

Studi Sebaran Nitrat di Perairan Betahwalang, Kabupaten Demak

Haidar Zaki Kalbuesa, Lilik Maslukah*, Aris Ismanto, Muhammad Zainuri

Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Jacub Rais, Tembalang Semarang Jawa Tengah 50275, Indonesia
Email: *lilikmaslukah@lecture.undip.ac.id

Abstrak

Perairan Betahwalang dipengaruhi aktivitas mangrove, tambak, permukiman, dermaga, dan pengolahan rajungan yang berpotensi menyumbang bahan organik/nitrogen (nitrat) ke sungai dan muara. Penelitian ini bertujuan menganalisis konsentrasi dan distribusi nitrat di Perairan Betahwalang, Demak, Jawa Tengah. Pengambilan sampel dilakukan pada 33 stasiun yang mewakili zona muara Sungai Jajar, pesisir Betahwalang, dan laut lepas pada 27 April 2025. Konsentrasi nitrat dianalisis menggunakan metode reduksi kadmium dan spektrofotometer UV-Vis dan pola sebaran spasialnya menggunakan metode interpolasi spline. Untuk memahami pengaruh dinamika oseanografi terhadap sebaran nutrisi, dilakukan pemodelan hidrodinamika dan EcoLab 21/3. Hasil menunjukkan konsentrasi nitrat berkisar 0,0004–0,2597 mg/L dengan pola sebaran yang menurun ke arah laut lepas. Pola sebaran yang terbentuk merefleksikan dominasi masukan nutrisi dari daratan dan terjadinya proses pengenceran oleh massa air laut. Hasil model memperlihatkan bahwa arus pasang surut menjadi pengontrol utama transport nitrat, di mana fase pasang meningkatkan pencampuran di zona muara, sedangkan fase surut mendorong ekspor nitrat ke perairan pesisir membentuk plume mengikuti arah arus dominan. Validasi elevasi pasang surut menghasilkan root mean square error (RMSE) sebesar 0,1097 m dan untuk nitrat sebesar RMSE 0,0395 mg/L pada domain sungai dan 0,051 mg/L pada domain laut. Nilai tersebut menunjukkan model cukup representatif dalam menggambarkan pola sebaran nitrat secara umum, namun akurasi kuantitatif masih dapat ditingkatkan dengan memasukkan pengaruh faktor lingkungan lainnya

Kata kunci : nitrat, Betahwalang, muara sungai, pasang surut

Abstract

Study of Nitrate Distribution in the Waters of Betahwalang, Demak Regency

Activities in the Betahwalang waters, which include mangrove areas, aquaculture ponds, industrial facilities, jetties, and blue swimming crab processing plants, have the potential to release organic matter and nitrogen (Nitrat) into the river and estuary. This study aimed to analyze nitrate concentrations and their distribution in the Betahwalang waters, Demak Regency, Central Java. Sampling was conducted on April 27, 2025, at 33 stations representing the Jajar River estuary zone, the Betahwalang coast, and the open sea. Nitrate concentrations were determined using the cadmium reduction method and UV-Vis spectrophotometry, while spatial distribution patterns were mapped using spline interpolation. To understand the influence of oceanographic dynamics on nutrient distribution, hydrodynamic and EcoLab 21/3 modeling was conducted. The results indicated nitrate concentrations ranging from 0.0004 to 0.2597 mg/L, with a distribution pattern that decreases toward the open sea. This pattern reflects the dominance of land-based nutrient inputs and the influence of seawater masses. Model results suggest that tidal currents are the primary drivers of nitrate transport; the flood tide phase enhances mixing in the estuary zone, whereas the ebb tide phase facilitates nitrate export into coastal waters, forming a plume that follows the dominant current direction. Validation of tidal elevation yielded a root mean square error (RMSE) of 0.1097 m, while nitrate validation resulted in an RMSE of 0.0395 mg/L for the river domain and 0.051 mg/L for the sea domain. These values indicate that the model is reasonably representative of general nitrate distribution patterns, although quantitative accuracy could be further improved by incorporating the influence of other environmental factors.

Keywords : nitrate, Betahwalang, estuary, tidal current

PENDAHULUAN

Perairan estuari merupakan zona transisi antara sistem sungai dan laut yang berperan sebagai jalur utama transport nutrisi dari daratan menuju muara dan berakhir di laut. Pada sistem ini, distribusi nitrogen terlarut (terutama nitrat), secara umum menunjukkan gradien dari muara ke laut lepas karena kombinasi pengaruh debit sungai, pasang surut, serta proses pencampuran dan pengenceran (Yogaswara, 2020; Osadchiev *et al.*, 2020). Nitrat sendiri menjadi indikator penting karena berkaitan langsung dengan kesuburan perairan dan berpotensi memicu peningkatan produktivitas primer jika tersedia dalam konsentrasi tinggi (Wahyuni *et al.*, 2021; Manik *et al.*, 2023).

Perairan pesisir Demak merupakan salah satu kawasan di perairan Pantai utara Jawa dengan jumlah penduduk cukup tinggi. Tingginya permukiman penduduk ini telah menyebabkan kontribusi bahan organik yang masuk ke perairan menjadi tinggi dan hasil degradasi bahan organik ini menyebabkan nutrisi di perairan menjadi tinggi (termasuk N dalam bentuk nitrat). Selain berasal dari aktivitas permukiman (hasil limbah rumah tangga) dan sumber lainnya, nutrisi N di perairan bersumber dari lahan pertanian, tambak, serta dari sekitar perairan itu sendiri seperti berasal dari ekosistem mangrove (Kinasih dan Purnomo, 2015; Suhendar *et al.*, 2020; Salafiyah dan Insafitri, 2020). Mangrove tropis diketahui memiliki kontribusi sebagai suplai nitrogen, hasil proses mineralisasi, nitrifikasi, dan denitrifikasi. Hal ini dapat memengaruhi dinamika nitrat pada perairan sekitarnya (Adame *et al.*, 2025; Zidan *et al.*, 2025). Selain itu, sedimen estuari juga berperan sebagai sumber maupun tempat penyimpanan nutrisi yang akan terlepas kembali ke kolom perairan melalui pertukaran pori-pori sedimen dan proses dinamikanya di muara sungai dipengaruhi oleh pasang surut (Maslukah *et al.*, 2014; Rigaud *et al.*, 2018).

Proses hidrodinamika, khususnya pasang surut, berperan dalam mengontrol sebaran nitrat melalui mekanisme adveksi, pencampuran massa air, dan perubahan arah arus. Pada fase pasang, intrusi air laut dapat meningkatkan redistribusi nutrisi di sepanjang alur estuari, sedangkan pada fase surut aliran dari sungai mendorong massa air yang mengandung nutrisi menuju perairan pesisir dan membentuk plume (Khongmanont *et al.*, 2024; Osadchiev *et al.*, 2020). Dalam kajian perairan Indonesia, Ray dan Susanto (2016) menunjukkan bahwa tidal mixing lebih menonjol pada wilayah tertentu yang memiliki energi pasut besar dan karakter batimetri yang mendukung proses pencampuran. Dengan mempertimbangkan karakter tersebut, proses pencampuran di Perairan Betahwalang dalam penelitian ini lebih tepat dipahami sebagai pencampuran lokal dan transport nitrat yang dipengaruhi oleh arus pasang surut, bukan sebagai tidal mixing kuat sebagaimana dijumpai pada wilayah dengan energi pasut besar.

Untuk memahami pola sebaran nitrat, pendekatan yang umum digunakan adalah pemetaan spasial berbasis data lapangan (interpolasi) dan pemodelan numerik hidrodinamika-kualitas air. Interpolasi membantu menggambarkan pola horizontal berdasarkan titik pengamatan, sedangkan pemodelan memungkinkan analisis mekanisme transport (adveksi-dispersi) pada fase pasang surut tertentu (Pradhan *et al.*, 2022). Oleh karena itu, integrasi keduanya dinilai lebih kuat untuk membaca pola sebaran nitrat di perairan estuari-pesisir. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis konsentrasi dan variasi spasial nitrat di Perairan Betahwalang, (2) menyajikan pola sebaran melalui pemetaan interpolasi, serta (3) menginterpretasikan peran hidrodinamika pasang surut melalui hasil simulasi MIKE 21-EcoLab dengan mempertimbangkan keterbatasan model (DHI, 2022).

MATERI DAN METODE

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Perairan Betahwalang, Demak, Jawa Tengah, yang mencakup wilayah muara Sungai Jajar, zona pesisir, hingga perairan laut lepas. Pengambilan sampel dilaksanakan pada 27 April 2025 dengan kondisi surut menuju pasang di 33 stasiun pengamatan yang merepresentasikan gradien spasial dari muara menuju laut terbuka (Gambar 1). Secara oseanografis kawasan penelitian merupakan sistem estuari dengan pengaruh dominan pasang surut (Ondara *et al.*, 2020).

Pengambilan dan Analisis Sampel Nitrat

Pengambilan sampel air dilakukan secara *in situ* pada 33 stasiun penelitian di lapisan permukaan menggunakan gayung. Sampel dimasukkan ke dalam botol gelap berkapasitas 1000 mL, disimpan dalam *coolbox*. Pada setiap stasiun dilakukan pengukuran parameter lingkungan secara langsung (*in situ*) meliputi suhu, salinitas, dan pH menggunakan *Water Quality Checker*, kecerahan perairan menggunakan secchi disk,

serta oksigen terlarut menggunakan DO meter. Analisis konsentrasi nitrat dilakukan menggunakan metode reduksi kadmium yang mengacu pada Parsons *et al.* (1984) dan SNI 19-6964.7-2003.

Pengumpulan dan Pengolahan Data Pasang Surut

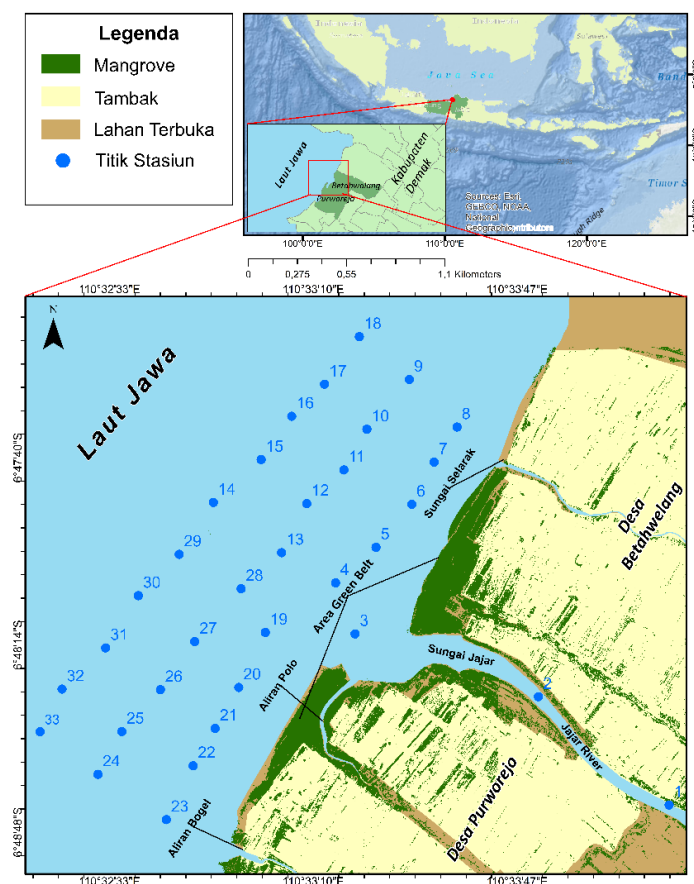
Data pasang surut yang digunakan merupakan data sekunder dari Badan Informasi Geospasial (BIG) pada stasiun pasut Semarang dengan koordinat $6,94775^{\circ}$ LS dan $110,42^{\circ}$ BT. Data tinggi muka air dikonversi satuannya menjadi meter dan waktu pengamatan dalam Waktu Indonesia Barat (WIB). Data pasang surut kemudian diolah menggunakan metode Least Square untuk memperoleh konstanta harmonik pasang surut, grafik elevasi muka air, nilai Formzahl, serta tipe pasang surut. Nilai HHWL ditentukan dari elevasi maksimum, LLWL dari elevasi minimum, sedangkan MSL diperoleh dari rata-rata elevasi muka air laut selama periode pengamatan.

Analisis Distribusi Spasial

Distribusi spasial nitrat dianalisis menggunakan metode interpolasi spline untuk menghasilkan peta sebaran konsentrasi berdasarkan titik pengamatan. Interpolasi spline bekerja dengan membangun fungsi berbasis jarak terhadap titik sampel terdekat yang menghasilkan perubahan nilai secara gradual serta relatif tidak sensitif terhadap posisi spasial data pengamatan, sehingga mampu merepresentasikan variasi lokal secara lebih realistis (Ahmad dan Deeba, 2020; Durotunsha *et al.*, 2026).

Pemodelan Hidrodinamika dan Kualitas Air

Simulasi hidrodinamika dilakukan menggunakan MIKE 21 Flow Model FM dengan pendekatan dua dimensi (2D). Model dibangun berdasarkan data batimetri wilayah penelitian, data pasang surut sebagai kondisi batas, serta data angin sebagai gaya penggerak tambahan. Modul EcoLab 21/3 digunakan untuk mensimulasikan transport dan distribusi nitrat sebagai parameter kualitas air.



Gambar 1. Peta Area Penelitian Nitrat di Perairan Betahwalang

Simulasi hidrodinamika dilakukan melalui pendekatan metode dua dimensi (2D). Model dibangun menggunakan data batimetri, garis pantai, elevasi pasang surut, angin, dan debit sungai sebagai data masukan. Data batimetri diperoleh dari hasil pengukuran lapangan yang dikombinasikan dengan data batimetri InaGeoportal tahun 2024, sedangkan debit sungai diperoleh dari pengukuran *in situ*. Hasil model hidrodinamika berupa elevasi muka air dan arus selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam pemodelan kualitas air menggunakan EcoLab 21/3 untuk mensimulasikan transport dan distribusi nitrat.

Simulasi EcoLab dilakukan pada dua domain pemodelan, yaitu domain sungai dan domain laut. Pada masing-masing domain, konsentrasi nitrat dari stasiun sumber digunakan sebagai input awal dengan mempertimbangkan debit aliran sungai. Hasil simulasi kemudian dievaluasi berdasarkan empat fase pasang surut, yaitu menuju pasang, pasang tertinggi, menuju surut, dan surut terendah. Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data lapangan. Validasi hidrodinamika dilakukan terhadap elevasi pasang surut menggunakan MSE dan RMSE, sedangkan validasi kualitas air dilakukan terhadap konsentrasi nitrat menggunakan RMSE.

HASIL DAN PEMBAHASAN

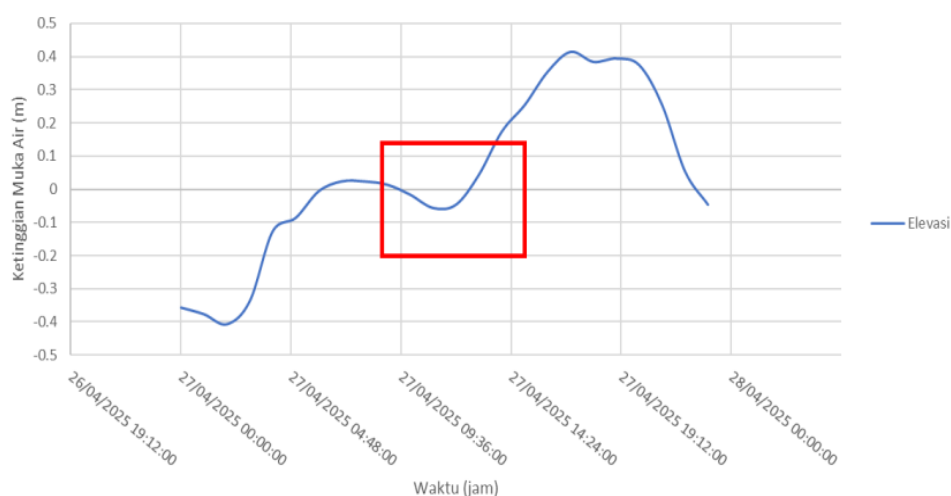
Kondisi Hidrodinamika Perairan terhadap Sebaran Nitrat dan DO

Pengambilan sampel nitrat di Perairan Betahwalang dilakukan pada 27 April 2025. Berdasarkan grafik pasang surut harian dari data Badan Informasi Geospasial (BIG) pada stasiun pasang surut Semarang dengan koordinat 6,94775° LS dan 110,42° BT, kondisi perairan saat pengambilan sampel berada pada fase menuju pasang (*flood tide*) (Gambar 2). Grafik menunjukkan bahwa puncak pasang terjadi pada sore hari dan surut terendah terjadi pada dini hari, sehingga sistem pasang surut di wilayah ini tergolong campuran condong harian tunggal.

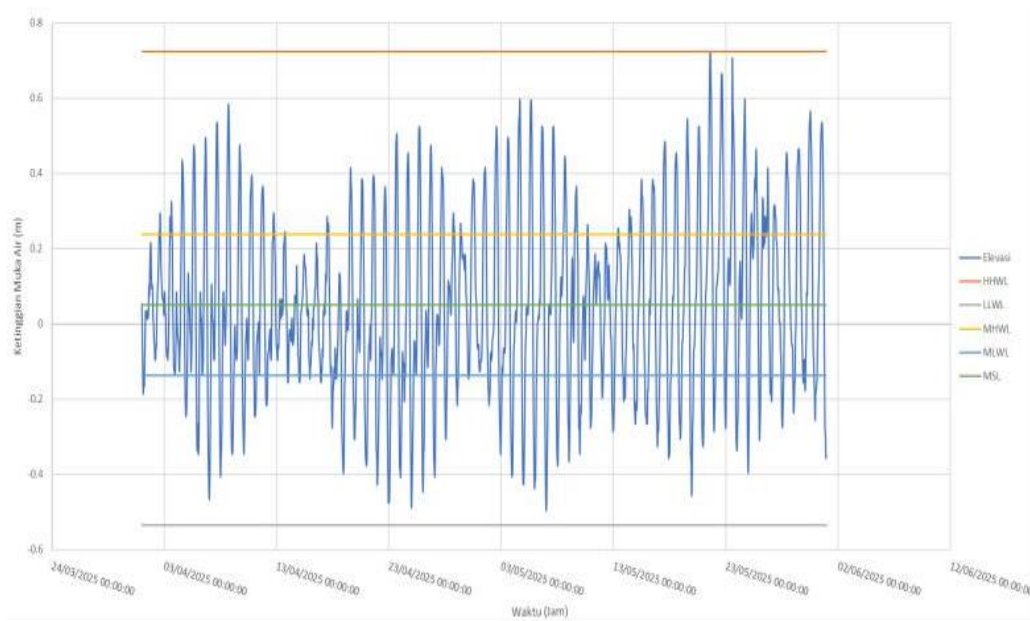
Selanjutnya, pola pasang surut selama periode April–Mei 2025 ditunjukkan pada Gambar 3. Hasil analisis menunjukkan nilai LLWL sebesar -0,535 m, MSL sebesar 0,05 m, dan HHWL sebesar 0,72412 m. Fluktuasi muka air laut yang relatif dinamis ini menunjukkan bahwa sistem estuari Betahwalang dipengaruhi oleh variasi pasang surut yang cukup signifikan, sehingga berpotensi mengontrol proses pencampuran dan distribusi nutrien di wilayah penelitian.

Konsentrasi dan Distribusi Spasial Nitrat dan Kualitas Perairan

Hasil analisis laboratorium menunjukkan bahwa konsentrasi nitrat di Perairan Betahwalang berkisar antara 0,0004–0,2597 mg/L (Tabel 1). Rentang nilai tersebut menunjukkan adanya variasi spasial antarstasiun pengamatan, terutama antara wilayah muara dan perairan yang lebih terbuka. Konsentrasi nitrat tertinggi ditemukan pada stasiun yang berada di sekitar muara Sungai Jajar, sedangkan nilai terendah berada pada stasiun yang mengarah ke laut lepas. Pola ini mengindikasikan adanya gradien konsentrasi dari daratan menuju laut yang merupakan karakteristik umum sistem estuari sebagai zona transisi nutrien (Yogaswara, 2020; Zebua & Halawa, 2024).



Gambar 2. Grafik Pasang Surut Harian Tanggal 27 April 2025 Perairan Betahwalang, Demak



Gambar 3. Grafik Pasang Surut Bulan April-Mei 2025 Perairan Betahwalang, Demak

Konsentrasi tinggi pada wilayah muara mengindikasikan dominasi masukan nutrisi dari aliran sungai dan aktivitas daratan di sekitarnya. Estuari berperan sebagai jalur utama transport nitrogen terlarut dari sistem sungai ke wilayah pesisir (Osadchiv *et al.*, 2020; Surbakti *et al.*, 2022). Gradien penurunan konsentrasi ke arah laut menunjukkan adanya proses pengenceran dan pencampuran massa air laut yang memiliki konsentrasi relatif lebih rendah.

Berdasarkan Tabel 1, stasiun di zona muara menunjukkan konsentrasi yang relatif lebih tinggi dibandingkan stasiun yang berada pada perairan terbuka. Kondisi ini mencerminkan dominasi masukan nitrogen terlarut dari sistem sungai dan aktivitas daratan di sekitarnya. Penurunan konsentrasi menuju laut menunjukkan adanya proses pengenceran akibat pencampuran dengan massa air laut (Osadchiv *et al.*, 2020; Surbakti *et al.*, 2022). Selain nitrat, parameter oksigen terlarut (DO) juga menunjukkan variasi spasial yang signifikan pada wilayah penelitian (Tabel 2). Nilai DO berkisar antara 0,0938–10,500 mg/L, dengan nilai tertinggi ditemukan pada stasiun 16 dan 12 dan terendah berada pada stasiun 21 dan 20. Variasi ini menunjukkan adanya perbedaan kondisi sirkulasi dan proses biogeokimia pada tiap zona perairan. Nilai DO yang sangat rendah (<1 mg/L) pada beberapa stasiun mengindikasikan kemungkinan kondisi hipoksia lokal yang dipengaruhi oleh konsumsi oksigen akibat dekomposisi bahan organik (Moore, 2022; Suhendar *et al.*, 2020).

Untuk memperjelas pola distribusi kedua parameter tersebut secara spasial, hasil interpolasi nitrat dan DO disajikan pada Gambar 4. Perbedaan konsentrasi nitrat antarstasiun menunjukkan bahwa pola sebaran nitrat di Perairan Betahwalang tidak hanya dipengaruhi oleh jarak terhadap muara, tetapi juga oleh kondisi lokal tiap zona perairan. Stasiun 4-6 dan stasiun 19-23 memiliki konsentrasi nitrat yang relatif lebih rendah dibandingkan beberapa stasiun yang lebih mengarah ke laut, seperti stasiun 9, 14-15, dan 26. Rendahnya nitrat pada stasiun 4-6 diduga berkaitan dengan kondisi DO yang relatif tinggi, sehingga nitrat berpotensi dimanfaatkan oleh fitoplankton dalam proses fotosintesis yang turut menghasilkan oksigen (Yunus *et al.*, 2025). Sementara itu, rendahnya nitrat pada stasiun 19-23 dapat dikaitkan dengan posisi stasiun yang berada di zona pesisir dekat vegetasi mangrove dan tambak, sehingga dipengaruhi oleh retensi nutrisi, pengenceran lokal, serta proses biogeokimia di perairan pesisir. Pada kondisi oksigen rendah, nitrat juga dapat berperan sebagai akseptor elektron alternatif dalam proses mikroba, sehingga berpotensi menurunkan ketersediaannya di perairan (Song *et al.*, 2023). Sebaliknya, nilai nitrat yang relatif lebih tinggi pada beberapa stasiun yang mengarah ke laut diduga terjadi akibat redistribusi nutrisi oleh arus pasang surut. Pengambilan sampel yang dilakukan pada fase surut menuju pasang memungkinkan sisa arus surut masih membawa nutrisi ke arah laut, sedangkan perlambatan dan pembalikan arus menuju pasang dapat membentuk akumulasi sementara sebelum nitrat mengalami pengenceran oleh massa air laut.

Tabel 1. Deskripsi statistik konsentrasi nitrat, DO, salinitas, suhu, pH dan kecerahan pada 33 stasiun pengamatan di Perairan Betahwalang

Stasiun	Nitrat (mg/L)	DO (mg/L)	Salinitas (ppm)	Suhu (°C)	pH	Kecenderungan (cm)
1	0,2597	7,87	0,00	30,50	4,31	25,00
2	0,1538	4,51	1,00	29,57	8,06	34,50
3	0,0717	3,66	5,67	31,70	7,93	28,50
4	0,0407	7,74	18,00	31,20	8,62	27,50
5	0,0274	8,45	26,00	31,40	8,33	18,75
6	0,0149	8,58	26,00	30,60	8,22	47,50
7	0,1083	9,39	25,00	29,80	8,24	50,00
8	0,1019	9,08	25,00	30,70	8,14	47,50
9	0,0652	8,91	26,00	31,20	8,24	85,00
10	0,0581	10,04	26,00	30,20	8,15	60,00
11	0,0866	9,60	27,00	31,60	8,10	45,00
12	0,0923	10,20	20,00	31,90	8,12	90,00
13	0,0696	7,44	19,00	36,60	7,94	45,00
14	0,0768	8,91	18,00	34,30	8,00	75,00
15	0,0777	9,86	20,00	33,60	8,12	57,50
16	0,0430	10,50	19,00	32,30	8,13	50,00
17	0,0300	10,38	24,00	32,10	8,14	40,00
18	0,0370	9,77	23,00	34,50	8,02	115,00
19	0,0097	1,82	18,67	31,13	7,97	43,10
20	0,0073	0,09	30,00	30,53	8,16	58,40
21	0,0072	0,09	33,33	31,60	8,39	54,20
22	0,0127	0,10	34,67	31,90	8,47	36,90
23	0,0161	2,17	33,33	32,43	8,61	21,80
24	0,0078	0,10	31,73	35,32	8,42	48,00
25	0,0383	0,10	29,33	35,07	8,61	34,40
26	0,0936	2,94	20,33	36,28	8,42	43,60
27	0,0660	0,11	20,67	33,02	8,19	51,75
28	0,0379	0,11	16,67	33,33	8,20	50,30
29	0,0679	5,92	25,67	33,40	8,34	46,10
30	0,0598	0,11	21,67	32,98	8,27	52,50
31	0,0190	7,10	20,67	34,33	8,24	66,00
32	0,0101	0,10	30,70	32,65	8,38	44,40
33	0,0004	0,10	30,00	33,92	8,59	74,00

Distribusi nitrat dan DO di Perairan Betahwalang menunjukkan pola spasial yang dikontrol oleh interaksi masukan daratan dan dinamika oseanografi. Pengambilan sampel dilakukan pada kondisi menuju pasang (*flood tide*) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, sementara fluktuasi elevasi April-Mei 2025 pada Gambar 3 (LLWL -0,535 m; MSL 0,05 m; HHWL 0,72412 m) serta karakter pasut campuran condong harian tunggal (Formzahl 1,61) menegaskan dominasi pasang surut dalam mengatur pertukaran dan pencampuran massa air. Pada fase ini, intrusi air laut ke muara meningkatkan adveksi dan redistribusi nutrient.

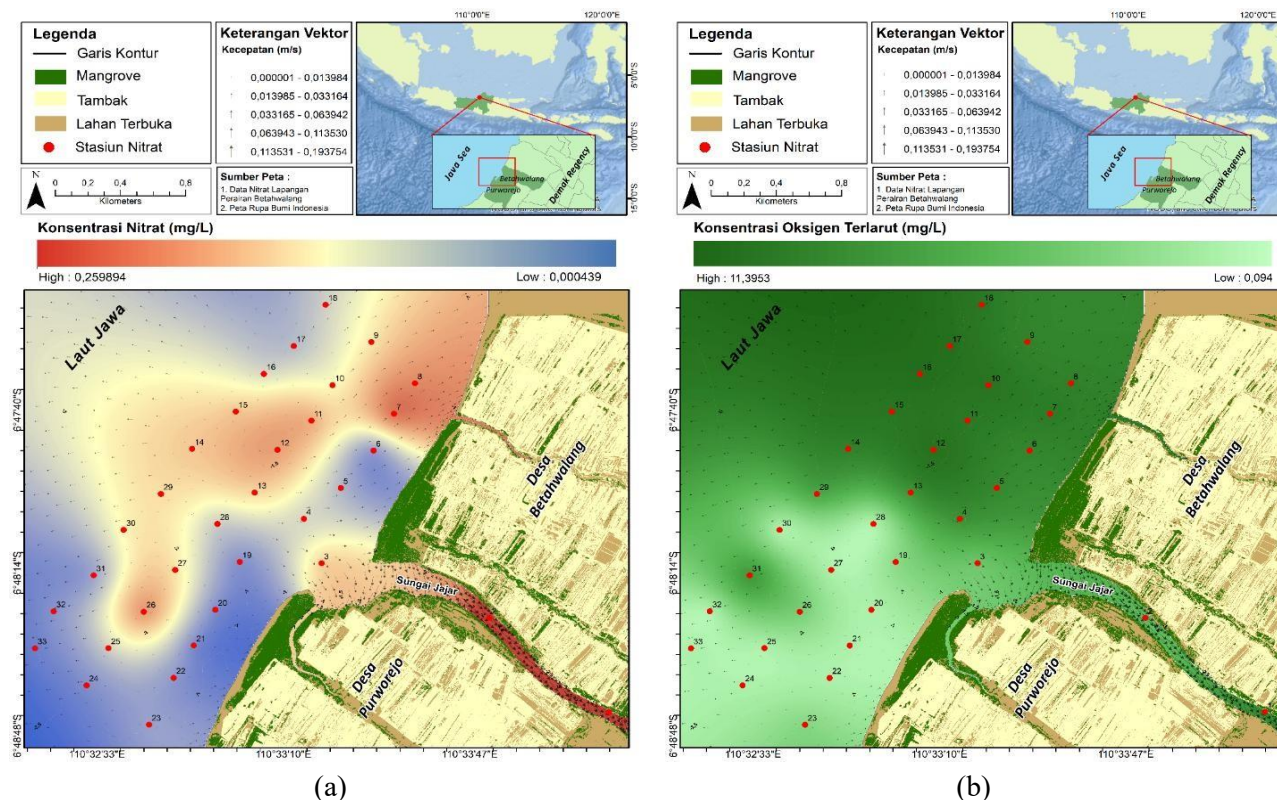
Sebaran nitrat pada 33 stasiun (Tabel 1) berkisar 0,0004-0,2597 mg/L, dengan konsentrasi tertinggi pada stasiun 1 (0,2597 mg/L), diikuti stasiun 2, 7, dan 8. Peta pada Gambar 5a memperlihatkan gradien menurun

dari muara menuju laut lepas. Tingginya nitrat pada stasiun 1-3 berkaitan dengan pengaruh Sungai Jajar sebagai jalur utama transport nutrisi daratan, termasuk potensi limbah organik pengolahan rajungan yang mengalami transformasi biogeokimia di muara. Konsentrasi tinggi pada stasiun 7-8 menunjukkan kontribusi sungai sisi sebelah kanan. Di wilayah mangrove, konsentrasi lebih rendah akibat proses retensi dan denitrifikasi (Adame *et al.*, 2025), sedangkan pada wilayah laut (stasiun 20, 21, 24) terjadi penurunan akibat pengenceran massa air laut (Akbar *et al.*, 2023).

Distribusi DO pada Tabel 2 dan Gambar 4b menunjukkan rentang 0,0938–10,5000 mg/L dengan pola yang lebih dinamis. Pada muara Sungai Jajar (stasiun 2 dan 3), DO relatif rendah (4,5133 dan 3,6600 mg/L), mengindikasikan konsumsi oksigen akibat dekomposisi bahan organik dan nitrifikasi (Yogaswara, 2020). Perbandingan Tabel 1 dan Gambar 4 menunjukkan kecenderungan hubungan negatif pada beberapa lokasi, terutama pada stasiun dengan DO sangat rendah (<1 mg/L) yang tetap memiliki nitrat terdeteksi. Pola ini menunjukkan bahwa peningkatan beban organik mendorong konsumsi oksigen melalui respirasi mikroorganisme (Moore, 2022; Suhendar *et al.*, 2020).

Namun hubungan tersebut tidak bersifat mutlak. Pada stasiun 7-8, nitrat tinggi disertai DO yang tetap tinggi (9,39 dan 9,08 mg/L), menunjukkan bahwa pencampuran dan aerasi alami akibat arus pasut mampu mengimbangi konsumsi oksigen biologis (Manik *et al.*, 2023; Patty *et al.*, 2020). Kecepatan arus saat *flood tide* (0,01–0,19 m/s) memperkuat pertukaran massa air dan mempercepat pengenceran nutrisi, sehingga gradien nitrat menurun ke arah laut terbuka, sementara variasi DO dipengaruhi kombinasi proses fisik dan biogeokimia. Pada beberapa stasiun offshore dengan DO sangat rendah, kondisi tersebut diduga terkait stratifikasi atau sirkulasi lemah (Kisnarti *et al.*, 2025; Telaumbanua, 2025).

Hasil korelasi Pearson pada Tabel 2 menunjukkan nitrat berkorelasi negatif kuat dengan salinitas ($r = -0,729^{**}$) dan pH ($r = -0,761^{**}$), menegaskan dominasi pengaruh air tawar di zona muara (Long *et al.*, 2023). Korelasi nitrat DO relatif lemah ($r = 0,375^{*}$), menunjukkan bahwa hubungan keduanya tidak linier sederhana karena DO dikontrol oleh keseimbangan fotosintesis, respirasi, dekomposisi, serta pencampuran massa air (Moore, 2022). Analisis PCA pada Gambar 5 memperlihatkan stasiun 1-3 searah dengan vektor nitrat (pengaruh daratan), sedangkan stasiun wilayah laut lepas lebih dekat dengan salinitas, DO, dan kecerahan, mencerminkan kontrol oseanografi yang lebih dominan (Akbar *et al.*, 2023; Wahyuni *et al.*, 2021).

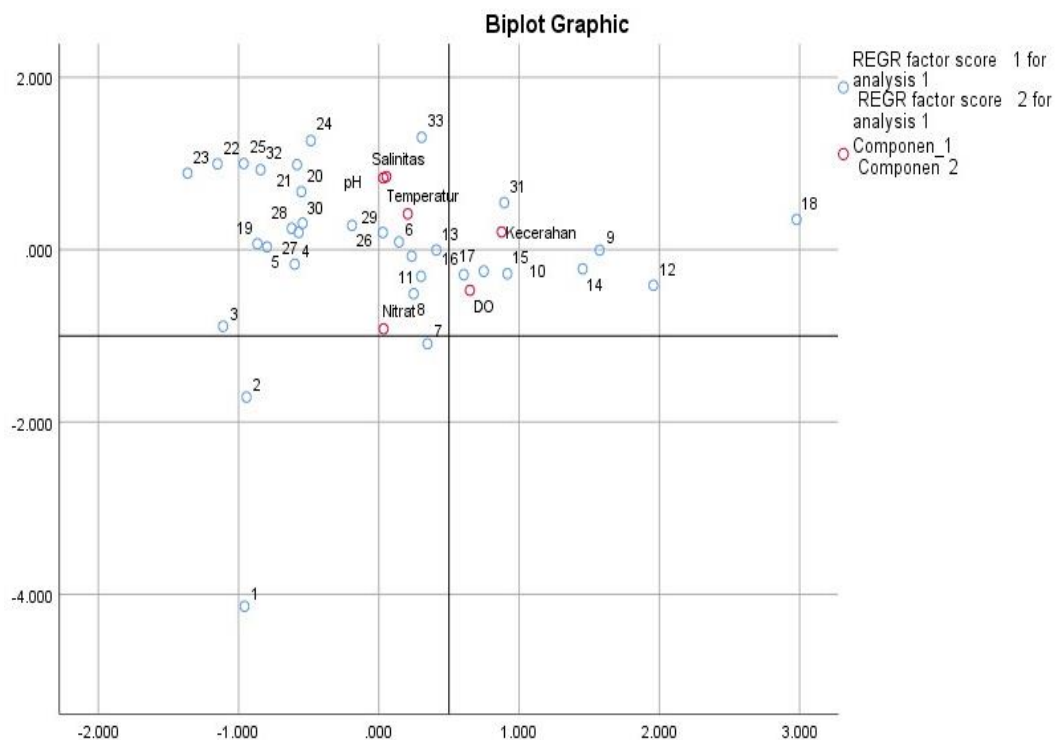


Gambar 4. Peta Sebaran Nitrat (a) dan Oksigen Terlarut (b) Perairan Betahwalang

Tabel 2. Hasil Uji Korelasi Pearson dan Nilai Signifikansi (p-value) antara Nitrat dan Parameter Lingkungan Perairan

Correlations		Nitrat(mg/L)	DO	Salinitas	Temperature	pH	Kecerahan
Nitrat (mg/L)	Pearson Corr.	1	0,375*	-0,729**	-0,243	-0,761**	-0,138
	Sig, (2-tailed)		0,032	0,000	0,173	0,000	0,443
	N	33	33	33	33	33	33
DO	Pearson Corr.	0,375*	1	-0,259	-0,230	-0,227	0,238
	Sig, (2-tailed)	0,032		0,145	0,198	0,205	0,183
	N	33	33	33	33	33	33
Salinitas	Pearson Corr.	-0,729**	-0,259	1	0,165	0,613**	0,153
	Sig, (2-tailed)	0,000	0,145		0,359	0,000	0,396
	N	33	33	33	33	33	33
Temperature	Pearson Corr.	-0,243	-0,230	0,165	1	0,224	0,216
	Sig, (2-tailed)	0,173	0,198	0,359		0,210	0,228
	N	33	33	33	33	33	33
pH	Pearson Corr.	-0,761**	-0,227	0,613**	0,224	1	0,138
	Sig, (2-tailed)	0,000	0,205	0,000	0,210		0,445
	N	33	33	33	33	33	33
Kecerahan	Pearson Corr.	-0,138	0,238	0,153	0,216	0,138	1
	Sig, (2-tailed)	0,443	0,183	0,396	0,228	0,445	
	N	33	33	33	33	33	33

*, Correlation is significant at the 0,05 level (2-tailed), **, Correlation is significant at the 0,01 level (2-tailed)



Gambar 5. Pola Hubungan Parameter Kualitas Perairan Berdasarkan PCA

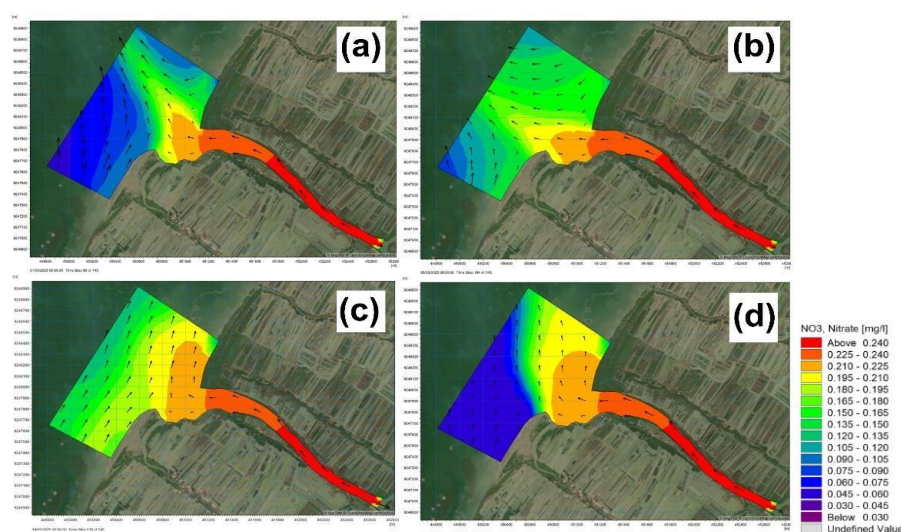
Peran angin selama periode pengamatan relatif kecil (kecepatannya antara 1,5-4,0 m/s) dan kontribusi arus permukaan berkisar antara 1-3%. Pengaruhnya lebih terbatas pada pencampuran lapisan atas dibandingkan sebagai pengontrol utama sebaran nutrisi (Osadchiev *et al.*, 2020). Untuk melihat karakteristik masing-masing stasiun terhadap parameter kualitas air, selanjutnya dianalisis menggunakan prinsip komponen analisis (PCA) (Gambar 5)

Secara keseluruhan, hubungan nitrat dan DO di Betahwalang mencerminkan interaksi kompleks antara masukan daratan, proses biogeokimia (nitrifikasi, respirasi, dekomposisi), serta dinamika pasang surut yang mengontrol adveksi dan pencampuran. Oleh karena itu, keterkaitan keduanya tidak selalu menunjukkan hubungan linier sederhana, melainkan merupakan hasil dinamika estuari yang dikendalikan oleh kombinasi faktor hidrodinamika dan transformasi kimia perairan.

Simulasi Model pada Domain Sungai

Pada domain sungai (Gambar 6), distribusi nitrat menunjukkan konsentrasi relatif tinggi di bagian hulu dan menurun menuju muara mengikuti arah aliran utama. Pada fase menuju pasang (*flood tide*), arus yang masuk ke kanal sungai menyebabkan konsentrasi nitrat dari stasiun 1 sebesar 0,2597 mg/L sebagai input sumber model terdorong dan menyebar mengikuti alur sungai. Nilai debit sebesar 39,4467 m³/s yang digunakan dalam simulasi merupakan hasil perhitungan berdasarkan pengukuran lapangan, yaitu dari luas penampang basah sungai yang ditentukan oleh lebar dan kedalaman rata-rata area pengukuran, kemudian dikalikan dengan kecepatan arus rata-rata. Kondisi ini menunjukkan bahwa intrusi pasang tidak hanya meningkatkan elevasi muka air, tetapi juga memperkuat redistribusi nutrisi sepanjang alur sungai. Yogaswara (2020) menyatakan bahwa intrusi pasang pada sistem estuari dapat meningkatkan pencampuran massa air sehingga nutrisi dari daratan terdispersi mengikuti kanal utama.

Pada saat pasang tertinggi, distribusi nitrat pada domain sungai tampak lebih merata dibandingkan fase menuju pasang. Kondisi ini berkaitan dengan meningkatnya elevasi muka air dan masuknya pengaruh arus pasang dari arah laut, sehingga pencampuran di sekitar muara menjadi lebih besar. Meskipun arah arus di kanal sungai masih cenderung mengikuti alur utama menuju muara, pengaruh pasang terlihat dari meluasnya sebaran nitrat dan meningkatnya redistribusi konsentrasi di sepanjang alur sungai. Hal ini sejalan dengan Yogaswara (2020) yang menyatakan bahwa intrusi pasang pada sistem estuari dapat meningkatkan pencampuran massa air dan redistribusi nutrisi. Pada fase menuju surut dan surut terendah, aliran keluar dari sungai menuju laut terlihat lebih dominan, sehingga sebaran nitrat terdorong ke arah perairan pesisir dan mengikuti arah arus keluar muara. Pola tersebut sesuai dengan Osadchiev *et al.* (2020) yang menjelaskan bahwa perubahan arus selama siklus pasang surut dapat mengontrol transport material terlarut melalui mekanisme adveksi di wilayah estuari.



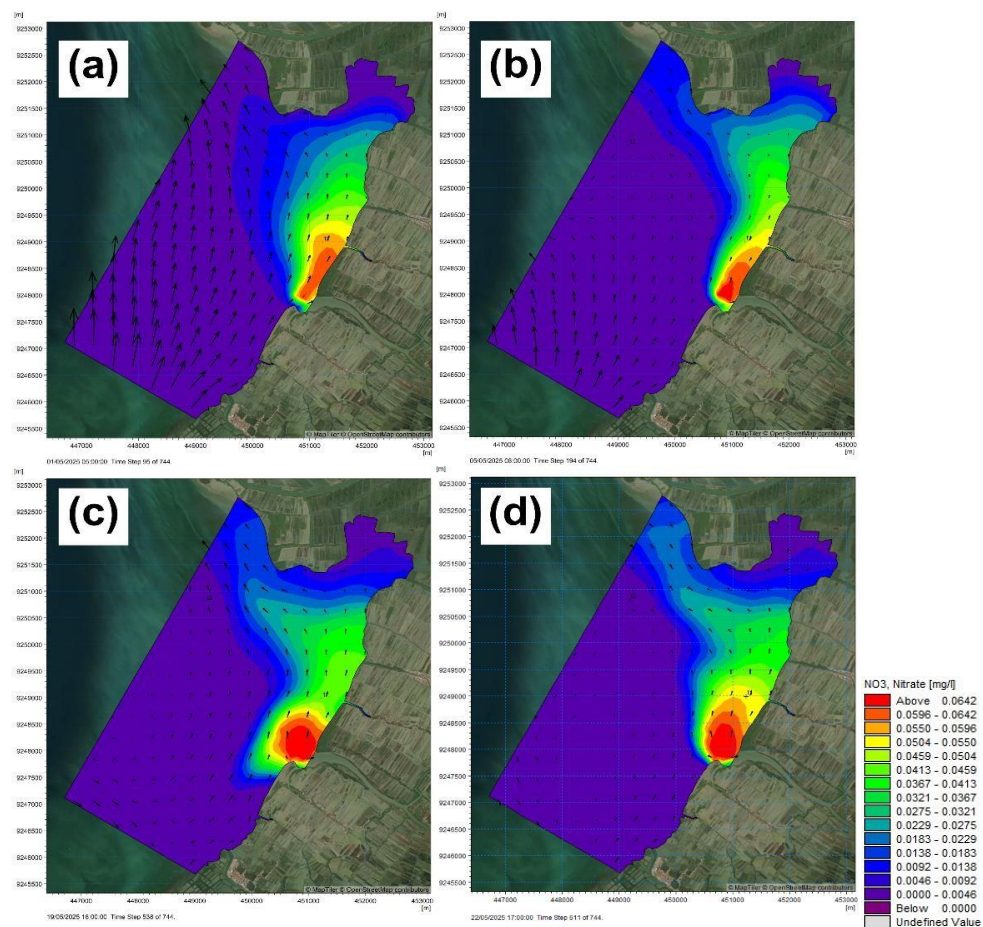
Gambar 6. Hasil Pemodelan Nitrat pada Domain Sungai, (a) Menuju Pasang, (b) Pasang Tertinggi, (c) Menuju Surut, dan (d) Surut Terendah

Validasi model menunjukkan bahwa pada pukul 09.00, nilai simulasi relatif dekat dengan data lapangan di stasiun 1 dan 2, sementara pada stasiun 3–5 model sedikit lebih tinggi, Nilai RMSE sebesar 0,0395 menunjukkan bahwa model masih mampu merepresentasikan tren penurunan konsentrasi secara spasial meskipun terdapat deviasi lokal. Secara umum, pada domain sungai, distribusi nitrat lebih dikontrol oleh kombinasi debit sungai dan dinamika pasut dibandingkan oleh proses dispersi lateral

Simulasi Model pada Domain Laut

Pada domain laut (Gambar 7), distribusi nitrat membentuk plume yang menyebar dari mulut muara menuju perairan lepas dengan konsentrasi lebih rendah dibandingkan domain sungai. Pada fase menuju pasang, arah arus yang cenderung menuju pantai menyebabkan sebagian massa air dengan konsentrasi lebih tinggi tertahan di sekitar muara, sehingga terbentuk zona akumulasi sementara. Sims *et al*, (2022) menjelaskan bahwa peningkatan energi pasang dapat memperbesar pencampuran vertikal dan horizontal, yang pada akhirnya menyebabkan dilusi konsentrasi nutrien di wilayah pesisir.

Pada kondisi pasang tertinggi, area dengan konsentrasi relatif tinggi menyempit akibat pencampuran dengan massa air laut yang lebih rendah konsentrasinya. Stasiun 3 dengan konsentrasi 0,0717 mg/L dan debit 36,6346 m³/s berperan sebagai sumber masukan utama dalam pembentukan plume awal. Ketika memasuki fase menuju surut dan surut terendah, arah arus berubah menjauhi garis pantai sehingga plume nitrat memanjang mengikuti arah transport dominan menuju laut lepas. Pola ini sejalan dengan temuan Pradhan *et al*, (2022) yang menyatakan bahwa interaksi arus pasut dan debit sungai mengontrol arah plume nutrien serta dispersi lateral di wilayah pesisir.

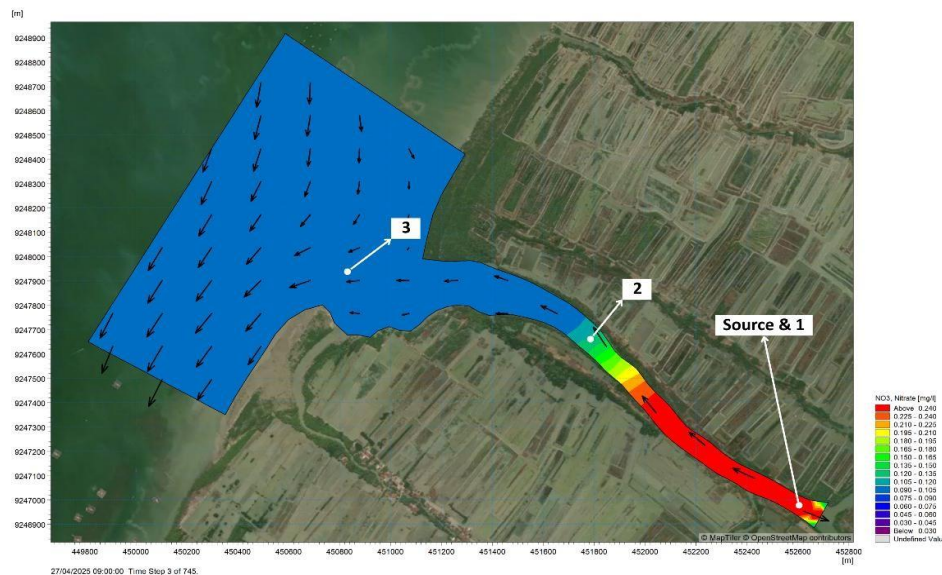


Gambar 7. Hasil Pemodelan Nitrat pada Domain Laut, (a) Menuju Pasang, (b) Pasang Tertinggi, (c) Menuju Surut, dan (d) Surut Terendah

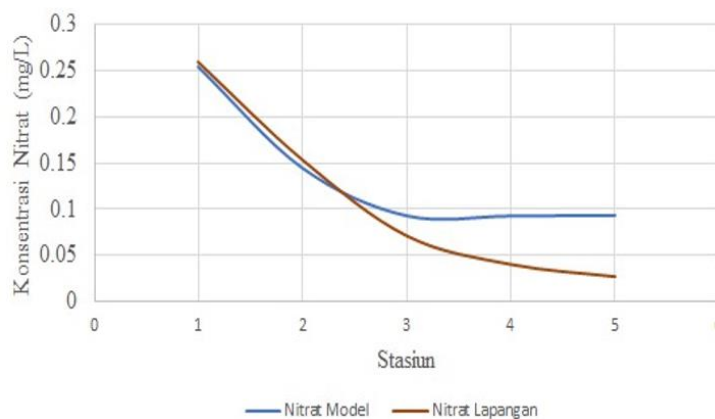
Perbedaan antara nilai model dan lapangan pada stasiun 7–15 yang mencapai 0,07–0,10 mg/L menunjukkan bahwa dinamika pencampuran di laut terbuka lebih kompleks dibandingkan domain sungai. Hal ini dapat dipengaruhi oleh variabilitas arus sejajar pantai, turbulensi lokal, dan interaksi massa air pesisir. Meskipun demikian, nilai RMSE sebesar 0,0509 menunjukkan bahwa model EcoLab masih mampu merepresentasikan karakter umum sebaran nitrat secara spasial.

Integrasi Hasil Lapangan dan Model serta Keterbatasan Simulasi

Integrasi antara hasil lapangan dan simulasi model dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan model hidrodinamika dan EcoLab dalam merepresentasikan dinamika nitrat pada domain sungai dan laut. Gambar 8 menunjukkan domain pemodelan sungai dengan input nitrat dari stasiun 1 sebesar 0,2597 mg/L dan debit sebesar 39,4467 m³/s. Pada fase menuju pasang, arus yang masuk ke kanal sungai mendorong sebaran nitrat mengikuti alur sungai, sedangkan pada fase menuju surut terjadi dorongan massa air dari sungai menuju muara. Pola tersebut menunjukkan bahwa distribusi nitrat pada domain sungai dipengaruhi oleh interaksi antara debit sungai dan arus pasang surut, sesuai dengan mekanisme adveksi estuari (Yogaswara, 2020; Osadchiev *et al.*, 2020). Gambar 9. memperlihatkan validasi nitrat domain sungai, dengan RMSE sebesar 0,039471137. Tren penurunan konsentrasi dari stasiun 1–5 relatif sejalan antara model dan lapangan, meskipun model sedikit lebih tinggi pada bagian hilir,

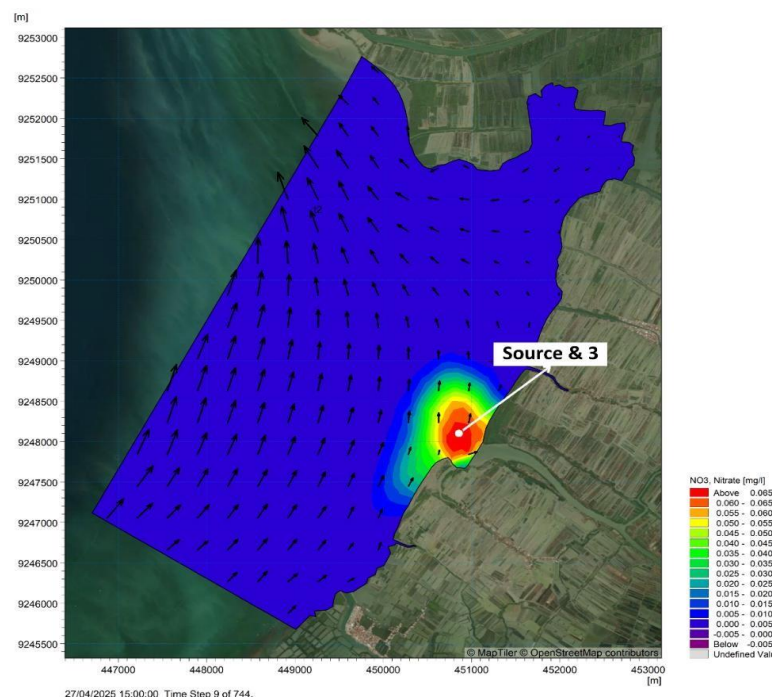


Gambar 8. Domain Pemodelan pada Area Sungai

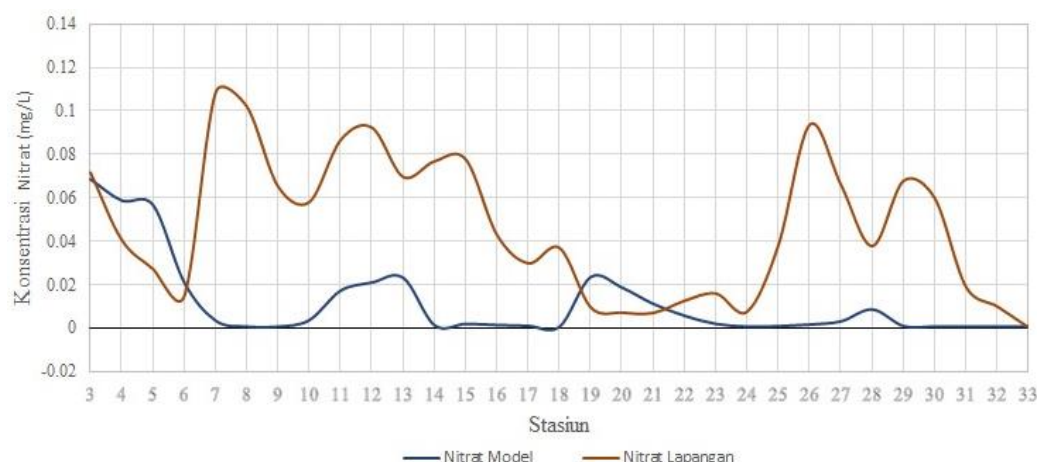


Gambar 9. Grafik Validasi Pemodelan Nitrat pada Wilayah Sungai

Gambar 10. menunjukkan domain laut dengan input awal dari stasiun 3 sebesar 0,0717 mg/L dan debit 36,6346 m³/s. Distribusi membentuk plume dari muara menuju laut lepas; saat pasang sebagian massa air tertahan di pesisir, sedangkan saat surut plume memanjang mengikuti arus dominan (Pradhan *et al.*, 2022). Gambar 11. memperlihatkan validasi nitrat domain laut dengan RMSE sebesar 0,0509. Model mampu menangkap pola umum sebaran, meskipun deviasi pada stasiun 7–15 mencapai 0,07–0,10 mg/L akibat dinamika pencampuran yang lebih kompleks. Secara keseluruhan, integrasi antara hasil interpolasi lapangan dan simulasi model menunjukkan kesesuaian pola umum distribusi, yaitu adanya gradien konsentrasi nitrat dari hulu ke muara dan selanjutnya menuju laut lepas. Data lapangan merepresentasikan kondisi aktual saat pengambilan sampel, sedangkan model menggambarkan dinamika temporal yang dipengaruhi oleh fase pasang surut (Pradhan *et al.*, 2022; Khongmanont *et al.*, 2024). Pada domain sungai, distribusi terutama dikontrol oleh adveksi longitudinal akibat debit dan intrusi pasang. Sebaliknya, pada domain laut, dispersi lateral dan proses pengenceran oleh massa air laut menjadi mekanisme dominan dalam mengatur penyebaran nutrisi,



Gambar 10. Domain Pemodelan pada Area Laut



Gambar 11. Grafik Validasi Pemodelan Nitrat pada Wilayah Laut

Meskipun model mampu merepresentasikan tren spasial secara memadai, hasil simulasi belum dapat dianggap sebagai representasi absolut kondisi perairan. Pendekatan yang digunakan masih bersifat dua dimensi (2D), sehingga distribusi nitrat hanya menggambarkan secara horizontal. Proses vertikal seperti stratifikasi densitas, pertukaran nutrien dari sedimen, serta interaksi dengan oksigen terlarut belum sepenuhnya terakomodasi (Maslukah *et al.*, 2019; Moore, 2022; Wallace *et al.*, 2020). Selain itu, dinamika nitrogen di sistem estuari juga dipengaruhi oleh proses nitrifikasi–denitrifikasi, resuspensi sedimen, dan dekomposisi bahan organik (Rigaud *et al.*, 2018; Suhendar *et al.*, 2020), yang belum seluruhnya dimasukkan dalam parameter model.

KESIMPULAN

Distribusi nitrat di Perairan Betahwalang menunjukkan variasi spasial yang dipengaruhi oleh masukan nutrien dari aliran sungai dan aktivitas pesisir. Konsentrasi nitrat relatif lebih tinggi pada wilayah muara karena menerima masukan dari sungai, tambak, permukiman, dan aktivitas pengolahan hasil perikanan. Sebaliknya, pada stasiun yang menjauhi muara, konsentrasi nitrat umumnya lebih rendah karena mengalami pencampuran dan pengenceran oleh massa air laut. Perbedaan nilai pada beberapa stasiun menunjukkan bahwa sebaran nitrat juga dipengaruhi oleh posisi stasiun, keberadaan mangrove, serta proses biogeokimia lokal. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa arus pasang surut memengaruhi sebaran nitrat melalui pencampuran di sekitar muara dan adveksi massa air dari sungai menuju perairan pesisir saat fase surut. Dengan demikian, sebaran nitrat di Perairan Betahwalang dipengaruhi oleh masukan sungai, aktivitas pesisir, kondisi lingkungan lokal, dan arus pasang surut.

DAFTAR PUSTAKA

- Adame, M. F., Iram, N., Gamboa-Cutz, J. N., & Masqué, P. 2025. Nitrogen Processes within Tropical Mangroves in Australia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 130: e2024JG008335. <https://doi.org/10.1029/2024JG008335>
- Ahmad, N., & Deeba, K. F. 2020. Study of Numerical Accuracy in Different Spline Interpolation Techniques. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 16(5): 687–693.
- Akbar, L. F. S. D., Maslukah, L., & Ismanto, A. 2023. Sebaran Horizontal Nitrat dan Ammonium di Perairan Banjir Kanal Timur Semarang. *Indonesian Journal of Oceanography*, 5(3): 151–157. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v5i3.19042>
- Badan Standardisasi Nasional. 2003. SNI 19-6964.7-2003: Kualitas Air Laut – Bagian 7: Cara Uji Nitrat (NO₃-N) dengan Reduksi Kadmium secara Spektrofotometri. Badan Standardisasi Nasional.
- DHI. 2022. MIKE 21/3 EcoLab Scientific Documentation. Danish Hydraulic Institute.
- Durotunasha, Z. A., Zainuri, M., Maslukah, L., & Fariyah, A. 2026. Sebaran Total Suspended Solid dan Klorofil-A Menggunakan Perbedaan Model Geospasial di Perairan Depan Sungai Bedahan, Kabupaten Pekalongan. *Indonesian Journal of Oceanography*, 8(2): 181–191. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v8i2.31749> (nama penulis "ainuri" dan halaman "181-19" pada sumber diperbaiki mengikuti entri identik sebelumnya — cek ulang)
- Hindaryani, I. P., Zainuri, M., Rochaddi, B., Wulandari, S. Y., Maslukah, L., Purwanto, P., & Rifai, A. 2020. Pola Arus terhadap Sebaran Konsentrasi Nitrat dan Fosfat di Perairan Pantai Mangunharjo, Semarang. *Indonesian Journal of Oceanography*, 2(4): 313–323. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v2i4.8528>
- Khongmanont, K., Yottiam, A., Leelakun, P., Vibhatabandhu, P., & Srithongouthai, S. 2024. Influence of Tidal Phenomena on Nutrient Variations in Water Column of the Chao Phraya River Estuary. *E3S Web of Conferences*, 557: 01005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455701005>
- Kinasih, A. R. N., & Purnomo, P. W. 2015. Analisis Hubungan Tekstur Sedimen dengan Bahan Organik, Logam Berat (Pb dan Cd) dan Makrozoobentos di Sungai Betahwalang, Demak. *Management of Aquatic Resources Journal*, 4(3): 99–107.
- Kisnarti, E. A., Fidhini, F. Z., & Permatasari, I. N. 2025. Sirkulasi Termohalin Global: Tinjauan terhadap Penelitian Terkini dan Implikasinya. *J-Tropimar*, 7(1): 38–52. <https://doi.org/10.30649/jrkt.v7i1.90>
- Long, R., Tian, F., Chen, J. H., Zhou, Y. B., Li, X. F., Li, Y. T., Tang, H. W., & Chen, H. G. 2023. Source Apportionment of Nitrate in the Pearl River Estuary Using $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values and Isotope Mixing Model. *Marine Pollution Bulletin*, 191: 114962. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114962>

- Manik, M. I. S., Perwira, I. Y., & Ernawati, N. M. 2023. Kandungan Nutrien Nitrat dan Fosfat pada Air di Kawasan Estuari DAM, Badung, Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 9(2): 260–267. <https://doi.org/10.24843/jmas.2023.v09.i02.p11>
- Maslukah, L., Indrayanti, E., & Rifai, A. 2014. Sebaran Material Organik dan Zat Hara oleh Arus Pasang Surut di Muara Sungai Demaan, Jepara. *Indonesian Journal of Marine Sciences*, 19(4): 189–194. <https://doi.org/10.14710/ik.ijms.19.4.189-194>
- Maslukah, L., Wulandari, S. Y., Prasetyawan, I. B., & Zainuri, M. 2019. Distributions and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Porewater Sediments in the Estuary of Jepara, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 20(2): 58–64.
- Moore, N. M. 2022. Investigating the Relationship between Dissolved Oxygen and Nitrate Concentration as a Proxy for Marine Ecosystem Health [Master's thesis, University of Texas Rio Grande Valley]. <https://scholarworks.utrgv.edu/etd/1165>
- Ondara, K., Dhiauddin, R., Wishu, U. J., & Rahmawan, G. A. 2020. Hydrodynamics Features and Coastal Vulnerability of Sayung Sub-District, Demak, Central Java, Indonesia. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 5(1). <https://doi.org/10.25299/jgeet.2020.5.1.3996>
- Osadchiev, A., Medvedev, I., Shchuka, S., Kulikov, M., Spivak, E., Pisareva, M., & Semiletov, I. 2020. Influence of Estuarine Tidal Mixing on Structure and Spatial Scales of Large River Plumes. *Ocean Science*, 16: 781–798. <https://doi.org/10.5194/os-16-781-2020>
- Parry, M. J., Zainuri, M., Indrayanti, E., Lukman, A. A., Jihadi, M. S., & Wahyuningsih, C. 2025. Sebaran Nitrat dan Ammonium di Wilayah Mangrove Mojo, Kabupaten Pemalang. *Indonesian Journal of Oceanography*, 7(3): 298–304. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v7i3.26529>
- Parsons, T. R., Maita, Y., & Lalli, C. M. 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press.
- Patty, S. I., Nurdiansah, D., & Akbar, N. 2020. Sebaran Suhu, Salinitas, Kekeruhan dan Oksigen Terlarut di Perairan Laut Tumbak–Benten, Minahasa Tenggara. *Jurnal Ilmu Kelautan Kepulauan*, 3(1): 77–87.
- Pradhan, U., Panda, U. S., Naik, S., Mishra, P., Kumar, D. S., Begum, M., & Murthy, M. V. R. 2022. Coupled Hydrodynamic and Water Quality Modeling in the Coastal Waters off Chennai, East Coast of India. *Frontiers in Marine Science*, 9: 987067. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.987067>
- Ray, R. D., & Susanto, R. D. 2016. Tidal Mixing Signatures in the Indonesian Seas from High-Resolution Sea Surface Temperature Data. *Geophysical Research Letters*, 43: 8115–8123. <https://doi.org/10.1002/2016GL069485>
- Rigaud, S., Deflandre, B., Maire, O., Bernard, G., Duchêne, J. C., Poirier, D., & Anschutz, P. 2018. Transient Biogeochemistry in Intertidal Sediments: New Insights from Tidal Pools in *Zostera noltei* Meadows of Arcachon Bay (France). *Marine Chemistry*, 200: 1–13.
- Salafiyah, L., & Insafitri, I. 2020. Analisa Kandungan Nutrien (Fosfat dan Nitrat) pada Serasah Mangrove Jenis *Rhizophora* sp. dan *Avicennia* sp. di Desa Socah, Bangkalan–Madura. *Juvenil: Jurnal Ilmiah Kelautan dan Perikanan*, 1(2): 168–179.
- Sims, R. P., Bedington, M., Schuster, U., Watson, A. J., Kitidis, V., Torres, R., Findlay, H. S., Fishwick, J. R., Brown, I., & Bell, T. G. 2022. Tidal Mixing of Estuarine and Coastal Waters in the Western English Channel Is a Control on Spatial and Temporal Variability in Seawater CO₂. *Biogeosciences*, 19: 1657–1674. <https://doi.org/10.5194/bg-19-1657-2022>
- Song, W., Hu, C., Luo, Y., Clough, T. J., Wrage-Mönnig, N., Ge, T., Luo, J., Zhou, S., & Qin, S. 2023. Nitrate as an Alternative Electron Acceptor Destabilizes the Mineral Associated Organic Carbon in Moisturized Deep Soil Depths. *Frontiers in Microbiology*, 14: 1120466. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1120466>
- Suhendar, D. T., Zaidy, A. B., & Sachoemar, S. I. 2020. Profil Oksigen Terlarut, Total Padatan Tersuspensi, Amonia, Nitrat, Fosfat dan Suhu pada Tambak Udang Vanamei secara Intensif. *Jurnal Akuatek*, 1(1): 1–11.
- Surbakti, H., Nurjaya, I. W., Bengen, D. G., & Prartono, T. 2022. Kontribusi Massa Air Tawar dari Estuari Banyuasin ke Perairan Selat Bangka pada Musim Peralihan II. *Positron*, 12(1): 29–38. <https://doi.org/10.26418/positron.v12i1.53035>
- Telaumbanua, M. 2025. Pengaruh Oksigen Terlarut (DO) dalam Budidaya Perairan. *PERAUT: Jurnal Perikanan dan Kelautan*, 2(1): 200–206.

- Wahyuni, W. I., Amin, B., & Siregar, S. H. 2021. Analysis of Nitrate, Phosphate and Silicate Content and Their Effects on Planktonic Abundance in the Estuary Waters of Batang Arau. *Asian Journal of Aquatic Sciences*, 4(1): 1–12.
- Wallace, C. D., Sawyer, A. H., Soltanian, M. R., & Barnes, R. T. 2020. Nitrate Removal within Heterogeneous Riparian Aquifers under Tidal Influence. *Geophysical Research Letters*, 47(10): e2019GL085699. <https://doi.org/10.1029/2019GL085699>
- Yogaswara, D. 2020. Distribusi dan Siklus Nutrien di Perairan Estuari serta Pengendaliannya. *Oseana*, 45(1): 28–39.
- Yunus, M., Samawi, M. F., & Jalil, A. R. 2025. The Relationship between Nitrate and Phosphate Nutrients and Phytoplankton Abundance in Coastal Waters: Implications for Ecosystem Dynamics. *Journal of Earth Kingdom*, 2(2): 146–160. <https://doi.org/10.61511/jek.v2i2.2025.1627>
- Zebua, H., & Halawa, E. H. 2024. Peran Estuaria sebagai Habitat Penting bagi Kehidupan Akuatik. *PERAUT: Jurnal Perikanan dan Kelautan*, 2(1): 137–144.
- Zidan, A. A., Wu, Z., Wang, Y., Chen, Y., & Liu, J. 2025. Nutrient Distribution and Nitrate Processing in a Mangrove Tidal Creek Affected by Submarine Groundwater Discharge (SGD). *Marine Pollution Bulletin*, 212: 117575.