

Citation: Harliani, M., Nurfadilah., Bulan, D. E. (2025). Studi Hubungan Kelimpahan Fitoplankton dan Ketersediaan Nutrien pada Tambak di Kampung Pegat Batumbuk, Kalimantan Timur Menggunakan *Generalized Poisson Regression*. Jurnal Ilmu Lingkungan, 23(4), 1085-1092, doi:10.14710/jil.23.4.1085-1092

1. PENDAHULUAN

Kampung Pegat Batumbuk berada di Kecamatan Pulau Derawan, Kabupaten Berau, Provinsi Kalimantan Timur dengan total luas wilayah 547,18 km² yang meliputi kawasan hutan mangrove seluas

22.000 hektare. Aktivitas budidaya udang, ikan, dan kepiting menjadi ciri khas masyarakat yang tinggal di sekitar kawasan mangrove tersebut. Sekitar 200 petak tambak yang tersebar di sepanjang pesisir desa, dengan luas masing-masing petak tambak berkisar

antara 5 hingga 25 hektare. Namun, pembukaan tambak udang yang tidak terencana dan minimnya pemahaman serta pengetahuan mengenai manajemen tambak yang optimal berpotensi berdampak negatif terhadap ekosistem mangrove di wilayah Pegat Batumbuk (YKAN, 2021). Konversi hutan mangrove menjadi lahan tambak secara masif telah menghilangkan fungsi penting mangrove sebagai penyaring alami. Akibatnya, limbah dan sedimen dengan mudah masuk ke perairan tambak, meningkatkan kadar nutrisi seperti nitrogen dan fosfor. Peningkatan kadar nutrisi ini memicu pertumbuhan fitoplankton yang tidak terkendali (*blooming*), dan pada gilirannya dapat menyebabkan penurunan kadar oksigen terlarut dan kematian massal organisme akuatik (Sahami et al., 2017). Berdasarkan data lapangan tahun 2023 yang dihimpun dari Dinas Kelautan dan Perikanan Kab. Berau, kadar nitrat di beberapa tambak mencapai 0,9 - 1,2 mg/L dan fosfat 0,4 - 0,6 mg/L merupakan nilai yang melebihi ambang batas ideal bagi ekosistem tambak yang seimbang (DKP Berau, 2023).

Fitoplankton memiliki peran penting dalam ekosistem perairan yaitu sebagai produsen primer yang mampu menghasilkan makanan melalui proses fotosintesis. Selain itu, fitoplankton juga mampu menghasilkan oksigen yang cukup untuk pasokan organisme akuatik lainnya. Pertumbuhan fitoplankton dipengaruhi oleh cahaya matahari dan ketersediaan nitrat dan fosfat di perairan. Ketersediaan nutrisi sangat menentukan produktivitas fitoplankton (Ikhsan et al., 2020). Dalam kondisi perairan dengan nutrisi berlebih, fitoplankton dapat tumbuh secara berlebihan dan menyebabkan ketidakseimbangan ekosistem.

Pengaruh peningkatan kadar nitrat dan fosfat terhadap jumlah total fitoplankton dapat diprediksi menggunakan model Generalized Poisson Regression (GPR). GPR digunakan untuk mengatasi masalah *overdispersi*, yaitu saat varians data jauh lebih besar dibandingkan rata-ratanya. Dibandingkan model regresi standar, GPR lebih fleksibel dalam menangani variabilitas tinggi dan cocok diterapkan pada data jumlah yang kompleks (Lusiana et al., 2021).

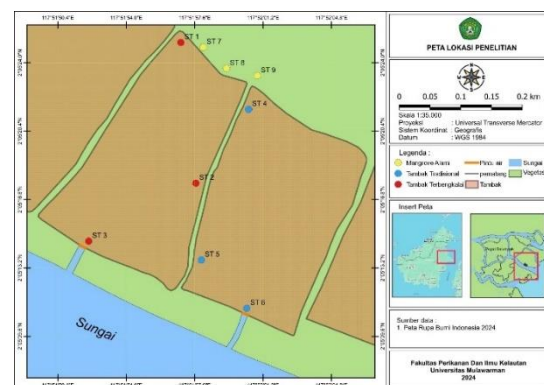
Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan GPR dalam memodelkan kelimpahan fitoplankton di tambak Kampung Pegat Batumbuk, dengan menggunakan parameter nitrat dan fosfat aktual yang diperoleh dari lokasi penelitian. Penggunaan GPR dalam konteks ekosistem tambak berbasis mangrove di Kalimantan Timur masih sangat terbatas dan belum banyak diaplikasikan dalam penelitian sebelumnya. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengelolaan tambak yang berkelanjutan berbasis pada analisis data ilmiah.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Koleksi Sampel

Pengambilan data penelitian ini dilakukan pada bulan Januari-Februari 2023 di tambak Kampung Pegat Batumbuk, Kecamatan Pulau Derawan, 1086

Kabupaten Berau, Kalimantan Timur. Lokasi pengambilan sampel dibagi menjadi 3 kategori berdasarkan kondisi penggunaan lahan dan vegetasi mangrove. 3 lokasi yaitu (1) mangrove terbengkalai, (2) tambak tradisional, dan (3) mangrove alami. Masing-masing kategori lokasi terdiri dari tiga stasiun penelitian yaitu ST 1- 3 (tambak terbengkalai yang merupakan tambak yang tidak aktif digunakan dan dibiarkan terbuka), ST 4-6 (tambak tradisional yang merupakan tambak aktif dengan metode budidaya tradisional) dan ST 7-9 (perairan mangrove alami yang merupakan area vegetasi mangrove alami). Penentuan stasiun dilakukan berdasarkan karakteristik ekosistem serta kemudahan akses untuk pengambilan sampel. Koordinat geografis masing-masing stasiun ditentukan menggunakan GPS (Garmin 64 SEA) dan ditampilkan pada Gambar 1. Pada setiap kategori lokasi dilakukan pengambilan sampel sebanyak tiga replikasi, sehingga total terdapat sembilan titik pengambilan sampel. Parameter yang diamati mencakup analisis kandungan nutrisi (nitrat dan ortofosfat) serta identifikasi komunitas fitoplankton serta parameter fisik kimia perairan.



Gambar 1. Lokasi Pengambilan Sampel

Sampel pada penelitian ini terdiri dari sampel air untuk analisis nutrisi dan sampel air untuk identifikasi jenis fitoplankton. Sampel air untuk analisis nutrisi dikumpulkan sebanyak ± 1 liter dari kolom air tambak menggunakan botol steril. Seluruh sampel diberi label, disimpan dalam cool box bersuhu $\leq 6^\circ\text{C}$ (SNI 8995: 2021), kemudian dibawa ke darat, untuk selanjutnya disaring menggunakan filter membran berukuran $0,2 \mu\text{m}$ (Millipore, Germany). Sampel yang telah disaring selanjutnya dianalisis di laboratorium untuk mengukur konsentrasi nutrisi menggunakan spektrofotometer UV-Vis (Thermo Scientific, USA). Selanjutnya, analisis kandungan nutrisi mengikuti metode brucine sulfate mengacu pada (APHA, 1979; Rice et al., 2012), dan mengikuti standar SNI 19-6964.7-2003 dan SNI 6989-31:2021. Identifikasi jenis fitoplankton dilakukan dengan menyaring 50 Liter air permukaan tambak menggunakan jaring plankton $20 \mu\text{m}$. Hasil saringan dimasukkan ke dalam botol sampel 100 mL dan diberi label, kemudian diawetkan dengan menambahkan 3-4 tetes larutan lugol (4%). Sampel dianalisis di

laboratorium menggunakan mikroskop pada perbesaran x10 mikrometer (Olympus 647, Jepang). Identifikasi dilakukan berdasarkan panduan "Oceanographic Characters and Plankton Resources of Indonesia" (Hartoko, 2013).

Pengukuran parameter fisik kimia perairan (suhu, DO, pH, salinitas) dilakukan secara in situ di setiap stasiun menggunakan alat *Water Quality Checker* (JALA Baruno, Indonesia). Hasil pengukuran dibandingkan dengan baku mutu tambak udang windu berdasarkan Peraturan Menteri Kelautan dan Perikanan No. 75 Tahun 2016.

2.2. Perhitungan Kelimpahan Fitoplankton

Data fitoplankton yang telah diidentifikasi selanjutnya dihitung dengan formula APHA (1992):

$$N = F \times \frac{Ja}{Jb} \times \frac{Vt}{Vs} \times \frac{1}{Vd}$$

Keterangan:

N : Kelimpahan (Sel/L)

F : Jumlah sel spesies ke-i yang tercacah

Ja : Luas wadah (20x20 mm)

Jb : Luas total lapang pandang (10x10 mm)

Vt : Volume air yang tersaring (50 mL)

Vs : Volume air yang dianalisis (0,3 mL)

Vd : Volume air yang disaring (50 L)

2.3. Model Regresi Poisson

Data kelimpahan fitoplankton dan nutrient selanjutnya dianalisis dengan menggunakan model regresi Poisson berdasarkan formula Myers (1990) untuk memprediksi kelimpahan fitoplankton berdasarkan ketersediaan nutrien pada perairan Pegat Batumbuk. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak *Rstudio* versi 2023.12.1 dengan menggunakan paket yaitu VGAM, car, AER, ggplot2, sandwich dan MASS.

$$\mu_i = \exp(\beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_p x_{ip})$$

Keterangan:

Y^* : Rata-rata frekuensi peristiwa yang terjadi dalam suatu periode waktu tertentu

X_i : Variabel prediktor ke-i

β_i : Parameter regresi Poisson ke-1

2.4. Model Generalized Poisson Regression

Prediksi kelimpahan fitoplankton berdasarkan peningkatan nutrien dihitung menggunakan formula Consul and Famoye (1992) sebagai berikut.

$$f(\mu_i, \theta, y_i) = \left(\frac{\mu_i}{1 + \theta \mu_i} \right)^{y_i} \frac{(1 + \theta y_i)^{y_i - 1}}{y_i!} \exp \left(\frac{-\mu_i (1 + \theta y_i)}{1 + \theta \mu_i} \right)$$

Dengan $\ln(\mu_i) = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_p x_{ip}$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kondisi Fisik Kimia Perairan di Lokasi Penelitian

Hasil pengukuran parameter fisik kimia pada seluruh stasiun disajikan pada Tabel 1. Secara umum,

perairan di lokasi penelitian menunjukkan nilai yang masih dalam rentang baku mutu tambak udang windu (Peraturan Menteri Kelautan dan Perikanan (Permen-KKP) Nomor 75/PERMEN-KP/2016), kecuali parameter kimia pH di area tambak terbenkakai (ST.1-ST.3) dan mangrove alami (ST.7-ST.9) yang berada pada kisaran di bawah baku mutu (7,5-8,5). Nilai pH yang rendah (5,05-6,77) pada dua kategori ini kemungkinan disebabkan pada tambak terbenkakai yang tidak memiliki pintu air, sehingga volume air di dalamnya dipengaruhi oleh pasang surut secara langsung. Saat kondisi surut, air di tambak mengalami penurunan volume secara signifikan, menyebabkan terjadinya penumpukan material organik di dasar perairan dan memicu proses dekomposisi. Penumpukan ini dapat menghasilkan asam, yang selanjutnya menurunkan nilai pH (Zhang et al., 2020). Perubahan pH dalam perairan tambak berperan penting dalam mengatur aktivitas biologis, termasuk komposisi dan kelimpahan fitoplankton. Fitoplankton seperti, *Bacillaria* sp., *Cyclotella* sp., *Nitzschia* sp., *Closterium* sp., *Spiriogyra* sp., *Oscillatoria* sp., dan *Ceratium* sp. diketahui memiliki toleransi terhadap kondisi pH rendah (Wafi et al., 2020).

Nilai salinitas diperoleh sangat rendah pada lokasi mangrove alami (ST.7-ST.9) yaitu 0,34-1,50 ppt. Rendahnya salinitas pada lokasi ini kemungkinan disebabkan karena area tersebut merupakan area tertutup yang berada di belakang pematang tambak, sehingga memiliki keterbatasan pertukaran antara air laut dan air tawar dari muara sungai ke wilayah tersebut. Hal ini selaras dengan Ariyani dan Yuliana (2019) yang menyatakan bahwa akumulasi air hujan dan rendahnya intrusi air laut menyebabkan penurunan salinitas. Konsentrasi fosfat di lokasi mangrove alami (ST.7-ST.9) juga sangat tinggi yaitu 0,867 – 0,879 mg/L, melewati baku mutu yaitu $\leq 0,1$ mg/L. Tingginya konsentrasi fosfat tersebut juga diduga karena lokasi mangrove alami berada di belakang tambak dan merupakan area tertutup sehingga dapat menyebabkan pengendapan bahan organik dari daun mangrove yang terdekomposisi (Simanjuntak et al., 2021). Konsentrasi fosfat dari stasiun yang lain masih berada dalam rentang baku mutu Permen-KP No. 75 Tahun 2016. yang diukur di semua stasiun berada dengan kisaran antara 0,017-0,879 mg/L.

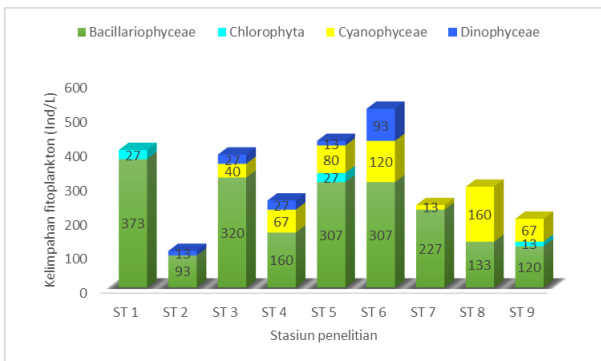
3.2. Kelimpahan Fitoplankton

Fitoplankton yang ditemukan pada lokasi penelitian terdiri dari empat kelas dengan total 22 genus. Kelas Bacillariophyceae (16 genus) yang paling dominan diikuti Dinophyceae (3 genus), Cyanophyceae (2 genus), dan Chlorophyceae (1 genus) (Gambar 2).

Tabel 1. Kondisi Fisik Kimia Perairan di Lokasi Penelitian

Stasiun	Parameter					
	Suhu (°C)	Salinitas (ppt)	pH	DO (mg/ L)	Nitrat (mg/L)	Fosfat (mg/L)
ST. 1	29,7	11	5,05	5.98	0,144	0,058
ST. 2	30,7	5,55	5,82	8.38	0,157	0,279
ST. 3	31	13,5	6,39	8.20	0,098	0,181
ST. 4	32,6	13,7	7,50	7.35	0,012	0,121
ST. 5	33,5	12,3	7,27	7.28	0,008	0,017
ST. 6	33,8	11,9	7,30	7.75	0,105	0,216
ST. 7	25,3	1,42	6,68	5.75	0,127	0,867
ST. 8	26,2	1,50	6,42	8.46	0,200	0,870
ST. 9	30,2	0,34	6,77	7.04	0,171	0,879
Baku mutu*	28 – 32	5 – 40	7,5 – 8,5	> 3	< 0,5	< 0,1

Keterangan: *Peraturan Menteri Kelautan dan Perikanan (Permen-KKP) Nomor 75/PERMEN-KP/2016

**Gambar 2.** Kelimpahan Fitoplankton di Lokasi Penelitian

Analisis kelimpahan fitoplankton di perairan Pegat Batumbuk menunjukkan dominasi kelas Bacillariophyceae di seluruh stasiun. Genus *Coscinodiscus* sp. menjadi spesies paling dominan, terutama di tambak tradisional (ST.4-ST.6). Di tambak terbungkalai (ST.1-ST.3), *Melosira borerri* dari kelas Bacillariophyceae mendominasi, sedangkan di lokasi mangrove (ST.7-ST.9), *Trichodesmium clevei* dari kelas Cyanophyceae menjadi spesies paling menonjol. Kemampuannya beradaptasi terhadap variasi salinitas melalui akumulasi osmolit dan eksopolisakarida, serta struktur kolonial yang meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi dan stabilitas dalam kolom air, menjadi faktor utama dominasinya (Margalef, 1978; Patsios et al., 2020; Round et al., 1990; Song et al., 2013).

Sebaliknya, *Trichodesmium clevei* (Cyanophyceae) mendominasi kawasan mangrove alami (ST.7-ST.9), didukung oleh toleransinya terhadap salinitas tinggi, suhu hangat, dan oksigen terlarut rendah (Capone et al., 1997; Stal, 2009). Produksi compatible solute seperti homoserin betain juga memperkuat adaptasinya terhadap tekanan osmotik (Scanlan et al., 2009).

Total kelimpahan fitoplankton tertinggi ditemukan di lokasi pintu air tambak tradisional (ST.6), kemungkinan karena adanya pasokan nutrisi dari limbah organik dan aliran air dari sungai dan laut. Kondisi lingkungan yang mendukung di sekitar pintu air juga berkontribusi pada pertumbuhan fitoplankton yang optimal (Bunting, 2013).

3.3. Distribusi Poisson

Dalam model regresi Poisson, salah satu syaratnya adalah variabel respons harus berdistribusi Poisson.

Maka dari itu, diperlukan pengujian distribusi Poisson dengan hipotesis berikut:

H_0 : Data fitoplankton berdistribusi Poisson

H_1 : Data fitoplankton tidak berdistribusi Poisson

Taraf signifikansi yang digunakan (α) adalah 0,05 atau 5%. Dalam pengujian ini, digunakan uji statistik berupa *Kolmogorof-smirnov* dengan syarat jika taraf signifikansi $< \alpha$ maka H_0 ditolak. Analisis uji *Kolmogorof-smirnov* menggunakan *Rstudio* versi 2023.12.1. Hasil analisis menunjukkan nilai p-value sebesar 4,58. Dikarenakan nilai p-value lebih besar dari taraf signifikan (α), maka keputusan diambil adalah H_0 diterima. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa data fitoplankton berdistribusi Poisson. Data tersebut kemudian diuji dengan analisis regresi Poisson untuk memodelkan hubungan antara fitoplankton dan kandungan nutrisi.

3.4. Model Regresi Poisson

Studi ini menerapkan model regresi Poisson untuk mengevaluasi hubungan antara kelimpahan fitoplankton dengan fokus pada kelas dominan yaitu Bacillariophyceae dan konsentrasi nutrisi di lokasi tambak tradisional. Pemilihan model ini didasarkan pada temuan bahwa total kelimpahan fitoplankton menunjukkan kecenderungan tertinggi pada stasiun tambak tradisional, sehingga lokasi tersebut menjadi representasi utama dalam analisis hubungan ekologis antara komunitas fitoplankton dan faktor nutrisi (Gambar 2).

Tabel 2. Model Regresi Poisson Tambak Tradisional

Parameter	Estimasi Parameter	Standar Error	Z value	Pr (> z)
μ	3.905	0.065	59.959	<.0002
Nitrat	13.274	1.506	8.813	<.0002
Fosfat	-5.452	0.806	-6.759	<.0001
Kelas Bacillariophyceae	1.693	0.060	28.091	<.0002

Hasil uji signifikansi (Tabel 2) menunjukkan bahwa seluruh variabel independen memberikan kontribusi yang signifikan terhadap variasi jumlah fitoplankton kelas Bacillariophyceae. Hal ini didukung oleh nilai p-value yang sangat kecil ($p < 0,05$) untuk semua koefisien regresi. Berdasarkan temuan ini, persamaan regresi Poisson dapat dirumuskan:

$$(\mu_i) = \exp(3.905 + 13.274x_1 - 5.452x_2 + 1.693k_1)$$

Selanjutnya, model regresi Poisson ini akan diuji untuk mengetahui apakah data tersebut terjadi overdispersi atau equidispersi. Jika terjadi overdispersi maka analisis data dilanjutkan dengan permodelan *Generalized Poisson Regression* (GPR).

3.5. Uji Overdispersi

Pengujian overdispersi dilakukan pada model regresi Poisson dengan menetapkan hipotesis berdasarkan rasio antara rata-rata dan ragam, di mana rasio yang jauh lebih besar atau lebih kecil dari 1 mengindikasikan penyimpangan dari distribusi Poisson. Keputusan pengujian diperkuat dengan menggunakan tingkat signifikansi ($\alpha = 0,05$); hipotesis nol (H_0) ditolak apabila nilai *p-value* yang dihasilkan kurang dari 0,05.

Adapun, hipotesis untuk uji overdispersi sebagai berikut:

H_0 : Equidispersi (rasio rata-rata terhadap varians sama dengan 1) dan H_1 : Overdispersi (rasio rata-rata terhadap varians lebih dari 1). Hasil uji ada di Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Uji Overdispersi Model Regresi Poisson

Statistik	Nilai Estimasi
Rasio Dispersi	33.836
Chi-Squared	270.692
P-Value	< 0.001

Berdasarkan hasil uji yang ditampilkan pada Tabel 3, rasio dispersi sebesar 33,836 (>1) mengindikasikan adanya overdispersi dalam data. Uji hipotesis terhadap overdispersi menunjukkan nilai *p-value* < 0,001. Karena nilai tersebut lebih kecil dari taraf signifikansi ($\alpha = 0,05$), maka H_0 ditolak. Dengan demikian, terdapat bukti kuat bahwa data mengalami overdispersi, sehingga analisis lebih lanjut perlu dilakukan menggunakan *Generalized Poisson Regression* (GPR) sebagai pendekatan pemodelan yang lebih sesuai.

3.6. Model Generalized Poisson Regression

Model ini dibangun berdasarkan data yang dikumpulkan dari masing-masing stasiun penelitian, dengan menggunakan paket VGAM pada perangkat lunak *RStudio* versi 2023.12.1. Hasil pemodelan menggunakan *Generalized Poisson Regression* (GPR) untuk masing-masing kategori lokasi yakni tambak terbungkalai, tambak tradisional, dan perairan mangrove alami di wilayah Kampung Pegat Batumbuk disajikan pada Tabel 4.

a) Tambak terbungkalai

$$f(y_i) = \left(\frac{\mu_i}{1 + 1.5209\mu_i} \right)^{y_i} \frac{(1 + 1.5209y_i)^{y_i-1}}{y_i!} \exp \left(\frac{-\mu_i(1 + \alpha y_i)}{1 + \alpha \mu_i} \right)$$

dengan

$$\ln(\mu_i) = 6.1615 - 12.7964x_{i1} - 3.7779x_{i2} - 4.4101k1i - 4.2755k2i - 3.3225k3i \quad (1)$$

b) Tambak tradisional

$$f(y_i) = \left(\frac{\mu_i}{1 + 0.8799\mu_i} \right)^{y_i} \frac{(1 + 0.8799y_i)^{y_i-1}}{y_i!} \exp \left(\frac{-\mu_i(1 + \alpha y_i)}{1 + \alpha \mu_i} \right)$$

dengan

$$\ln(\mu_i) = 4.3423 + 11.2377x_{i1} - 4.2287x_{i2} - 4.8517k1i - 1.0084k2i - 1.9176k3i \quad (2)$$

c) Mangrove alami

$$f(y_i) = \left(\frac{\mu_i}{1 + 1.7211\mu_i} \right)^{y_i} \frac{(1 + 1.7211y_i)^{y_i-1}}{y_i!} \exp \left(\frac{-\mu_i(1 + \alpha y_i)}{1 + \alpha \mu_i} \right)$$

dengan

$$\ln(\mu_i) = -11.955 + 7.655x_{i1} + 15.877x_{i2} - 3.805k1i - 0.699k2i \quad (3)$$

Persamaan (1) menunjukkan bahwa baik fosfat maupun nitrat berkontribusi terhadap penurunan kelimpahan fitoplankton di tambak terbungkalai, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai estimasi parameter yang negative. Estimasi parameter untuk koefisien nitrat menunjukkan bahwa setiap peningkatan konsentrasi sebesar 1 mg/L diperkirakan akan menurunkan jumlah fitoplankton dengan faktor sekitar 12.80 atau setara dengan penurunan hingga 360.915 sel/L. Demikian pula, peningkatan konsentrasi fosfat sebesar 1 mg/L diperkirakan menurunkan kelimpahan fitoplankton dengan faktor sekitar 3.78 yang setara dengan kelimpahan fitoplankton sebesar 43.724 sel/L. Meskipun nilai *p-value* keduanya mendekati batas signifikansi ($\alpha=0,05$), hasil ini masih menunjukkan potensi pengaruh yang signifikan dari konsentrasi nutrient terhadap struktur komunitas fitoplankton. Selain itu, berdasarkan analisis terhadap kelas fitoplankton, ditemukan bahwa kelas *Chlorophyceae*, *Cyanophyceae*, dan *Dinophyceae* memiliki nilai koefisien negatif terhadap kelas *Bacillariophyceae*. Hal ini mengindikasikan bahwa ketiga kelas tersebut secara statistik cenderung memiliki kelimpahan yang lebih rendah dibandingkan dengan kelas *Bacillariophyceae*, sebagaimana tercermin pada hasil model dalam Tabel 4.

Persamaan (2) menunjukkan bahwa konsentrasi nitrat berpengaruh signifikan terhadap kelimpahan fitoplankton di Tambak Tradisional Pegat Batumbuk. Hal ini dibuktikan dengan nilai *p-value* koefisien nitrat yang berada di bawah batas signifikansi ($\alpha = 0,05$). Estimasi parameter menunjukkan bahwa pada setiap kenaikan kadar nitrat sebesar 1 mg/L diperkirakan akan menaikkan jumlah fitoplankton yang diamati secara statistik sekitar 11.2377 atau setara dengan kelimpahan fitoplankton 75.940 sel/L, dengan asumsi variabel lain tetap. Selain itu, persamaan tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara kandungan fosfat dan jumlah fitoplankton mungkin tidak signifikan secara statistik pada tingkat signifikansi yang ditetapkan. Sebaliknya, konsentrasi fosfat tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan secara statistik. Meskipun estimasi parameter memperlihatkan bahwa peningkatan fosfat sebesar 1 mg/L berasosiasi dengan penurunan kelimpahan fitoplankton sebesar 4,23 kali (setara dengan 6.862 sel/L), nilai *p-value* yang melebihi batas signifikansi menunjukkan ketidakpastian terhadap pengaruh tersebut

Analisis berdasarkan kelas fitoplankton memperlihatkan bahwa *Chlorophyceae*,

Cyanophyceae, dan *Dinophyceae* secara statistik memiliki kelimpahan lebih rendah dibandingkan *Bacillariophyceae*, sebagaimana tercermin dari nilai koefisien negatif pada Tabel 4, meskipun perbedaannya tidak ekstrem.

Sementara itu, Persamaan (3) menunjukkan bahwa baik nitrat maupun fosfat tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kelimpahan fitoplankton di perairan mangrove alami. Hal ini terlihat dari nilai *p-value* yang melebihi taraf signifikansi, sebagaimana disajikan pada Tabel 4. Ketidaksignifikanan ini diduga berkaitan dengan proses dekomposisi bahan organik, seperti serasah mangrove, yang melepaskan nitrogen dan fosfor ke dalam kolom air secara fluktuatif dan tidak langsung terserap oleh fitoplankton (Yang et al., 2021).

Meski demikian, estimasi parameter menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi nitrat sebesar 1 mg/L dapat meningkatkan jumlah fitoplankton sekitar 7,66 kali (setara dengan 2.112 sel/L), dan peningkatan fosfat sebesar 1 mg/L diperkirakan memberikan kontribusi peningkatan fitoplankton sebesar 7.857 sel/L. Namun, pengaruh tersebut belum cukup kuat untuk dianggap signifikan secara statistik dalam model ini.

Gambar 3 menunjukkan bahwa kelimpahan fitoplankton pada semua kelas di tambak terbungkalai, tambak tradisional dan perairan mangrove alami di Kampung Pegat Batumbuk meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi nitrat sebesar 0,025 mg/L konsentrasi nitrat. Peningkatan tertinggi tercatat pada kelas *Bacillariophyceae* yang ditunjukkan oleh nilai estimasi yang positif yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa *Bacillariophyceae* memberikan respons paling kuat terhadap peningkatan nitrat dibandingkan kelas fitoplankton lainnya, sekaligus menunjukkan adanya perbedaan signifikan antar kelas. Nitrat merupakan bentuk utama nitrogen anorganik yang cepat dimanfaatkan oleh fitoplankton, khususnya diatom, untuk mendukung pertumbuhan dan reproduksi (Zhang et al., 2021). Respon positif *Bacillariophyceae* terhadap nitrat ini juga konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa ketersediaan nitrat secara langsung memengaruhi dominansi dan komposisi komunitas fitoplankton di perairan pesisir (Zhou et al., 2023).

Peningkatan ketersediaan nitrat dan fosfat di tambak Pegat Batumbuk berpengaruh terhadap

kelimpahan fitoplankton, dengan korelasi positif yang paling kuat ditunjukkan oleh kelas *Bacillariophyceae* (diatom). Nitrat ($\text{NO}_3\text{-N}$) merupakan bentuk nitrogen anorganik dengan tingkat oksidasi tinggi yang berperan penting sebagai nutrisi utama bagi organisme akuatik. Ketersediaan nitrat yang memadai mendukung pertumbuhan fitoplankton sebagai produsen primer dalam rantai makanan ekosistem perairan (Howarth & Marino, 2006; J. Zhang et al., 2021; Zhou et al., 2023).

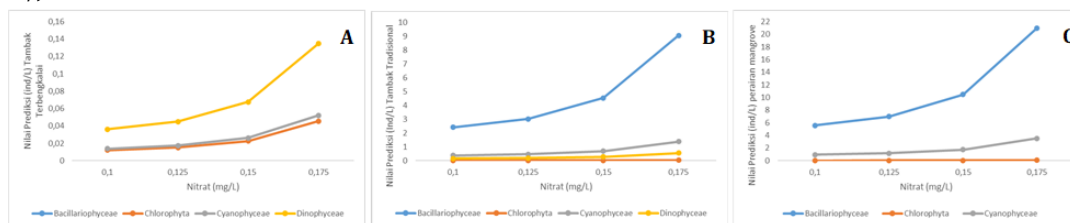
Namun demikian, konsentrasi nitrat yang melebihi ambang batas dapat memicu kondisi eutrofikasi, di mana akumulasi nutrisi menyebabkan ledakan pertumbuhan alga (*algal bloom*). Nitrat sebagai sumber utama nitrogen bagi tumbuhan akuatik, termasuk fitoplankton dan alga, berperan dalam proses ini (Anderson et al., 2002; Glibert et al., 2018). Dalam kasus tertentu, pertumbuhan fitoplankton yang berlebihan diikuti oleh dominansi spesies beracun dapat memicu peristiwa *harmful algal blooms* (HABs), yang menghasilkan toksin berbahaya bagi organisme akuatik seperti ikan dan invertebrata. Paparan toksin tersebut berpotensi menyebabkan kematian massal dan mengganggu keseimbangan ekosistem perairan (Heisler et al., 2008; Yuan et al., 2024).

Fosfat merupakan nutrisi esensial yang berperan penting dalam mendukung pertumbuhan dan perkembangan organisme akuatik, termasuk fitoplankton. Ketersediaan fosfat dalam konsentrasi yang optimal dapat merangsang pertumbuhan fitoplankton dan meningkatkan produktivitas primer. Namun, jika konsentrasinya berlebihan, fosfat dapat mempercepat proses eutrofikasi yang memicu terbentuknya *algal blooms*. Kondisi ini berdampak negatif terhadap ekosistem perairan, antara lain melalui penurunan kadar oksigen terlarut, terganggunya penetrasi cahaya, dan menurunnya produktivitas tumbuhan air (Lapointe et al., 2020).

Pertumbuhan alga yang berlebihan tidak hanya mengganggu keseimbangan komunitas biologis dengan mengubah komposisi spesies, tetapi juga dapat menyebabkan masalah kesehatan pada ikan dan invertebrata. Saat alga mati dan mengalami dekomposisi, proses ini mengonsumsi oksigen dalam jumlah besar dan dapat menyebabkan kondisi hipoksia atau anoksia yang membahayakan kehidupan biota akuatik (Paerl et al., 2016; Zhang et al., 2023).

Tabel 4. Hasil Estimasi Parameter Model GPR pada Tambak Terbungkalai, Tambak tradisional dan Mangrove alami di Pegat Batumbuk

Parameter	Tambak terbungkalai				Tambak tradisional				Mangrove alami			
	Estimasi Parameter	Standar Error	Z	P-Value	Estimasi Parameter	Standar Error	Z	P-Value	Estimasi Parameter	Standar Error	Z	P-Value
μ	6.1615	1.0551	5.840	<0.00523	4.3423	0.3045	14.259	<0.00002	-11.9555	34.8803	NA	NA
Kelas <i>Bacillariophyceae</i>	1.5209	0.4714	3.227	0.00125	0.8799	0.3589	2.452	0.0142	1.7211	0.4332	3.973	<0.0070
Nitrat	-12.7964	6.6748	-1.917	0.05522	11.2377	4.7469	2.367	0.0179	7.6555	7.1466	1.071	0.2481
Fosfat	-3.7779	2.0701	-1.825	0.06800	-4.2287	2.5740	-1.643	0.1004	15.8778	40.2783	0.394	0.6934
Kelas <i>Chlorophyceae</i>	-4.4101	0.9186	-4.801	<0.00158	-4.8517	0.8742	-5.550	<0.00286	-3.8057	0.9495	-4.008	<0.0061
Kelas <i>Cyanophyceae</i>	-4.2755	0.8777	-4.871	<0.00111	-1.0084	0.2254	-4.475	<0.00765	-0.6990	0.4213	-1.659	0.0971
Kelas <i>Dinophyceae</i>	-3.3225	0.6578	-5.051	<0.00440	-1.9176	0.3113	-6.160	<0.00729	NA	NA	NA	NA



Gambar 3. Hasil Prediksi Fitoplankton pada Tambak terbengkalai (A), Tambak tradisional (B) dan Mangrove alami (C)

Peningkatan konsentrasi fosfat di perairan dapat dipicu oleh faktor antropogenik dan alami. Aktivitas manusia seperti penggunaan pupuk fosfat berlebihan dan limbah rumah tangga yang mengandung deterjen fosfat merupakan sumber utama pencemaran (Kogawa et al., 2017; UNEP, 2023). Selain itu, erosi tanah akibat pertanian intensif, konstruksi, dan deforestasi mempercepat aliran fosfat ke badan air melalui run-off (Daniel et al., 1994). Di sisi lain, proses geokimia alami seperti pelapukan batuan fosfat dan remobilisasi dari sedimen juga berkontribusi signifikan terhadap konsentrasi fosfat di kolom air (Badamasi et al., 2019).

Penemuan bahwa konsentrasi fosfat di tambak yang berkisar antara 0,058 hingga 0,87 mg/L, pada beberapa stasiun penelitian telah melewati baku mutu yang direkomendasikan yaitu <0,1 mg/L, adalah indikasi adanya potensi masalah lingkungan. Permasalahan ini menjadi sangat penting untuk terus dipantau karena dapat mengancam keseimbangan ekosistem dan keberlanjutan lingkungan tersebut. Sebagai solusi, perlu dilakukan upaya mitigasi untuk mengurangi konsentrasi fosfat dalam air dengan mengurangi faktor penyebab dan sumber fosfat masuk ke perairan. Pemantauan terus-menerus terhadap kualitas air dan implementasi tindakan yang tepat sangat penting untuk melindungi ekosistem dan keberlanjutan lingkungan tambak.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi nitrat memiliki korelasi positif yang signifikan terhadap kelimpahan fitoplankton, khususnya dari kelas *Bacillariophyceae*. Berdasarkan hasil pemodelan menggunakan Generalized Poisson Regression (GPR), *Bacillariophyceae* menunjukkan respons pertumbuhan yang bervariasi terhadap ketersediaan nitrat pada masing-masing tipe ekosistem. Setiap peningkatan konsentrasi nitrat sebesar 1 mg/L diperkirakan meningkatkan kelimpahan fitoplankton sebesar 97.154 sel/L di tambak terbengkalai, 1.114 sel/L di tambak tradisional, dan 267.896 sel/L di perairan mangrove alami.

Studi ini menegaskan pentingnya pengelolaan kadar nitrat dalam budidaya perairan untuk mencegah *algal blooms* yang merusak ekosistem. Oleh karena itu, pengendalian input nutrisi dari aktivitas manusia dan proses alami perlu dipertimbangkan demi menjaga keseimbangan komunitas fitoplankton dan keberlanjutan ekosistem perairan.

DAFTAR PUSTAKA

- American Public Health Association (APHA). 1979. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (14th ed). Washington, DC: American Public Health Association.
- Anderson, D. M., Glibert, P. M., & Burkholder, J. M. 2002. Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*, 25(4), 704–726. <https://doi.org/10.1007/BF02804901>
- Ariyani, F., & Yuliana, E. 2019. Komposisi jenis dan kelimpahan fitoplankton di perairan Bayur, Padang. *Journal of Coastal Science*, 3(1): 1–7.
- Badamasi, H., Yaro, M. N., Ibrahim, A., & Aliyu Bashir, I. 2019. Impacts of Phosphates on Water Quality and Aquatic Life. 4, 124–133.
- Bunting, S. W. 2013. Principles of sustainable aquaculture: Promoting social, economic and environmental resilience. Routledge. [ISBN: 9780415522175]
- Daniel, T., Sharpley, A., & Smith, S. 1994. Human impact on erodible phosphorus and eutrophication. *BioScience*, 44(3), 227–234.
- Dinas Kelautan dan Perikanan Kabupaten Berau (DKP). 2023. Laporan Tahunan Kegiatan Pemantauan Kualitas Perairan Tambak di Kabupaten Berau Tahun 2023. Tanjung Redeb.
- Glibert, P. M., Wilkerson, F. P., Dugdale, R. C., Raven, J. A., Dupont, C. L., Leavitt, P. R., & Kana, T. M. 2018. Pluses and minuses of ammonium and nitrate uptake and assimilation by phytoplankton and implications for productivity and community composition. *Limnology and Oceanography*, 63(3), 1650–1665. <https://doi.org/10.1002/lno.10728>
- Hartoko, A. 2013. Oceanographic characters and plankton resources of Indonesia. Graha Ilmu.
- Heisler, J., Glibert, P. M., Burkholder, J. M., Anderson, D. M., Cochlan, W., Dennison, W. C., & Suddleson, M. 2008. Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus. *Harmful Algae*, 8(1), 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2008.08.006>
- Howarth, R., & Marino, R. 2006. Nitrogen as the Limiting Nutrient for Eutrophication in Coastal Marine Ecosystems: Evolving Views over Three Decades. *Limnology and Oceanography*, 51, 364–376. https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0364
- Ikhsan, M. K., Rudyanti, S., & Ain, C. 2020. Hubungan antara Nitrat dan Fosfat dengan Kelimpahan Fitoplankton di Waduk Jatibarang Semarang. *Management of Aquatic Resources Journal (MAQUARES)*, 9(1): 23–30.
- Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia. 2016. Peraturan Menteri Kelautan dan Perikanan Nomor 75/PERMEN-KP/2016 tentang Pedoman Umum Budidaya Udang Berkelanjutan.
- Kitheka, J. U. 1997. Coastal tidally driven circulation and the role of water exchange in the linkage between

- tropical coastal ecosystems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 45(2), 177–187.
- Kogawa, A. C., Cernic, B. G., do Couto, L. G. D., & Salgado, H. R. N. 2017. Synthetic detergents: 100 years of history. *Saudi Pharmaceutical Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2016.10.020>
- Lapointe, B. E., Herren, L. W., & Paule, A. L. 2020. Nutrient enrichment and eutrophication in aquatic ecosystems: A review of the role of phosphorus. *Environmental Pollution*, 265: 114849.
- Lusiana, E. D., Mahmudi, M., Buwono, N. R., & Nisya, T. W. 2021. Analisis Kelimpahan Fitoplankton Berdasarkan Ketersediaan Nutrien di Ranu Grati dengan Generalized Poisson Regression. *JFMR (Journal of Fisheries and Marine Research)*, 5(1): 78–83.
- Margalef, R. 1978. Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanologica Acta*, 1(4), 493–509.
- Myers, R.H. 1990. *Classical and Modern Regression with Applications*. PWS Kent Publishing Company, USA.
- Paerl, H. W., Otten, T. G., & Kudela, R. 2016. Mitigating the expansion of harmful algal blooms across the freshwater-to-marine continuum. *Environmental Science & Technology*, 50(17), 10300–10305. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01617>
- Patsios, S. I., Tzovenis, I., Kotzabasis, K., & Stathopoulou, A. 2020. Adaptation of marine diatoms to salinity stress: A case study using *Melosira* sp. *Algal Research*, 45, 101740. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101740>
- Rice, E. W., Bridgewater, L., & Association, A. P. H. 2012. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Vol. 10). American Public Health Association, Washington, DC.
- Round, F. E., Crawford, R. M., & Mann, D. G. 1990. *Diatoms: biology and morphology of the general*. Cambridge university press.
- Sahami, F. M., Baruadi, A. S. R., & Hamzah, S. N. 2017. Phytoplankton abundance as a preliminary study on pearl oyster potential culture development in the North Gorontalo water, Indonesia. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation*, 10(6): 1506–1513.
- Simanjuntak, P., Wibowo, R. H., & Yarjohan, Y. 2021. Screening and identification of mangrove plant *Sonneratia alba* Sm. endophytic bacteria from Enggano Island, Bengkulu Province. *Marine Science*, 45(3): 215–223.
- SNI 19-6964.7-2003. 2003. Air dan air limbah – Bagian 7: Cara uji fosfat ($\text{PO}_4\text{-P}$) secara spektrofotometri asam askorbat. Badan Standardisasi Nasional (BSN), Indonesia.
- SNI 6989.51:2009. 2009. Air dan air limbah – Bagian 51: Cara uji fosfat (PO_4) secara spektrofotometri asam askorbat. Badan Standardisasi Nasional (BSN), Indonesia.
- SNI 6989-31:2021. 2021. Air dan air limbah – Bagian 31: Cara uji nitrat ($\text{NO}_3\text{-N}$) secara spektrofotometri brusin. Badan Standardisasi Nasional (BSN), Indonesia.
- SNI 8995. 2021. *Metode Pengambilan Air*. Badan Standardisasi Nasional (BSN), Indonesia.
- Song, Y., Hu, Y., Li, H., Zhou, Q., Wang, H., & He, Y. 2013. Physiological responses of diatom *Melosira* sp. to salt stress under different light intensities. *Journal of Applied Phycology*, 25(4), 1169–1177. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9914-6>
- UNEP. 2023. Understanding phosphorus: global challenges and solutions.
- Wafi, A., Ariadi, H., Fadjar, M., Mahmudi, M., & Supriatna, S. 2020. Model simulasi panen parsial pada pengelolaan budidaya intensif udang vannamei (*Litopenaeus vannamei*). *Samakia: Jurnal Ilmu Perikanan*, 11(2): 118–126.
- Walworth, N. G., Lee, M. D., Fu, F. X., Hutchins, D. A., & Webb, E. A. 2020. Co-occurrence of iron and phosphorus stress in natural populations of the marine diazotroph *Trichodesmium*. *Biogeosciences*, 17(9): 2537–2551.
- Yang, R., Dong, J., Li, C., Wang, L., Quan, Q., & Liu, J. 2021. The decomposition process and nutrient release of invasive plant litter regulated by nutrient enrichment and water level change. *PLOS ONE*, 16(5): e0250880.
- Yayasan Konservasi Alam Nusantara (YKAN). 2021. Aksi Kolaboratif Untuk Melindungi Mangrove di Kabupaten Berau. <https://www.ykan.or.id/id/publikasi/artikel/siaran-pers/aksi-kolaboratif-untuk-melindungi-mangrove-di-kabupaten-berau/> (diakses Februari 2023).
- Yuan, J., Zhao, Z., Zheng, Y., & Li, H. 2024. Nutrient dynamics and harmful algal blooms in subtropical aquaculture ponds: Role of organic matter decomposition. *Aquatic Ecology*, 58(1), 15–29. <https://doi.org/10.1007/s10452-023-09932-7>
- Yuan, Y., Zhang, Y., Wang, J., & Li, R. 2024. Toxic effects and potential mechanisms of harmful algal blooms on aquatic ecosystems. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(2): 275.
- Zhang, H., Zhao, X., & Li, R. 2023. Physicochemical Parameters Drive the Diversity of Planktonic Communities in Coastal Waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 285, 107520. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.107520>
- Zhang, J., Wang, Y., & Li, Y. 2021. Effects of nitrogen sources on phytoplankton community composition and productivity in coastal ecosystems. *Marine Pollution Bulletin*, 164, 112016. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112016>
- Zhang, Y., Liang, X., Xu, M., & Wang, M. 2021. Nutrient limitation and phytoplankton community structure in subtropical estuarine waters. *Science of the Total Environment*, 783: 146964.
- Zhang, Y., Wang, J., & Li, R. 2023. Phosphorus threshold for the growth of *Microcystis wesenbergii*, *Microcystis aeruginosa*, and *Chlorella vulgaris* based on the Monod formula. *Water*, 15(24): 4249.
- Zhou, Y., Liu, J., & Liu, Y. 2023. Effects of nitrogen and phosphorus enrichment on phytoplankton dynamics in coastal ecosystems: A meta-analysis. *Ecological Indicators*, 148: 110031.
- Zhou, Y., Liu, Q., Chen, Y., & Sun, J. 2023. Influence of nitrogen and phosphorus enrichment on phytoplankton community structure in subtropical estuaries. *Ecological Indicators*, 148, 110019. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110019>