

**HUBUNGAN KLOROFIL-a DENGAN NUTRIEN, LOGAM BESI (Fe^{2+}), dan
TEMBAGA (Cu^{2+}) DI PERAIRAN MUARA GEMBONG,
BEKASI, JAWA BARAT.**

SKRIPSI

Oleh

**AGATHA JULAIS
2054221002**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

HUBUNGAN KLOOROFIL-a DENGAN NUTRIEN, LOGAM BESI (Fe^{2+}), dan TEMBAGA (Cu^{2+}) DI PERAIRAN MUARA GEMBONG, BEKASI, JAWA BARAT.

Oleh

AGATHA JULAIS

Muara Gembong merupakan perairan yang menerima tekanan dan beban secara langsung limbah-limbah antropogenik. Penelitian di Muara Gembong bertujuan untuk menganalisis sebaran spasial dan temporal konsentrasi klorofil-a, menganalisis hubungan antara konsentrasi klorofil-a dengan kualitas perairan yang meliputi faktor fisika kimia dan biologi. Sampel air di ambil di perairan Muara Gembong dengan 9 stasiun pengambilan sampel air dengan 6 waktu yang berbeda. Analisis dan pengolahan data dilakukan di Laboratorium Kualitas Air dan Tanah Balai Pengujian Kesehatan Ikan dan Lingkungan (BPKIL) Serang. Pengukuran sampel dilakukan menggunakan Spektrofotometer UV-Vis dan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA). Data sebaran spasial merupakan hasil interpolasi yang dirata-rata terhadap waktu pengambilan yang berbeda. Data sebaran temporal merupakan kumpulan data yang diukur secara berurutan berdasarkan waktu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebaran spasial konsentrasi nitrat dan Fe lebih tinggi di wilayah sungai dan laut. Analisis CCA menunjukkan klorofil-a berkorelasi positif terhadap nitrat, Fe, fosfat, Cu, salinitas, pH dan suhu, sedangkan DO menunjukkan korelasi yang negatif terhadap klorofil-a.

Kata Kunci: CCA, Klorofil-a, Muara Gembong, Nitrat, Spasial.

ABSTRACT

RELATIONSHIP BETWEEN CHLOROPHYLL-a AND NUTRIENTS, IRON (Fe^{2+}), AND COPPER (Cu^{2+}) IN THE WATERS OF GEMBONG ESTUARY, BEKASI, WEST JAVA.

By

AGATHA JULAIS

Muara Gembong is a water that receives direct burden from anthropogenic waste. Purpose of this research to analyze the spatial and temporal distribution of chlorophyll-a concentration and to analyze the relationship between chlorophyll-a concentration and water quality including physical, chemical and biological factors. Water samples were collected from Gembong Estuary waters at 9 sampling stations at 6 different times. Data analysis and processing were carried out at the Water and Soil Quality Laboratory at Balai Pengujian Kesehatan Ikan dan Lingkungan (BPKIL) Serang. Sample assay were carried out using a UV-Vis Spectrophotometer and Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS). Spatial distribution data are a collection of data seasured sequentially based on time. The research results indicate that the spatial distribution of nitrate and Fe concentrations was higher in river and marine areas. CCA analysis showed that chlorophyll-a was positively correlated with nitrate, Fe, phosphate, Cu, salinity, pH, and temperature, while DO showed a negative correlation with chlorophyll-a.

Keywords: CCA, Chlorophyll-a, Gembong Estuary, Nitrate, Spatial.

**HUBUNGAN KLOOROFIL-a DENGAN NUTRIEN, LOGAM BESI (Fe^{2+}), dan
TEMBAGA (Cu^{2+}) DI PERAIRAN MUARA GEMBONG,
BEKASI, JAWA BARAT.**

Oleh

AGATHA JULAIS

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Perikanan dan Kelautan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2024

Judul Skripsi

: HUBUNGAN KLOROFIL-a DENGAN
NUTRIEN, LOGAM BESI (Fe^{2+}), dan
TEMBAGA (Cu^{2+}), DI PERAIRAN MUARA
GEMBONG, BEKASI, JAWA BARAT.

Nama Lengkap

: Agatha Julais

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2054221002

Program Studi

: Ilmu Kelautan

Fakultas

: Pertanian



1. Komisi Pembimbing

Eko Efendi, S.T., M.Si.

NIP. 197803292003121001

Sofian Ansori, S.Si., M.Si.

NIP. 199101042015031001

2. Ketua Jurusan Perikanan dan Kelautan

Munti Sarida, S.Pi., M.Sc., Ph.D.

NIP. 198309232006042001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

Eko Efendi, S.T., M.Si.



Sekretaris

Sofian Ansori, S.Si., M.Si.



Penguji bukan pembimbing : Dr. Moh. Muhaemin, S.Pi., M.Si.



2. Dekan Fakultas Pertanian



Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P.

NIP. 196411181989021002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 11 Desember 2024



KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS LAMPUNG
FAKULTAS PERTANIAN
JURUSAN PERIKANAN DAN KELAUTAN

Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung 35145 Telp (0721) 704946 Fax (0721) 770347

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam naskah skripsi yang berjudul **“Hubungan Klorofil-a Dengan Nutrien, Logam besi (Fe), Tembaga (Cu) di Perairan Muara Gembong, Bekasi, Jawa barat.”** tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh pihak lain untuk mendapatkan karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebut dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata dalam naskah skripsi ini ditemukan dan terbukti terdapat unsur-unsur fabrikasi, falsifikasi, plagiat dan konflik kepentingan saya bersedia skripsi ini digugurkan dan gelar akademik yang telah saya peroleh (S1) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (Undang-Undang Nomor 20 Tahun 2003, Pasal 25 ayat 2 dan Pasal 70).

Bandar Lampung, Mei 2025

Yang membuat pernyataan



Agatha Julais
NPM. 2054221002

RIWAYAT HIDUP

Penulis bernama lengkap Agatha Julais, lahir di Kecamatan Duren Sawit, Kota Jakarta Timur, Provinsi DKI Jakarta pada 17 Agustus 2002. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Sumerambah, S.E. dan Ibu Indriati, S.E. dan memiliki seorang kakak bernama Widyadhari Indrani Suma.

Penulis memulai pendidikan dasar di SDN 05 Mangunjaya pada tahun 2008, kemudian melanjutkan pendidikan di SMPN 3 Tambun Selatan pada tahun 2014 dan SMAN 7 Tambun Selatan pada tahun 2017. Kemudian Penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang tinggi di Program Studi Ilmu Kelautan, Jurusan Perikanan dan Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung pada tahun 2020 melalui jalur SMMPTN. Selama menjadi mahasiswa, penulis mengikuti beberapa kegiatan organisasi yang ada di kampus, seperti Himpunan Mahasiswa Perikanan dan Kelautan (HIMAPIK) dan organisasi Unit Kegiatan Mahasiswa Tapak Suci Universitas Lampung.

Penulis pernah menjadi asisten dosen mata kuliah Mikrobiologi Laut pada tahun 2022 dan Oseanografi Biogeokimia pada tahun 2024. Beberapa kegiatan lain yang pernah dilaksanakan penulis diantaranya kegiatan Magang Konservasi Laut di Balai Taman Nasional Kepulauan Seribu pada bulan Januari-Februari tahun 2022, kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Sukapura, Kecamatan Sumberjaya, Kabupaten Lampung Barat, kegiatan Merdeka Belajar-Kampus Merdeka (MBKM) riset dan Praktik Umum (PU) di Balai Pengujian Kesehatan Ikan dan Lingkungan (BPKIL) Serang pada bulan Februari-September 2023.

*Sincerely, to my beloved parents who never stops loving me with eternal love, and
who I love the most my entire life.*

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis ucapkan atas kehadiran Allah SWT karena atas Rahmat dan hidayah-Nya skripsi ini dapat diselesaikan.

Skripsi dengan judul “Hubungan Klorofil-a Dengan Nutrien, Logam Besi (Fe^{2+}), dan Tembaga (Cu^{2+}) Di Perairan Muara Gembong, Bekasi, Jawa Barat.” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains di Universitas Lampung.

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P., selaku Dekan FP Unila;
2. Munti Sarida, S.Pi., M.Sc., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Perikanan dan Kelautan;
3. Eko Efendi, S.T., M.Si., selaku Pembimbing Utama;
4. Sofian Ansori, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing kedua;
5. Dr. Moh. Muhaemin, S.Pi., M.Si., selaku Dosen Pembahas skripsi;
6. Oktora Susanti, S.Pi., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik;
7. Kepada kedua orang tua saya, Sumerambah dan Indriati;
8. Seluruh pegawai Balai Pengujian Kesehatan Ikan dan Lingkungan (BPKIL) Serang;

Bandar Lampung, Juni 2025

Agatha Julais
NPM. 2054221002

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	2
1.2. Tujuan Penelitian	2
1.3. Manfaat Penelitian	3
1.4. Kerangka Pikir	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Produktivitas Primer	5
2.1.1. Fitoplankton	6
2.1.2. Klorofil-a.....	7
2.2. Nutrien	9
2.2.1. Nitrat (NO_3^-)	10
2.2.2. Fosfat (PO_4^{3-}).....	12
2.2.3. Fe^{2+}	13
2.2.4. Cu^{2+}	15
III. METODE PENELITIAN	18
3.1. Waktu dan Tempat.....	18
3.2. Alat dan Bahan	19
3.3. Pengambilan Data Kualitas Air	22
3.4. Pengujian Sampel	22
3.4.1. Pengujian Nitrat	22
3.4.2. Pengujian Fosfat	24
3.4.3. Pengujian Klorofil-a	25
3.4.4. Pengujian Logam Fe	26
3.4.5. Pengujian Logam Cu	27
3.5. Analisis Data	29
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1. Pola Sebaran Spasial Konsentrasi Nutrien dan Klorofil-a.....	31
4.2. Variabilitas Temporal Klorofil-a, Nitrat dan Fosfat	38
4.3. Variabilitas Temporal Klorofil-a, Fe dan Cu.....	42
4.4. Hubungan Klorofil-a dan Kualitas Perairan	48
V. SIMPULAN DAN SARAN	51
5.1. Simpulan.....	51
5.2. Saran	51

DAFTAR PUSTAKA	52
LAMPIRAN.....	68

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Lokasi pengambilan sampel di perairan Muara Gembong	18
2. Alat pengambilan sampel.....	19
3. Alat pengujian sampel.....	20
4. Bahan pengujian sampel	21

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pikir.....	4
2. Rantai struktur klorofil-a.....	7
3. Siklus nitrogen di perairan laut	10
4. Proses mineralisasi di perairan.....	11
5. Siklus fosfor di laut	12
6. Siklus Fe biologis di lapisan atas dan laut dalam di Samudra Pasifik subarktik terbuka.....	15
7. Siklus Cu di lautan global	16
8. Ringkasan intraseluler interaksi antara Besi, N, Mn, Cu dan Cahaya dalam fitoplankton.	17
9. Lokasi penelitian.	18
10. Peta sebaran konsentrasi nitrat.	31
11. Peta pola sebaran konsentrasi fosfat.	33
12. Peta pola sebaran konsentrasi Fe.	34
13. Peta pola sebaran konsentrasi Cu.	35
14. Peta pola sebaran konsentrasi klorofil-a.	37
15. Pola temporal nitrat, fosfat dan klorofil-a (a) stasiun 1 (b) stasiun 2 (c) stasiun 3 (d) stasiun 4 (e) stasiun 5 (f) stasiun 6 (g) stasiun 7 (h) stasiun 8 (i) stasiun 9.	40
16. Pola temporal Fe, Cu dan klorofil-a (a) stasiun 1 (b) stasiun 2 (c) stasiun 3 (d) stasiun 4 (e) stasiun 5 (f) stasiun 6 (g) stasiun 7 (h) stasiun 8 (i) stasiun 9.	43
17. Biplot hubungan klorofil-a dengan kualitas air dan nutrien.....	48

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Dokumentasi kegiatan pengujian sampel.....	69
2. Hasil pengukuran parameter in situ di perairan Muara Gembong.	71
3. Analisis CCA	72

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Wilayah pesisir merupakan wilayah yang paling ditinjau dari berbagai sudut pandang perencanaan dan pengelolaan (Hamuna et al., 2018). Muara Gembong merupakan perairan yang terletak di kecamatan Muara Gembong, Provinsi Jawa Barat, Indonesia yang berada di sepanjang pesisir. Kecamatan di mekarkan dari kecamatan Cabangbungin pada tanggal 24 Desember 1981 melalui Peraturan Pemerintah (PP) nomor 53 tahun 1981. Wilayah pesisir Muara Gembong berada pada posisi geografis 6°00'-6°05' Lintang Selatan dan 106°57'-107°02' Bujur Timur dan merupakan kecamatan yang terdapat di utara Kabupaten Bekasi dengan luas wilayahnya sebesar 122,90 km² (Nastiti et al., 2019). Kecamatan Muara Gembong mempunyai batas administrasi bagian utara dengan Laut Jawa, bagian selatan Kecamatan Cabangbungin dan Kecamatan Sukawangi, sedangkan bagian Timur berbatasan dengan Kabupaten Karawang Barat.

Muara Gembong merupakan perairan yang menerima tekanan dan beban secara langsung limbah-limbah antropogenik seperti limbah industri dari darat maupun laut (Pratama, 2022). Buangan limbah, salah satunya limbah besi (Fe) masuk ke perairan sehingga pencemaran meningkat (Pratama, 2022) hal tersebut termasuk aktivitas yang menghasilkan Fe. Buangan limbah industri sumber air yang masuk ke sungai lalu terbawa ke muara sungai (Hutagalung, 2018) hal tersebut akan menurunkan kualitas perairan.

Kualitas air yang buruk bisa menghambat faktor produktivitas primer untuk perairan. Tingkat produktivitas suatu perairan dapat diukur dengan melimpahnya fitoplankton (Mustofa, 2015). Salah satu faktor yang memengaruhi produktivitas perairan adalah tercukupinya zat hara yang dibutuhkan (Mustofa, 2015). Selain zat hara yang dibutuhkan oleh fitoplankton, klorofil-a juga merupakan fak-

tor yang sangat dibutuhkan untuk menentukan produktivitas primer di laut.

Fitoplankton membutuhkan nutrisi untuk pertumbuhan. Nutrisi merupakan elemen kimia penting yang dibutuhkan fitoplankton untuk tumbuh dan berkembang. Nutrisi dikelompokkan menjadi dua kelompok besar, yakni makro nutrisi dan mikro nutrisi. Makro nutrisi adalah nutrisi dibutuhkan dalam jumlah yang banyak salah satunya adalah N dan P (Mustofa, 2015). Mikro nutrisi adalah nutrisi yang dibutuhkan dalam jumlah sedikit salah satunya adalah Fe dan Cu (Mustofa, 2015).

Hubungan antara Fe, Cu dan klorofil telah banyak diteliti pada tingkat global Greene et al. (1991); Maldonado et al. (2000); Rivaro et al. (2011); Schoffman et al. (2016) dan Semeniuk et al. (2016) menilai bahwa Cu dapat berperan penting sebagai elemen bioaktif yang dapat berperan dalam pertumbuhan fitoplankton, namun menurut Sunda, (2012) penurunan Cu diiringi oleh penurunan nitrat.

Penelitian tentang Fe, Cu dan nutrisi di perairan laut dan pesisir masih terbatas, seperti Coale, (1991); Sunda & Huntsman, (2004). Di Indonesia, penelitian tentang Fe dan Cu diantaranya Bahril et al. (2019); Permata et al. (2018); Supriyantini & Endrawati, (2015) yang meneliti Fe dan Cu sebagai logam berat, serta hanya Suratri, (2021) yang meneliti Fe sebagai mikronutrisi. Penelitian tentang nutrisi pada perairan Muara Gembong hanya baru dilakukan oleh Nastiti et al. (2020) namun jenis nutrisi yang diteliti hanya nitrat dan fosfat, sedangkan Fe dan Cu belum pernah dilakukan. Oleh karena itu, keberadaan Fe, Cu sebagai nutrisi mikro esensial perlu dikaji hubungannya dengan nutrisi terhadap konsentrasi klorofil-a.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan melakukan penelitian yaitu menganalisis sebaran spasial dan temporal konsentrasi Fe, Cu, nitrat, fosfat dan klorofil-a yang ada di perairan Muara Gembong, dan menganalisis korelasi klorofil-a dan faktor fisika kimia perairan Muara Gembong.

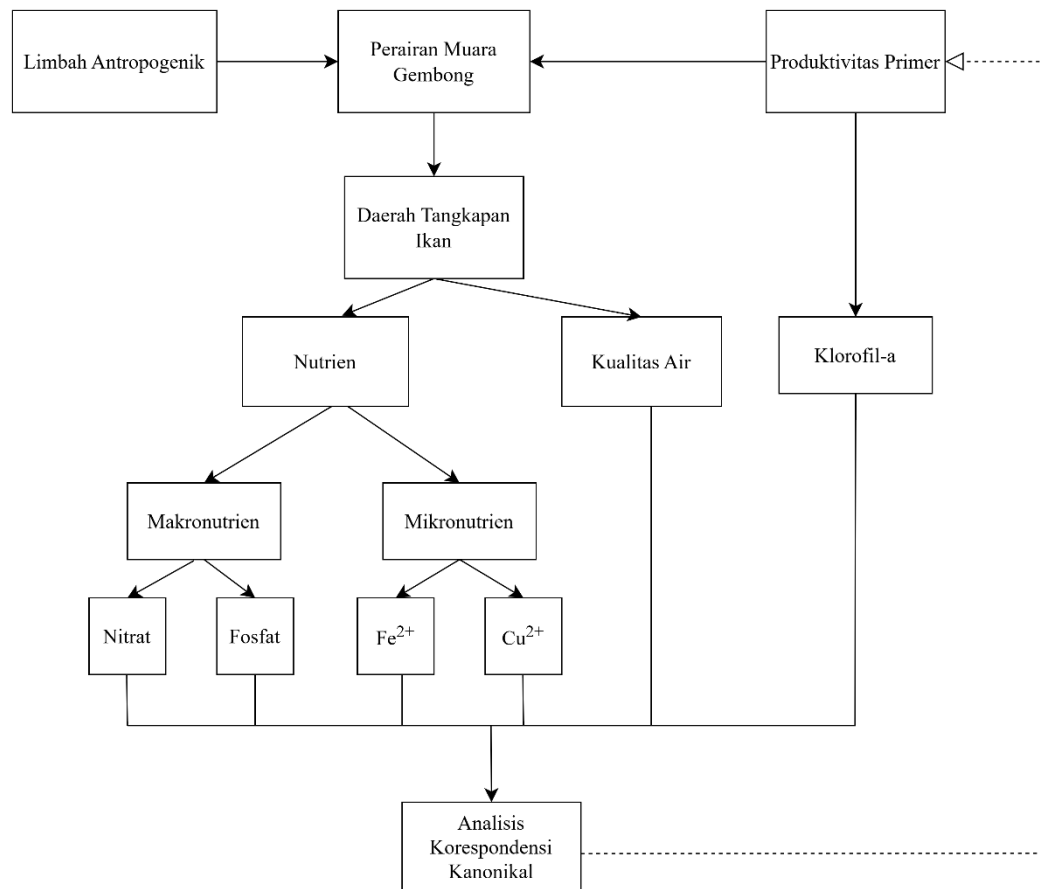
1.3. Manfaat Penelitian

Penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai bahan referensi ilmiah yang dapat digunakan sebagai landasan bagi pemangku kebijakan lingkungan hidup di Perairan yang terdapat di sekitar Muara Gembong, Bekasi.

1.4. Kerangka Pikir

Perairan Muara Gembong merupakan perairan laut Bekasi yang merupakan salah satu wilayah yang banyak dimanfaatkan oleh masyarakat sekitar Bekasi. Wilayah perairan Muara Gembong dalam Peraturan Daerah No. 5 Tahun 2019 tentang Peraturan Daerah Provinsi Jawa Barat Nomor 5 Tahun 2019 Tentang Rencana Zonasi Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil Provinsi Jawa Barat Tahun 2019-2039. Produksi mulai menurun perikanan tangkap yang ada di wilayah perairan Muara Gembong diduga karena berkurangnya produktivitas primer perairan yakni pencemaran oleh Fe dan Cu, berkurangnya nutrien yang ada untuk proses tumbuh dan berkembangnya organisme di laut itu sendiri. Salah satu parameter yang sangat menentukan produktivitas primer di laut, karena fitoplankton mampu berfotosintesis dengan adanya pigmen klorofil yang terkandung didalamnya dengan bantuan sinar matahari. Keberadaan klorofil di dalam sel fitoplankton sangat menentukan kelangsungan rantai makanan dalam suatu ekosistem (Marlian et al., 2015).

Fe dan Cu di perairan berperan sebagai mikronutrien penting bagi pertumbuhan fitoplankton dan ketersediannya bisa membantu klorofil-a untuk menjadi nutrisi dalam kesuburan perairan dalam jumlahnya yang sedikit. Kualitas air seperti suhu, salinitas, pH, DO juga berpengaruh pada pertumbuhan dan fotosintesis klorofil-a di Perairan. Hubungan Fe, Cu, nutrien, kualitas air dan klorofil-a dianalisis menggunakan analisis koresponden kanonikal. Secara singkat kerangka pikir penelitian disajikan pada (Gambar 1).



Gambar 1. Kerangka pikir.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Produktivitas Primer

Produktivitas primer adalah produksi jumlah bahan organik oleh organisme autotrof, yaitu organisme yang mampu menghasilkan bahan organik dari bahan anorganik dengan bantuan energi matahari (Abigail et al., 2015). Prinsip produksi primer adalah laju fiksasi fotosintesis karbon oleh organisme yang mengandung klorofil (Racault et al., 2017; Mouw et al., 2017). Tingkat produksi primer dalam ekosistem laut tercermin dalam banyak sifat permukaan laut yang diatur oleh proses biologis, seperti: kandungan klorofil, jumlah fosfat yang menandakan ketersediaan nutrisi, dan kelimpahan organisme planktonik (Racault et al. 2017; Mouw et al., 2017).

Produksi primer didasarkan pada jumlah radioaktif ^{14}C , yang diserap oleh organisme tumbuh di air laut, dalam waktu tertentu, dalam kondisi yang sesuai termasuk tingkat radiasi yang tepat (Mouw et al., 2017). Produktivitas laut sebagian besar mengacu pada produksi bahan organik oleh fitoplankton, tanaman yang tersuspensi di laut, yang sebagian bersel tunggal (Moreau et al., 2020). Bahan organik yang mengendap di dasar laut digunakan oleh komunitas fauna benthik, kemudian didaur ulang menjadi nutrisi terlarut dan tersedia untuk produksi primer (Moreau et al., 2020).

Massa air yang mempunyai salinitas yang tinggi, suhu yang rendah dan kaya nutrisi memberikan dampak positif terhadap tingkat kesuburan perairan. Kondisi tersebut memicu peningkatan produktivitas primer. Sebaran nutrisi pada perairan dipengaruhi oleh intensitas cahaya. Nutrien dan intensitas cahaya akan memengaruhi tingkat klorofil-a perairan dan kelimpahan dari fitoplankton

(Abigail et al., 2015). Cahaya dan klorofil merupakan komponen utama dalam fotosintesis, maka secara langsung juga berperan terhadap nilai produktivitas primer pada perairan tersebut (Lange et al., 2018). Tingkat produktivitas primer dapat ditentukan oleh kelimpahan fitoplankton dan konsentrasi klorofil-a pada perairan tersebut dan proses fotosintesis yang terjadi (Abigail et al., 2015).

Nutrien yang sangat penting termasuk nitrogen (N), fosfor (P), besi (Fe) dan silicon (Si) (Moreau et al., 2020). Besi hanya ditemukan dalam biomassa kecil, namun digunakan untuk beragam keperluan penting dalam organisme (Moreau et al., 2020). Konsentrasi bahan organik terlarut kromoforik di perairan dekat pantai bisa sangat tinggi (Arrigo et al. 2011) senyawa-senyawa tersebut menyerap dengan kuat pada panjang gelombang biru tetapi lebih sedikit pada gelombang hijau, seperti halnya molekul fitoplankton klorofil (Chl a) (Arrigo et al., 2011).

2.1.1. Fitoplankton

Fitoplankton merupakan salah satu parameter yang sangat menentukan produktivitas primer di laut, (Aryawati & Thoha, 2011). Sel-sel fitoplankton masih hidup ditemukan di perairan lebih dalam walaupun dalam konsentrasi rendah, tetapi fotosintesis membatasi pertumbuhan aktif fitoplankton (Moreau et al., 2020). Interaksi antar nutrisi dan cahaya dapat mengontrol produktivitas (Moreau et al., 2020). Tingkat cahaya yang rendah di perairan mengharuskan fitoplankton meningkatkan konsentrasi pigmen selulernya agar mampu menyerap cahaya yang cukup untuk pertumbuhan yang baik (Arrigo et al., 2011). Sebaran konsentrasi fitoplankton yang tinggi di perairan akibat dari tingginya masukan nutrisi yang berasal dari daratan melalui limpasan air sungai dan sebaliknya cenderung rendah di daerah lepas pantai (Aryawati & Thoha, 2011).

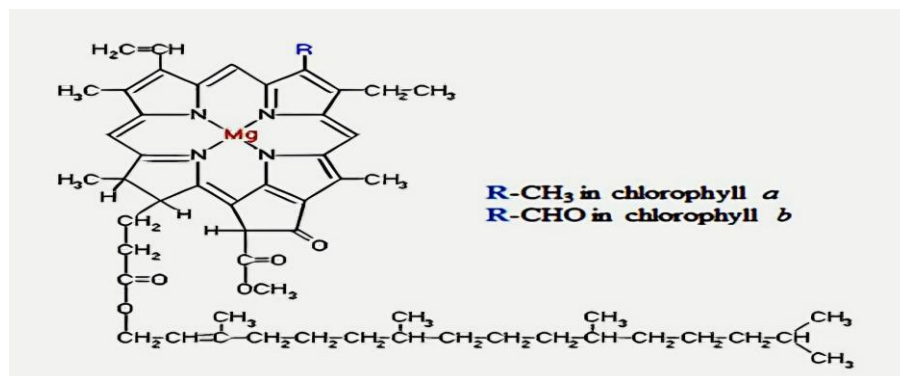
Pertumbuhan fotosintesis fitoplankton yang optimum terjadi pada suhu lingkungan yang sesuai dengan suhu tolerannya, dimana laju pertumbuhan meningkat bila suhu air meningkat sesuai dengan suhu tolerannya (Thomas et al., 2017) oleh karena itu, dinamika parameter kualitas air mempengaruhi tingkat proses produktivitas primer (Abigail et al., 2015). Menurut penelitian Aryawati & Thoha (2011) dikatakan bahwa fitoplankton mengandung klorofil-a sehingga

tinggi rendahnya kelimpahan fitoplankton dapat mempengaruhi besar kecilnya kandungan klorofil-a di suatu perairan.

2.1.2. Klorofil-a

Klorofil-a merupakan pigmen aktif yang sangat penting dalam proses fotosintesis dan pembentukan bahan organik di perairan. Keberadaannya di dalam sel fitoplankton sangat menentukan kelangsungan rantai makanan dalam suatu ekosistem (Marlian et al., 2015). Menurut Gupta, (2014) kandungan klorofil-a dalam suatu perairan dapat digunakan sebagai indikator tingkat kesuburan perairan, sebagai petunjuk ketersediaan nutrisi di perairan. Kandungan klorofil-a dalam suatu perairan juga dapat berperan sebagai indikator terjadinya eutrofikasi di suatu perairan (Lefcheck et al., 2018).

Klorofil-a merupakan bentuk spesifik klorofil yang digunakan dalam fotosintesis oksigenik. Klorofil-a mudah larut dalam etil alkohol, etil eter, aseton, kloroform, dan karbon disulfida dan berwarna hijau biru dalam pelarut-pelarut tersebut. Komposisi klorofil-a yang ditunjukkan (Gambar 2) adalah $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$ sedangkan klorofil-b adalah $C_{55}H_{70}O_6N_4Mg$, masing-masing dengan atom Mg sebagai



Gambar 2. Rantai struktur klorofil-a.
(Sumber: Permadi et al., 2022).

pusat. Klorofil-a mempunyai berat molekul 893 dan klorofil-b mempunyai berat molekul 907 (Riyono, 2007). Klorofil-b merupakan pigmen fotosintesis utama yang terdapat pada tumbuhan hijau, alga hijau dan beberapa *cyanobacteria* (Kunugi et al., 2016). Klorofil-b memiliki struktur yang sama dengan klorofil-a tetapi terdapat perbedaan yaitu klorofil-b memiliki gugus aldehida (-CHO) pada

posisi C-7, sementara klorofil-a memiliki gugus metil ($-\text{CH}_3$) pada posisi yang sama. Perbedaan ini mengakibatkan sifat penyerapan cahaya yang berbeda (Chen, 2014).

Klorofil-a mengandung ion magnesium yang ditemukan didalam struktur cincin klorin. Cincin klorin merupakan senyawa heterosiklik yang tersusun dari pirola. Empat atom nitrogen dari cincin klorin mengelilingi dan mengikat atom magnesium (Kobayashi & Masuda, 2016). Klorofil berperan untuk menangkap cahaya yang jumlahnya berbeda untuk tiap spesies. Sintesis klorofil dipengaruhi oleh beberapa faktor, yakni seperti cahaya, karbohidrat, air, temperatur, faktor genetik, unsur hara seperti N, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, S dan O (Hendriyani & Setiari, 2009). Kandungan klorofil-a merupakan gambaran dari kelimpahan fitoplankton di perairan (Taqwa et al., 2010).

Tingginya konsentrasi klorofil-a di perairan pantai dan pesisir disebabkan oleh adanya suplai nutrien dalam jumlah besar yang berasal dari daratan (*run off*) melalui perairan sungai, sedangkan rendahnya konsentrasi klorofil-a di perairan lepas pantai karena tidak adanya suplai nutrien dari daratan secara langsung (Marlian et al., 2015). Fungsi dari klorofil-a di perairan adalah laju fotosintesis yang terjadi di dalam laut mendapat penyinaran dengan intensitas cahaya tertentu (Abigail et al., 2015).

Kandungan klorofil-a adalah salah satu parameter biologi yang sangat banyak dipengaruhi oleh beberapa variabel yang saling berinteraksi di laut. Hatta (2014) menyatakan bahwa suhu yang lebih tinggi memengaruhi kandungan klorofil-a perbedaan suhu $<1^\circ\text{C}$ antar grup sudah menunjukkan perbedaan yang cukup besar dalam kandungan klorofil-a. Suhu berpengaruh terhadap aktivitas metabolisme, dengan menurunnya suhu maka semakin menurun laju metabolisme sel-sel fitoplankton (Hatta, 2014).

Mustofa & Suryanto (2020) menyatakan bahwa nitrat dan fosfat berhubungan dengan klorofil-a, jika kandungan nitrat dan fosfat mengalami peningkatan maka kandungan klorofil-a juga meningkat. Tingginya kandungan klorofil dipengaruhi oleh faktor hidrologi, yakni pH, DO, arus, nitrat dan fosfat (Maslahah et al., 2021).

Hakanson & Bryann (2008), tingkat kesuburan perairan pesisir dan estuaria berdasarkan konsentrasi klorofil-a yaitu:

1. oligotropik dengan kategori perairan dengan konsentrasi klorofil-a yang kurang dari 2 $\mu\text{g}/\ell$,
2. mesotropik dengan kategori perairan dengan konsentrasi klorofil-a 2-6 $\mu\text{g}/\ell$,
3. eutropik dengan kategori perairan dengan konsentrasi klorofil-a 6-20 $\mu\text{g}/\ell$, dan
4. hipertropik dengan kategori perairan dengan konsentrasi klorofil-a yang lebih dari 20 $\mu\text{g}/\ell$.

2.2. Nutrien

Nutrien adalah unsur atau senyawa kimia yang digunakan untuk metabolisme atau proses fisiologi organisme. Nutrien di suatu perairan merupakan salah satu faktor lingkungan yang berpengaruh terhadap kelimpahan fitoplankton. Nutrien dapat menyediakan energi dan digunakan sebagai komponen untuk struktur sel (Pratiwi et al., 2019). Nutrien di perairan terdapat dalam bentuk makro maupun mikro. Nutrien di perairan terdapat dalam bentuk makro maupun mikro. Nutrien dalam bentuk makro terdiri dari: C, H, O, N, S, P, K, Mg, Ca, Na dan Cl, sedangkan yang termasuk dalam bentuk mikro terdiri dari Fe, Co, Zn, Si, Mn dan Cu (Widiardja et al., 2021). Nitrogen (N), Phospat (P), dan Silika (Si) ke-tiga nutrien tersebut berperan penting terhadap pembentukan sel jaringan tumbuhan dan organisme laut seperti fitoplankton (Ridwan et al., 2018). Pertumbuhan, morfologi, kelimpahan dan produksi primer tumbuhan pada suatu perairan secara umum ditentukan oleh ketersediaan zat hara fosfat, nitrat dan ammonium (Setiani et al., 2019).

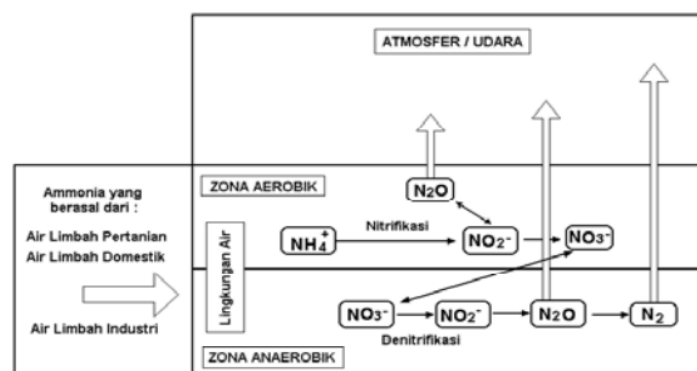
Kandungan nutrien di perairan mempunyai peran penting terhadap kesuburan perairan yang berhubungan dengan pembentukan sel jaringan jasad hidup organisme. Kesuburan perairan merupakan salah satu faktor yang menunjang dalam penentuan kualitas suatu perairan (Patty et al., 2015). Konsentrasi zat hara dalam perairan bervariasi untuk masing-masing bentuk senyawanya, namun dalam kondisi tertentu dapat terjadi keadaan di luar batas yang dinyatakan aman untuk kategori perairan tertentu. Akibat yang akan terjadi adalah penurunan kualitas perairan yang berdampak negatif terhadap biota yang hidup di perairan tersebut.

Unsur nitrogen (N) dan fosfor (P) merupakan unsur hara (nutrisi) yang diperlukan oleh tumbuhan laut untuk pertumbuhan dan perkembangan hidupnya. Unsur-unsur tersebut ada dalam bentuk nitrat (NO_3) dan fosfat (PO_4). Zat-zat hara tersebut dibutuhkan oleh fitoplankton maupun tanaman yang hidup di laut untuk pertumbuhannya (Arofah et al., 2021).

2.2.1. Nitrat (NO_3^-)

Nitrat merupakan bentuk utama nitrogen di perairan alami dan merupakan nutrisi utama yang berguna bagi pertumbuhan tanaman dan alga. Nitrat mudah larut di dalam air yang bersifat stabil, proses nitrifikasi menjadikan nitrat senyawa yang dihasilkan dari proses oksidasi sempurna senyawa nitrogen di perairan yang dibantu oleh bakteri autotrof (Herlambang & Marsidi, 2002). Proses nitrifikasi dimulai dari amonia (NH_4^+) yang teroksidasi menjadi nitrit (NO_2^-) lalu kembali teroksidasi menjadi nitrat (NO_3^-). Proses tersebut penting dalam siklus nitrogen (Gambar 3), yang mana fungsi nitrogen adalah membangun dan memperbaiki jaringan tubuh serta memberi energi.

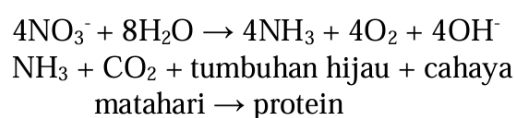
Proses denitrifikasi (Gambar 3) terjadi pada zona anaerobik, di mana nitrat sebagai pengganti oksigen dalam sistem respirasinya. Proses tersebut mereduksi nitrat dalam beberapa langkah, nitrat (NO_3^-) tereduksi menjadi nitrit (NO_2^-), kemudian nitrit tereduksi menjadi nitrous oksida (N_2O) yang sebagian dilepaskan ke atmosfer. Nitrous oksida yang tidak dilepaskan ke atmosfer tereduksi menjadi nitrogen gas (N_2). Nitrogen gas (N_2) merupakan bentuk nitrogen yang paling stabil dan dilepaskan ke atmosfer.



Gambar 3. Siklus nitrogen di perairan laut
(Sumber: Herlambang dan Marsidi, 2002).

Senyawa nitrogen merupakan senyawa yang sangat penting dalam kehidupan, karena nitrogen merupakan salah satu nutrisi utama yang berperan dalam pertumbuhan organisme hidup (Herlambang & Marsidi, 2002). Dalam lingkungan perairan, nitrogen terlarut dapat diikat oleh sejumlah bakteri dan alga yang merupakan sumber nitrogen bagi hewan (Herlambang & Marsidi, 2002) dalam metabolismenya, hewan membuang nitrogen dalam bentuk senyawa kemudian senyawa tersebut dimineralisasi (Gambar 4) oleh mikroorganisme dan nitrogen dilepaskan sebagai amoniak.

Proses mineralisasi (Gambar 4) adalah senyawa nitrat (NO_3^-) dan amonia (NH_4^+) dalam air digunakan oleh tumbuhan dan mikroorganisme dalam proses biosintesis (asimilasi) untuk membentuk sel baru yang menghasilkan nitrogen organik. Ion nitrat mengalami penurunan bilangan oksidasi nitrogen, proses tersebut membutuhkan air (H_2O) sebagai reaktan dan menghasilkan ammonia, oksigen dan ion hidroksida sebagai produk. Proses asimilasi nitrogen oleh tumbuhan hijau melalui fotosintesis yang mengambil amonia (NH_3) dan karbon dioksida (CO_2) dengan memanfaatkan energi dari cahaya matahari untuk menghasilkan protein dan senyawa organik yang mengandung nitrogen.



Gambar 4. Proses mineralisasi di perairan
(Sumber: Herlambang & Marsidi, 2002).

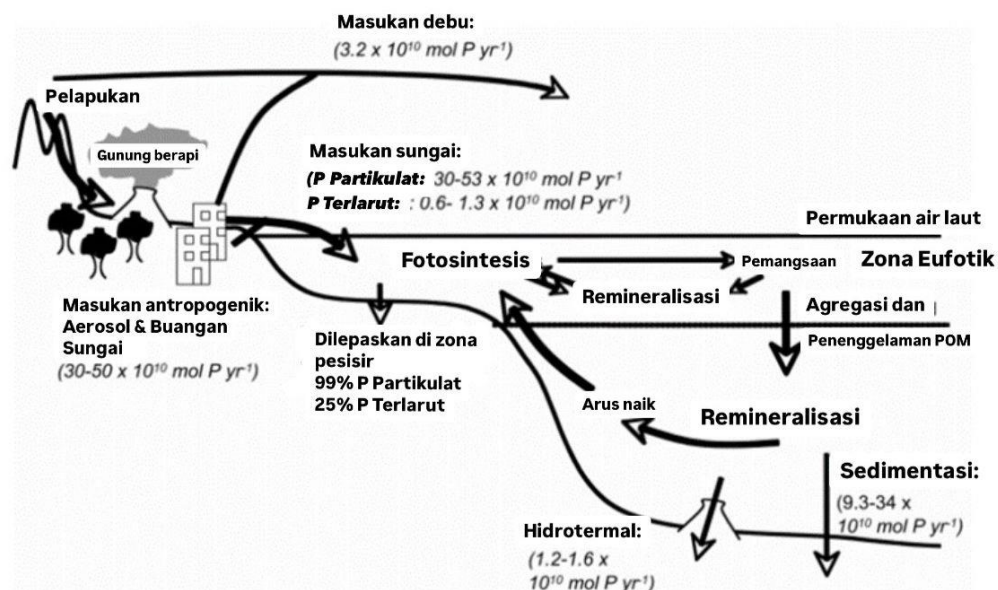
Setelah hewan dan tumbuhan mati, maka akan didekomposisi oleh proses biokimia dan bahan-bahan nitrogen organik akan diubah kembali dalam bentuk amoniak. Sumber utama pengkayaan zat hara nitrat adalah *runoff*, erosi, *leaching* lahan pertanian yang subur, dan limbah pemukiman. Nitrat di perairan berasal dari pemecahan nitrogen organik dan anorganik dalam tanah yang berasal dari dekomposisi bahan organik dengan bantuan mikroba (Makatita et al., 2014).

Konsentrasi nitrat dalam air laut secara alami hanya beberapa mg/ℓ. Nitrat merupakan salah satu senyawa yang berfungsi dalam merangsang pertumbuhan biomassa laut, sehingga secara langsung mengontrol perkembangan produksi pri-

mer, sehingga berhubungan erat dengan kesuburan suatu perairan (Makatita et al., 2014). Tingginya konsentrasi nitrat dapat disebabkan karena adanya masukan zat hara dari daratan melalui sungai, erosi, limbah pertanian dan limbah pemukiman. Tinggi rendahnya kandungan nitrat dan fosfat memengaruhi kelimpahan fitoplankton, sehingga nitrat dan fosfat juga dapat mempengaruhi kandungan klorofil-a yang terkandung dalam fitoplankton (Ayuningsih et al., 2014).

2.2.2. Fosfat (PO_4^{3-})

Fosfat adalah bentuk fosfor yang dapat dimanfaatkan oleh tumbuhan dan merupakan unsur esensial bagi tumbuhan tingkat tinggi dan alga, sehingga dapat memengaruhi tingkat produktivitas perairan (Makatita et al., 2014). Menurut Makatita et al. (2014) sumber fosfat berasal dari perairannya sendiri secara alami melalui proses penguraian, pelapukan, dekomposisi tumbuhan, sisa-sisa organisme mati, buangan limbah daratan (domestik, pertanian, peternakan dan sisa pakan) yang akan terurai oleh bakteri menjadi zat hara.



Gambar 5. Siklus fosfor di laut
(Sumber: Paytan and McLaughlin, 2007).

Tempat penyimpanan utama fosfor dalam siklus fosfor (Gambar 5) yang terjadi di laut adalah di sedimen, yang secara umum merupakan bentuk partikel yang berikatan dengan oksida besi dan senyawa hidroksida. Adanya senyawa yang terikat di sedimen, mengalami terjadinya dekomposisi oleh bakteri atau proses

abiotik senyawa fosfat terlarut yang dapat berdifusi negatif ke kolom air (Makatita et al., 2014). Menurut Paytan & McLaughlin (2007) siklus fosfor di laut (Gambar 5) dimulai dengan adanya masukan dari debu yang mengandung partikel dan pelapukan dari gunung berapi yang melepas fosfor ke lingkungan. Kemudian adanya masukan sungai dari aktivitas antropogenik yang mengandung fosfor partikulat dan fosfor terlarut ke permukaan laut.

Proses fotosintesis terjadi dengan menyerap fosfor, fosfor yang tidak terserap akan dikembalikan ke lingkungan melalui proses remineralisasi. Ketika keberadaan fosfat ada badan air dengan jumlah yang berlebih, maka fosfat akan kembali terjadi perubahan wujud zat ke dalam pori sedimen melalui proses sedimentasi dan presipitasi (Makatita et al., 2014). Senyawa fosfat dalam air dapat bereaksi dengan logam dan terabsorpsi oleh fitoplankton yang terdapat dalam air laut (Hutagalung, 2018).

Menurut Zakiyah et al. (2019) meningkatnya senyawa fosfat dipengaruhi oleh asupan nutrisi dari daerah tangkapan air, aktivitas penduduk yang berada di sekitar pesisir dan kegiatan perikanan. Kandungan nutrisi di perairan berkaitan erat dengan kelimpahan fitoplankton, di mana semakin tinggi nutrisi di suatu perairan maka semakin tinggi juga kelimpahan fitoplankton dan konsentrasi klorofil-a (Ayuningsih et al., 2014).

2.2.3. Fe^{2+}

Besi merupakan mikronutrien penting bagi pertumbuhan fitoplankton yang sering kali terbatas di lautan termasuk wilayah *upwelling* pesisir (Semeniuk et al., 2016). Fe digunakan oleh fitoplankton dalam proses rantai transport fotosintesis (Schoffman et al., 2016). Besi ditemukan di dalam pusat reaksi kedua fotosistem, dengan 2-3 atom Fe di fotosistem II (FSII) dan 12 atom Fe dalam fotosistem I (FSI) (Zhao et al., 2020). Fe mempengaruhi berbagai jalur metabolisme baik secara langsung maupun tidak langsung (Schoffman et al., 2016). Metabolisme zat besi dengan demikian saling terkait dengan metabolisme zat gizi makro dan mikro lainnya di dalamnya sel (Schoffman et al., 2016). Zat besi dan nutrisi lain di dalam sel fitoplankton terbatas tetapi tidak sepenuhnya hilang di dalam sel (Schoffman et al., 2016).

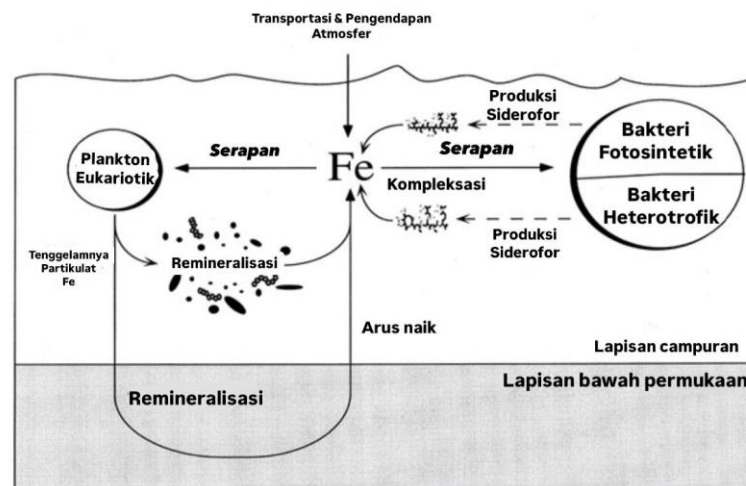
Konsentrasi Fe terlarut yang rendah membatasi produktivitas primer hingga 40% permukaan lautan global (Semeniuk et al., 2016). Untuk bertahan hidup dengan sedikit Fe, fitoplankton laut mempunyai banyak adaptasi fisiologis, termasuk peningkatan luas permukaan seluler, di mana rasio volume untuk meningkatkan penyerapan nutrisi sekaligus menurunkan kebutuhan Fe intraseluler (Semeniuk et al. 2016) penggantian enzim yang mengandung Fe dengan alternatif bebas Fe (misalnya, flavodoksin bebas logam menggantikan *ferredoxin*; *plastocyanin* yang mengandung Cu menggantikan sitokrom (Peers & Price 2006; Semeniuk et al. 2016) mengurangi kelimpahan fotosistem I yang kaya Fe dan mengubah stoikiometri protein fotosintetik dan pengaturan sistem transpor Fe berafinitas tinggi yang mengandung ferrireduktase berpasangan dan beberapa Cu yang mengandung ferroksidase (Semeniuk et al., 2016).

Sel fitoplankton kecil memiliki rasio luas permukaan terhadap volume yang lebih tinggi dan lapisan batas difusi yang lebih tipis dibandingkan sel besar (Semeniuk et al. 2016) hal tersebut memberikan keuntungan sel-sel yang lebih kecil dibandingkan dengan sel-sel yang lebih besar dalam menghadapi mikronutrien terbatas seperti Fe, namun akan merugikan ketika kadar logam mungkin terlalu tinggi dan berpotensi beracun (Semeniuk et al., 2016). Sel-sel yang lebih besar mungkin akan tumbuh seiring dengan meningkatnya bioavailabilitas Fe dan Cu selama peristiwa pengendapan atmosferik secara episodik di perairan permukaan yang terbatas Fe (Semeniuk et al., 2016).

Beberapa faktor penting dalam mengendalikan pertumbuhan alga dan campurannya pada bagian lapisan atas, pengembangbiakan alga-es laut, *grazing* oleh zooplankton, keterbatasan cahaya dan ketersediaan nutrisi mikro seperti besi (Hopwood et al., 2020). Tagliabue et al. (2017) menduga tingginya konsentrasi zat besi di perairan neritik Selat Gerlache memberi peran pada pertumbuhan fitoplankton dan penghilangan nutrisi. Pada penelitian Fitzwater et al. (2000) tingkat produktivitas alami di wilayah Laut Ross yang berbeda dalam kelimpahan zat besi terlarut dan disimpulkan bahwa zat besi merupakan faktor penting yang mengendalikan lokasi berkembangnya fitoplankton.

Lingkaran-lingkaran menunjukkan kumpulan relatif Fe biogenik di lapisan atas laut berdasarkan rasio Fe pada plankton (Tortell et al., 1999). Panah menun-

jukkan aliran antar kumpulan besi (Gambar 6), termasuk penyerapan besi oleh bakteri heterotrof, sianobakteri fototrof dan fitoplankton eukariotik.



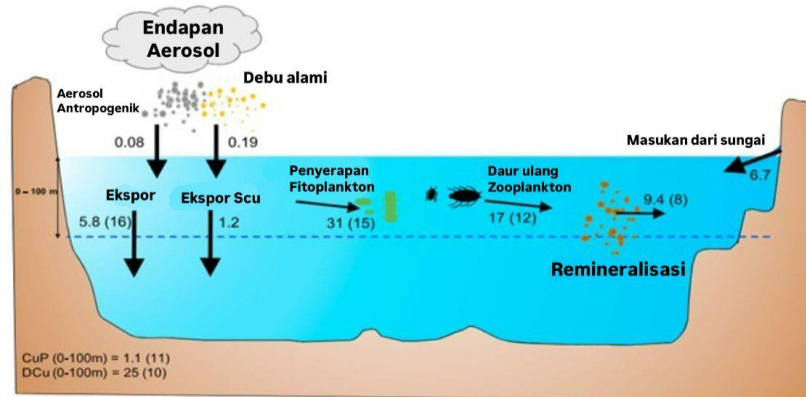
Gambar 6. Siklus Fe biologis di lapisan atas dan laut dalam di Samudra Pasifik subarktik terbuka (Sumber: Tortell et al., 1999).

Masukan besi ke permukaan laut terbatas pada deposisi dari udara dan *upwelling* dari laut dalam (Tagliabue et al., 2017). Kehilangan besi dari permukaan yang terjadi melalui partikel yang tenggelam. Protozoa dan metazoa yang berperan pada produksi primer dan memakan plankton yang lebih kecil tidak termasuk dalam model tersebut, kemungkinan mewakili kumpulan besi biogenik yang signifikan dan berkontribusi pada fluks partikel yang tenggelam dan remineralisasi permukaan besi (Tortell et al. 1999; Twining et al., 2019).

2.2.4. Cu^{2+}

Cu adalah mikronutrien penting untuk alga hijau dan diatom laut yang terbatas Fe (Zhang et al., 2014). Peran tembaga sebagai mikronutrien telah diketahui, meskipun data mengenai logam tersebut di lautan bawah masih langka (Tagliabue et al. 2018). Cu adalah elemen redoks yang diperlukan dalam enzim yang terlibat dalam berbagai jalur metabolisme, seperti respirasi (misalnya sitokrom oksidase) dalam fitoplankton (Guo et al. 2012; Semeniuk et al., 2016). Berbagai fungsi metabolisme tembaga telah diidentifikasi, satu diatom di samudera menggunakan *plastocyanin*, protein yang mengandung Cu untuk memindahkan elektron antara fotosistem II dan I (Hippman et al., 2017).

Siklus Cu (Gambar 7) di lautan global, dengan memfokuskan sumber dan aliran tembaga di lapisan atas (0-100 meter). Tembaga masuk ke lautan melalui deposisi aerosol antropogenik sebesar 0,08 GmolCu/tahun dan debu alami sebesar 0,19 GmolCu/tahun, serta input dari sungai sebesar 6,7 GmolCu/tahun.



Gambar 7. Siklus Cu di lautan global
(Sumber: Richon & Tagliabue, 2019).

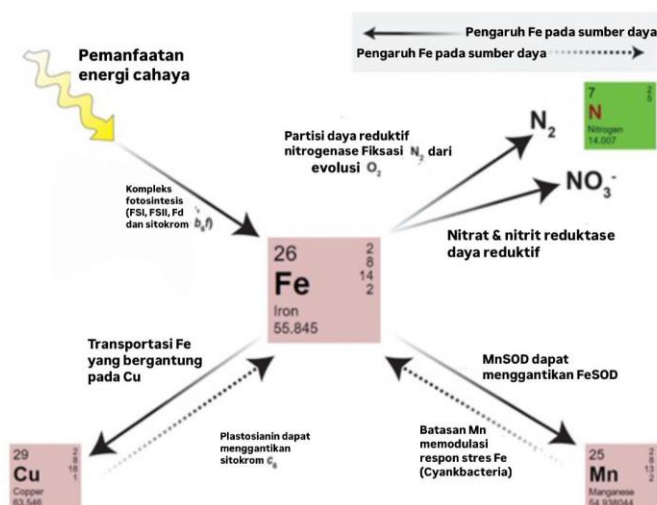
Tembaga diekspor dari lapisan atas melalui partikel yang tenggelam sebanyak 5,8 GmolCu/tahun dan tembaga terlarut ($Cu_{(s)}$) sebanyak 1,2 GmolCu/tahun. Fitoplankton menyerap tembaga sebesar 31 GmolCu/tahun, sementara zooplankton mendaur ulang tembaga sebesar 17 GmolCu/tahun dan bakteri melakukan remineralisasi sebanyak 9,4 GmolCu/tahun. Siklus tersebut menunjukkan bahwa tembaga memiliki waktu tinggal sekitar 400-500 tahun di lapisan atas lautan. Konsentrasi tembaga partikel ($Cu_{(p)}$) adalah 1,1 GmolCu, dan konsentrasi tembaga terlarut ($Cu_{(d)}$) adalah 25 GmolCu (Richon & Tagliabue, 2019).

Tembaga diperlukan untuk adaptasi Fe dan Cu sehingga ada kemungkinan hubungan fisiologis antara kebutuhan Fe dan Cu intraseluler pada fitoplankton laut yang Fe nya terbatas (Semeniuk et al., 2016). Pada penelitian Semeniuk et al. (2016) dinyatakan bahwa bioavailabilitas Cu tidak membatasi pertumbuhan fitoplankton meskipun konsentrasi Cu rendah, juga bioavailabilitas Cu dapat bervariasi menurut kedalaman (yaitu ketersediaan cahaya) pada wilayah Fe yang terbatas. Keterlibatan Cu dalam peralatan fotosintesis yang ditemukan pada diatom samudera *Thalassiosira oceanica* (Guo et al., 2012).

Dalam organisme tersebut, enzim plastocyanin yang mengandung Cu menggantikan enzim sitokrom c6 yang mengandung Fe dalam fotosintesis (Peers & Price 2006). Penggantian enzim yang mengandung Fe dengan enzim yang me-

ngandung Cu dapat menjelaskan keberhasilan fitoplankton samudera di perairan laut terbuka, di mana konsentrasi Fe terlalu rendah untuk mendukung pertumbuhan fitoplankton pesisir (Guo et al., 2012). Keterlibatan Cu dalam sistem transportasi Fe dengan afinitas tinggi pada beberapa diatom laut juga meningkatkan permintaan Cu (Guo et al., 2012).

Interaksi Fe dengan unsur-unsur lain (Gambar 8) dalam proses biologis penting seperti fotosintesis (PSI, PSII, *Ferredoxin*, dan *Cytochrome b₆/f*) untuk pemanfaatan energi cahaya. Selain itu, besi terlibat dalam fungsi enzim nitrogenase yang penting untuk fiksasi nitrogen, serta dalam reduksi nitrat dan nitrit dalam siklus nitrogen. Tembaga (Cu) mendukung transportasi besi dalam sel, dan plastosianin yang mengandung tembaga dapat menggantikan sitokrom C₆ yang mengandung besi.



Gambar 8. Ringkasan intraseluler interaksi antara Besi, N, Mn, Cu dan Cahaya dalam fitoplankton.

(Sumber: Schoffman et al., 2016).

Mangan (Mn) dapat menggantikan fungsi superoksida dismutase (FeSOD) dengan MnSOD untuk melindungi sel dari stress oksidatif, serta kekurangan mangan yang dapat memengaruhi respons stress besi pada *cyanobacteria*. Interaksi timbal balik antara besi dan unsur-unsur tersebut menentukan efisiensi dan adaptasi organisme terhadap kondisi lingkungan yang berbeda (Schoffman et al., 2016).

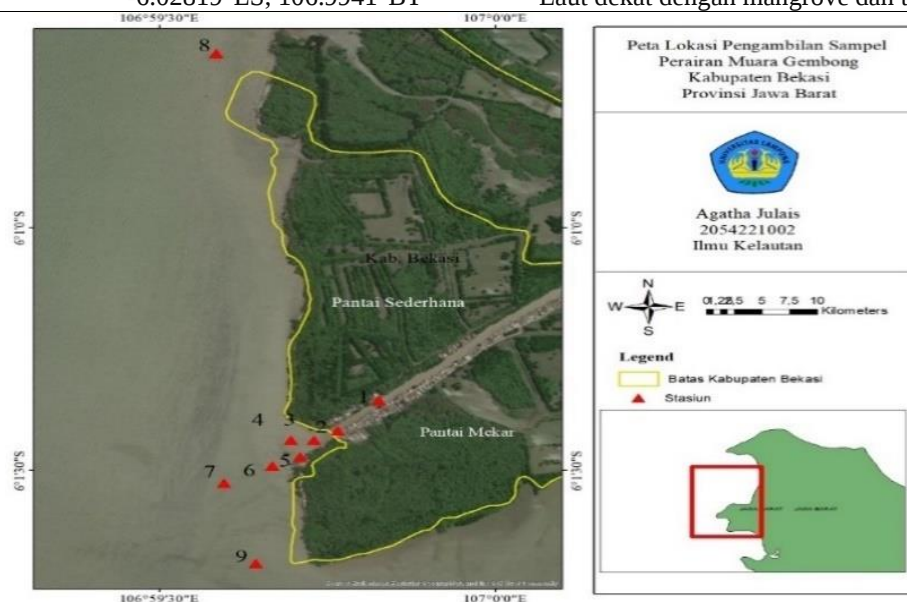
III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan selama 3 bulan dimulai pada bulan Juli sampai Agustus 2023. Pengambilan sampel dilakukan di wilayah Muara Gembong, Bekasi, Jawa Barat yang dilakukan 2 kali dalam 1 bulan. Lokasi pengambilan sampel disajikan pada (Tabel 1), peta lokasi disajikan pada (Gambar 9).

Tabel 1. Lokasi pengambilan sampel di Perairan Muara Gembong

Stasiun	Titik Koordinat	Keterangan
St 1	-6.02261°LS, 106.9971°BT	Wilayah sungai dekat dengan pemukiman dan tambak.
St 2	-6.02363°LS, 106.9961°BT	Wilayah sungai dekat dengan pemukiman dan PPI.
St 3	-6.02396°LS, 106.9965°BT	Wilayah sungai dekat dengan pemukiman.
St 4	-6.02396°LS, 106.9949°BT	Wilayah estuari dekat dengan pemukiman dan mangrove.
St 5	-6.02453°LS, 106.9952°BT	Wilayah estuari dekat dengan pemukiman Muara sungai.
St 6	-6.02485°LS, 106.9945°BT	
St 7	-6.02544°LS, 106.9933°BT	Laut dekat dengan mangrove dan tambak.
St 8	-6.0107°LS, 106.9931°BT	Laut dekat dengan mangrove.
St 9	-6.02819°LS, 106.9941°BT	Laut dekat dengan mangrove dan tambak.



Gambar 9. Lokasi penelitian.

Sampel air diuji di Laboratorium Kualitas Air Balai Pengujian Kesehatan Ikan dan Lingkungan (BPKIL) Serang (Lampiran 1). Pengolahan data dilakukan di Laboratorium Oseanografi Jurusan Perikanan dan Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian dibagi menjadi dua, yaitu saat pengambilan sampel air dan pengujian kualitas air yang dilakukan di Laboratorium Kualitas Air BPKIL Serang, alat pengambilan sampel, alat pengujian sampel dan bahan pengujian sampel disajikan pada (Tabel 2) (Tabel 3) dan (Tabel 4).

Tabel 2. Alat pengambilan sampel.

No	Nama Alat	Spesifikasi	Kegunaan
1	Refraktometer	Atago	Untuk mengukur salinitas perairan.
2	<i>Water sampler</i>	Gopas WSH-GP 22 H	Untuk mengambil sampel air.
3	Termometer	<i>Thermo</i>	Untuk mengukur suhu perairan.
4	pH Meter	<i>Thermo</i>	Untuk mengukur derajat keasaman perairan.
5	DO Meter	<i>Oaklon</i>	Untuk mengukur kandungan oksigen terlarut.
6	<i>GPS</i>	<i>GPS Map Camera</i>	Untuk mengetahui titik lokasi penelitian.
7	Pipet Tetes	-	Untuk mengambil aquades.
8	Kamera Digital	<i>IPhone</i>	Untuk mendokumentasikan kegiatan.
9	Kertas Label	-	Untuk menandai tiap sampel yang di ambil.
10	<i>Cool Box</i>	-	Untuk menyimpan sampel agar pada suhu tetap.
11	Botol Ukuran 1 Liter	-	Untuk menyimpan sampel air.
12	Alat Tulis	-	Untuk mencatat hasil pengukuran.

Tabel 3. Alat pengujian sampel

No	Nama Alat	Spesifikasi	Kegunaan
1	Erlenmeyer 100 ml	Iwaki	Untuk menaruh sampel yang akan diuji.
2	AAS (<i>Atomic Absorption Spectrofotometer</i>)	<i>Agilent 240FS AA</i>	Untuk mengukur sampel dengan menyerap cahaya pada gelombang oleh atom.
3	Spektrofotometer UV-Vis	<i>Agilent Cary 60</i>	Untuk mengukur sampel dengan serapan cahaya UV (ultraviolet) dan Vis (sinar tampak).
6	<i>Micropipet</i>	<i>Eppendorf</i>	Untuk memipet larutan dalam jumlah kecil.
7	Labu Ukur 50 ml	Iwaki	Untuk men-tera larutan.
8	<i>Tips</i>	-	Untuk memipet larutan.
9	Pipet Volumetrik	Iwaki	Untuk memipet larutan dalam jumlah besar menggunakan pipet <i>tube</i> .
10	<i>Pipet Controller</i>	Pipetus	Untuk memipet larutan.
11	Lemari Asam	Esco	Untuk mengerjakan sampel atau larutan yang memiliki tingkat keasaman yang tinggi.
12	<i>Hot Plate</i>	<i>Thermo Scientific</i>	Untuk memanaskan sampel.
13	Lampu Katoda berongga (<i>Hollow Catode Lamp</i> , HCL) tembaga (Cu)	<i>Agilent</i>	Untuk mengukur kadar tembaga yang ada pada larutan atau sampel dengan lampu katoda.
14	Lampu Katoda berongga (<i>Hollow Catode Lamp</i> , HCL) Besi (Fe)	<i>Agilent</i>	Untuk mengukur kadar besi yang ada pada larutan atau sampel dengan lampu katoda.
15	<i>Tissue grinder</i>	Iwaki	Untuk menggerus kertas filter.
16	Filter <i>millipore</i>	-	Untuk melakukan proses sterilisasi terhadap sampel dari partikel yang tidak terlihat.
17	<i>Tube Centrifuge</i>	-	Untuk menyimpan larutan klorofil-a.
18	Cawan porselin	-	Untuk menyimpan kertas filter.
19	Kuvet silica	-	Untuk menyimpan sampel ukur nitrat.
20	Kuvet gelas	-	Untuk menyimpan sampel ukur fosfat.

Tabel 4. Bahan pengujian sampel

No	Nama Bahan	Spesifikasi	Kegunaan
1.	Air bebas mineral	-	Untuk campuran pengujian sampel dan untuk mensterilkan labu.
2.	Asam Nitrat Pekat (HNO ₃) 68%	-	Untuk larutan reagen pengujian logam.
3.	Larutan standar logam besi (Fe) 10 mg/ℓ	-	Untuk mengetahui nilai standar Fe.
4.	Larutan kalsium karbonat (CaCO ₃)	-	Untuk campuran reagen pengujian Fe.
5.	Aquades	<i>Water Destiller</i>	Untuk campuran pengujian sampel dan untuk mensterilkan labu.
6.	Larutan standar logam tembaga (Cu)	-	Untuk mengetahui nilai standar Cu.
7.	Larutan standar fosfat 10 mg/ℓ	-	Untuk mengetahui nilai standar fosfat dengan konsentrasi 10 mg/ℓ.
8.	Larutan standar nitrat 100 mg/ℓ	-	Untuk mengetahui nilai standar nitrat dengan konsentrasi 100 mg/ℓ.
9.	Reagen 1 Fosfat (Asam askorbat 0,568 M)	-	Untuk mengetahui reaksi kimia fosfat dari sampel.
10.	Reagen 2 Fosfat (Larutan campuran)	-	Untuk mengetahui reaksi kimia fosfat dari sampel.
11.	HCL 1N	-	Untuk mengetahui reaksi kimia nitrat dari sampel.
12.	Air laut buatan	-	Untuk campuran kontrol kontaminasi dari sampel.
13.	Air laut alami	-	Untuk campuran kontrol kontaminasi dari sampel.
14.	Membran filter	<i>Whattman GF/F 47mm</i>	Untuk menyaring kontaminan air yang ada di sampel.
15.	Kertas filter	<i>Whattman</i>	Untuk menyaring kontaminan air yang ada di sampel.
16.	Magnesium karbonat (MgCO ₃)	-	Untuk pelarut sampel klorofil-a dan mempertahankan warna pada klorofil-a.
17.	Aseton 95%	-	Untuk pelarut sampel klorofil-a.

3.3 Pengambilan Data Kualitas Air

Pengukuran parameter kualitas air dilakukan bersamaan saat pengambilan sampel (Lampiran 1). Pengukuran parameter dilakukan di setiap stasiun yang berdekatan dengan daerah sungai, estuari dan laut. Pengukuran parameter kualitas air meliputi suhu, salinitas, pH, DO, nitrat, fosfat, klorofil-a, Fe dan Cu.

3.4. Pengujian Sampel

Pengujian sampel kualitas air Fe dan Cu dilakukan sesuai dengan SNI 6989.4: 2009 dan SNI 6989.6:2009. Pengujian Fosfat diukur dengan SNI 06-6989.31-2005 yang diadaptasi Instruksi Kerja Metode BPKIL. Pengujian Nitrat diukur dengan metode menurut APHA-AWWWS edisi ke 22, bagian 4500-NO₃⁻B, yang diadaptasi Instruksi Kerja Metode BPKIL.

3.4.1. Pengujian Nitrat

Pengujian Nitrat diukur dengan metode menurut APHA-AWWWS edisi ke 22, bagian 4500- NO₃⁻B, yang diadaptasi Instruksi Kerja Metode BPKIL. Menggunakan alat spektrofotometer UV-Vis:

1. Sebanyak 13 labu ukur 50 ml disiapkan untuk wadah sampel uji, duplo, *spike* dan blanko kemudian diberi label sebagai tanda pada masing-masing labu ukur (Lampiran 1).
2. *Spike* matriks *aquades* dan *spike* matriks standar dibuat dengan cara sebagai berikut;
 - a. Sebanyak 2 labu ukur 50 ml disiapkan dengan tanda *spike aquades* kemudian 1 ml *aquades* dimasukkan ke dalam labu ukur kemudian air laut alami ditambahkan sampai dengan garis yang ada pada labu ukur.
 - b. Larutan standar nitrat sebanyak 1 ml dimasukkan dengan konsentrasi 100 mg/l dan air laut alami ditambahkan sampai dengan garis yang ada pada labu ukur untuk *spike* matriks.

Tujuan dibuatnya *spike* matriks adalah untuk mengontrol akurasi larutan standar yang telah dibuat.

3. Blanko dibuat dengan cara air laut buatan dimasukkan ke dalam labu ukur 50 ml yang bertanda blanko.
4. Sampel air uji dimasukkan ke dalam labu ukur 50 ml yang sudah diberi tanda yang berisi titik masing-masing sampel uji di ambil sampai dengan batas garis yang ada pada labu ukur
5. Pada setiap labu ukur yang berisi sampel uji, *spike* dan blanko ditambahkan HCl 1N sebanyak 1 ml ke dalam masing-masing labu ukur. Selanjutnya, semua labu ukur ditutup, dihomogenkan dan didiamkan selama 10 menit.
6. Sampel uji, *spike* dan blanko dimasukkan kedalam kuvet gelas untuk di uji absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis.
7. Kuvet dimasukkan ke dalam spektrofotometer UV-Vis dan diukur absorbansinya dengan panjang gelombang 220 nm dan 275 nm.
8. Dihitung selisih dari nilai absorbansi antara panjang gelombang 220 nm dengan 275 nm agar didapat nilai hasil akhir absorbansi nitrat.

$$\text{Absorbansi 220} - \text{absorbansi 275 nm} \dots\dots\dots (1)$$

9. Konsentrasi nitrat dihitung menggunakan absorbansi dan persamaan kurva kalibrasi yang didapat dari hasil pengukuran absorbansi nitrat yang menggunakan alat spektrofotometer UV-Vis. Konsentrasi nitrat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$y = a \pm bx \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

y: nilai absorbansi sampel air

a: *intercept*

bx: *slope*

Konsentrasi sampel nitrat dihitung dari persamaan (2) untuk mendapatkan nilai C pada persamaan (3)

$$C = x \cdot fp \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

C : Konsentrasi yang didapat dari hasil pengukuran (mg/l)

fp : Faktor pengenceran

3.4.2. Pengujian Fosfat

Pengujian Fosfat diukur dengan SNI 06-6989.31-2005 yang diadaptasi Instruksi Kerja Metode BPKIL. Menggunakan alat spektrofotometer UV-Vis (Lampiran 1):

1. Sebanyak 13 labu ukur 50 ml disiapkan untuk wadah sampel uji, duplo, *spike* dan blanko kemudian diberi label sebagai tanda pada masing-masing labu ukur.
2. *Spike* matriks *aquades* dan *spike* matriks standar dibuat dengan cara sebagai berikut;
 - a. Sebanyak 2 labu ukur 50 ml disiapkan dengan tanda *spike aquades* kemudian 2,5 ml *aquades* dimasukkan ke dalam labu ukur kemudian ditambahkan air laut alami sampai dengan garis yang ada pada labu ukur.
 - b. Larutan standar fosfat sebanyak 2,5 ml dimasukkan dengan konsentrasi 10 mg/l dan ditambahkan air laut alami sampai dengan garis yang ada pada labu ukur untuk *spike* matriks.

Tujuan dibuatnya *spike* matriks adalah untuk mengontrol akurasi larutan standar yang telah dibuat.

3. Blanko dibuat dengan cara air laut buatan dimasukkan ke dalam labu ukur 50 ml yang bertanda blanko.
4. Sampel air uji dimasukkan ke dalam 11 labu ukur 50 ml yang sudah diberi tanda yang berisi titik masing-masing sampel uji di ambil sampai dengan batas garis yang ada pada labu ukur
5. Reagen 1 larutan asam askorbat 0,568M ditambahkan sebanyak 1 ml ke dalam masing-masing labu ukur yang sudah diisi sampel uji, *spike* dan blanko lalu dihomogenkan
6. Reagen 2 larutan campuran ditambahkan sebanyak 1 ml ke dalam masing-masing labu ukur yang sudah diisi sampel uji, *spike* dan blanko lalu dihomogenkan. Kemudian didiamkan selama 10 menit.
7. Sampel uji, *spike* dan blanko kemudian dimasukkan kedalam kuvet gelas untuk di uji absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis.
8. Kuvet dimasukkan kedalam spektrofotometer UV-Vis dan diukur absorbansinya dengan panjang gelombang 880 nm.

Dihitung konsentrasi fosfat menggunakan absorbansi dan persamaan kurva

kalibrasi yang didapat dari hasil pengukuran absorbansi fosfat yang menggunakan alat spektrofotometer UV-Vis. Konsentrasi fosfat dihitung menggunakan persamaan (2) untuk mendapatkan nilai C pada persamaan (3).

3.4.3. Pengujian Klorofil-a

Pengujian sampel klorofil-a dengan Instruksi Kerja Metode BPKIL (IKM BPKIL) yang mengacu kepada Vollenweider (1969) dalam Heriyanto (2009) dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis:

1. Sampel uji disiapkan, kertas saring *whattman* GF/F 47mm dan cawan porselen sebanyak jumlah sampel uji dan duplo.
2. Kertas saring *whattman* GF/F 47mm dimasukkan ke dalam alat *filter Millipore* dengan menambahkan 1 ml larutan magnesium karbonat.
3. Air masing-masing sampel uji sebanyak 100 ml disaring menggunakan alat *filter millipore* dengan bantuan vakum *syring*.
4. Kertas saring digerus sampai halus menggunakan *tissue grinder* dengan menambahkan larutan Aseton 90% sebanyak 10 ml.
5. Sampel yang sudah dihaluskan dimasukkan kedalam valcanotube kemudian ditutup sampai rapat.
6. Valcanotube *dicentrifuge* dengan putaran 3000 rpm selama 15 menit.
7. Kemudian cairan bening dimasukkan ke dalam kuvet dan diabsorbansi menggunakan spektrofotometer UV-Vis dengan Panjang gelombang 665 nm dan 750 nm.
8. Konsentrasi klorofil dihitung dengan persamaan 4 Vollenweider (1969) dalam Heriyanto (2009) sebagai berikut:

$$\text{Klorofil-a } (\mu\text{g/L}) = 11,9 \times (A^{0} 665 - A^{0} 750) \times V/l \times 1000/S \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan :

$A^{0} 665$ = penyerapan spektrofotometer pada panjang gelombang 665 nm

$A^{0} 750$ = penyerapan spektrofotometer pada panjang gelombang 750 nm

V = ekstrak aseton (ml)

L = panjang jalan cahaya pada cuvet (cm)

S = volume sampel yang difilter (ml)

11,9 = Konstanta

3.4.4. Pengujian Logam Fe

Pengujian kadar Fe yang mengacu kepada SNI 6989.4:2009 dan diadaptasi Instruksi Kerja Metode BPKIL (IKM BPKIL) menggunakan alat AAS (*Atomic Absorption Spectrofotometry*):

1. Sebanyak 13 Erlenmeyer 100 ml disiapkan untuk wadah sampel uji, *spike* dan blanko kemudian diberi label sebagai tanda pada masing-masing erlenmeyer.
2. Sampel uji ditambahkan sebanyak 50 ml menggunakan gelas ukur lalu dimasukkan ke dalam Erlenmeyer 100 ml.
3. *Spike* matriks dan *spike aquades* dibuat dengan cara sebagai berikut:
 - a. Labu ukur 50 ml disiapkan dengan tanda *spike* matriks kemudian 5 ml larutan standar dengan konsentrasi 10 mg/l. Kemudian sampel air ditambahkan ke dalam labu ukur, sampai dengan batas garis yang ada pada labu ukur kemudian dihomogenkan. Larutan *spike* matriks ditambahkan ke dalam Erlenmeyer 100 ml, kemudian beri label pada Erlenmeyer dengan tanda *spike* dan nomor sampel air yang diambil untuk tambahan larutan *spike*.
 - b. Labu ukur 50 ml disiapkan dengan tanda *spike aquades* kemudian 5 ml aquades dimasukkan ke dalam labu ukur. Sampel air ditambahkan ke dalam labu ukur, sampai dengan batas garis yang ada pada labu ukur kemudian dihomogenkan. Larutan *spike aquades* dituang ke dalam Erlenmeyer 100 ml, kemudian beri label pada Erlenmeyer dengan tanda *spike* dan nomor sampel air yang diambil untuk tambahan larutan *spike*.
4. Blanko dibuat dengan menambahkan sebanyak 50ml aquades ke dalam Erlenmeyer 100 ml.
5. Larutan Asam nitrat (HNO_3) 65% sebanyak 5 ml ditambahkan pada masing-masing sampel uji, *spike* dan blanko di dalam ruang asam, lalu ditutup dengan corong gelas di atas Erlenmeyer.
6. Sampel uji, *spike* dan blanko dipanaskan perlahan-lahan menggunakan *hot*

plate sampai sisa volume nya 15 ml – 20 ml setelah itu sampel ditunggu sampai dengan suhu ruang.

7. Sebanyak 13 labu ukuran 50 ml disiapkan, kertas saring dan corong gelas, dilipat kertas saring hingga membentuk kerucut kemudian kertas saring di taruh di atas corong gelas, sampel uji, *spike* dan blanko disaring sampai selesai kemudian bilas corong dan Erlenmeyer dengan *aquades* dan dimasukkan ke dalam labu ukur.
8. *Aquades* ditambahkan sampai dengan batas garis labu ukur kemudian dihomogenkan
9. Larutan kalsium karbonat ditambahkan sebanyak 5 ml ke dalam sampel uji, labu ukur ditutup dan dihomogenkan
10. Sampel uji diukur absorbansinya menggunakan AAS dengan panjang gelombang 248,3 nm.
11. Konsentrasi logam Fe dihitung menggunakan absorbansi dan persamaan kurva kalibrasi yang didapat dari hasil pengukuran absorbansi logam Fe yang menggunakan alat AAS. Konsentrasi Fe dihitung menggunakan persamaan (2) untuk mendapatkan nilai C pada persamaan (3).

3.4.5. Pengujian Logam Cu

Pengujian kadar Cu yang mengacu kepada SNI 6989.6:2009 diadaptasi Instruksi Kerja Metode BPKIL (IKM BPKIL) menggunakan alat AAS (*Atomic Absorption Spectrofotometry*):

1. Sebanyak 13 erlenmeyer 100 ml disiapkan untuk wadah sampel uji, *spike* dan blanko kemudian diberi label sebagai tanda pada masing-masing erlenmeyer.
2. Sampel uji ditambahkan sebanyak 50 ml menggunakan gelas ukur lalu dimasukkan ke dalam Erlenmeyer 100 ml.
3. *Spike* matriks dan *spike aquades* dibuat dengan cara sebagai berikut :
 - a. Labu ukur 50 ml disiapkan dengan tanda *spike matriks* kemudian 2,5 ml larutan standar dengan konsentrasi 10 mg/ℓ. Kemudian sampel air ditambahkan ke dalam labu ukur, sampai dengan batas garis yang ada pada labu ukur kemudian dihomogenkan. Larutan *spike* matriks dituang ke dalam Erlenmeyer 100 ml, kemudian beri label pada Erlenmeyer dengan tanda

- spike dan nomor sampel air yang diambil untuk tambahan larutan *spike*.
- b. Labu ukur 50 ml disiapkan dengan tanda *spike aquades* kemudian 2,5 ml *aquades* dimasukkan ke dalam labu ukur. Sampel air ditambahkan ke dalam labu ukur, sampai dengan batas garis yang ada pada labu ukur kemudian dihomogenkan. Larutan *spike aquades* dituang ke dalam Erlenmeyer 100 ml, kemudian beri label pada Erlenmeyer dengan tanda spike dan nomor sampel air yang diambil untuk tambahan larutan spike.
 4. Blanko dibuat dengan menambahkan sebanyak 50 ml aquades ke dalam Erlenmeyer 100 ml.
 5. Larutan Asam nitrat (HNO_3) 65% ditambahkan sebanyak 5 ml pada masing-masing sampel uji, *spike* dan blanko di dalam ruang asam, lalu ditutup dengan corong gelas di atas Erlenmeyer.
 6. Sampel uji dipanaskan perlahan-lahan menggunakan *hot plate* sampai sisa volume nya 15 ml – 20 ml, kemudian sampel ditunggu sampai dengan suhu ruang
 7. Sebanyak 13 labu ukur 50 ml disiapkan, kertas saring dan corong gelas, dilipat kertas saring hingga membentuk kerucut kemudian kertas saring di taruh di atas corong gelas, disaring sampel uji sampai selesai kemudian bilas corong dan Erlenmeyer dengan aquades dan dimasukkan ke dalam labu ukur.
 8. Aquades ditambahkan sampai dengan batas garis labu ukur kemudian dihomogenkan
 9. Larutan kalsium karbonat ditambahkan sebanyak 5 ml ke dalam sampel uji, labu ukur ditutup dan dihomogenkan.
 10. Sampel uji diukur absorbansinya menggunakan AAS dengan Panjang gelombang 324,7 nm.
 11. Konsentrasi logam Cu dihitung menggunakan absorbansi dan persamaan kurva kalibrasi yang didapat dari hasil pengukuran absorbansi logam Fe yang menggunakan alat AAS. Konsentrasi Cu dihitung menggunakan persamaan (2) untuk mendapatkan nilai C pada persamaan (3).

3.5. Analisis Data

Penelitian dilakukan termasuk golongan penelitian kuantitatif. Penelitian kuantitatif adalah penelitian yang banyak menggunakan angka, mulai dari proses pengumpulan data, analisis data dan penampilan data (Sitoyo & Sodik, 2015; Priadana & Sunarsi, 2021) penelitian dengan pendekatan kuantitatif menekankan analisis pada data angka yang dianalisis dengan metode statistik yang sesuai (Priadana & Sunarsi, 2021). Analisis yang digunakan adalah analisis deskriptif. Analisis deskriptif merupakan metode analisis yang dilakukan dengan melihat data untuk memperoleh suatu kesimpulan berupa data angka yang digambarkan secara visual seperti grafik atau diagram (Aziza, 2023).

Analisis konsentrasi Fe, Cu, Nutrien dan klorofil-a di plotkan dan dianalisis secara deskriptif pola sebarannya. Variabilitas temporal di setiap stasiun juga dianalisis secara deskriptif. Hubungan antara Nutrien, klorofil-a, Fe, Cu, Suhu, Salinitas, DO dan pH di analisis dengan metode *Canonical Correspondence Analysis* (CCA) dengan bantuan *software* XLSTAT selain itu, digunakan *software* ArcMap 10.8 untuk memetakan lokasi pengambilan sampel air.

Menurut Braak, (1986) *Canonical Correspondence Analysis* (CCA) digunakan untuk mengidentifikasi dan menjelaskan hubungan antara kumpulan spesies biologi dan lingkungannya. CCA merupakan bentuk kanonik, yakni perluasan dari analisis korespondensi yang memanfaatkan data tambahan berupa variabel independen untuk melakukan pemetaan variabel dependen (Ghiffari et al., 2021). CCA dilakukan dengan melalui prosedur rata-rata timbal balik. Analisis menghasilkan fungsi-fungsi korespondensi kanonikal yang merupakan kombinasi linear dari kedua set variabel, sehingga menghasilkan pola korespondensi antara mereka. Zhou et al. (2023) menjelaskan langkah-langkah dalam analisis koresponden kanonik, yaitu:

1. Pengumpulan data, kumpulan data dari dua set variabel yang ingin dianalisis.
2. Persiapan data, tujuannya agar memiliki mean nol dan deviasi standar satu untuk memastikan bahwa variabel-variabel memiliki bobot yang sebanding dalam analisis.
3. Matriks korespondensi, membuat matriks korespondensi untuk masing-

masing set variabel, dengan melibatkan pembuatan matriks data yang mencerminkan hubungan antar-variabel dalam setiap kelompok.

4. Perhitungan nilai korespondensi kanonikal, melakukan analisis untuk menghitung nilai korespondensi kanonikal dan fungsi-fungsi korespondensi kanonikal.
5. Interpretasi hasil, menginterpretasi hasil analisis untuk memahami hubungan antara kedua set variabel.
6. Visualisasi hasil, menyajikan hasil secara visual berupa plot atau diagram yang dapat membantu memahami hubungan antar-variabel yang ditemukan oleh analisis koresponden kanonikal.
7. Uji statistik signifikansi, untuk mengukur hasil analisis korespondensi kanonikal secara signifikan berbeda dari nol, yang dapat melibatkan pengujian hipotesis.

Berdasarkan analisis CCA dapat membantu mengidentifikasi variabel-variabel yang paling berkontribusi dan mengetahui hubungan yang kompleks terhadap kedua set variabel. Variabel yang dianalisis adalah Fe dengan klorofil-a, Cu dengan klorofil-a, nitrat dengan klorofil-a, fosfat dengan klorofil-a, Fe dengan nitrat, Fe dengan fosfat, Cu dengan nitrat dan Cu dengan fosfat.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Secara spasial konsentrasi Nitrat dan Fe yang lebih tinggi di wilayah sungai dan laut, secara temporal pola klorofil-a cenderung mengikuti Nitrat dan Fe di wilayah sungai dan laut.
2. Analisis CCA menunjukkan variasi data 99,1% di mana vektor klorofil-a berkorelasi positif dengan Fe, Cu, nitrat, fosfat, salinitas, suhu, pH dan korelasi negatif dengan DO.

5.2. Saran

Penelitian tentang produktivitas dianjurkan untuk terus dilanjutkan dan perlu dilakukannya monitoring secara berkala oleh pemerintah terhadap kualitas perairan di wilayah tangkapan ikan dan perlu dilakukannya upaya untuk mengurangi dan mengelola masukan bahan-bahan pencemar seperti limbah industri maupun limbah rumah tangga dari hilir sampai muara yang dapat merusak produktivitas perairan dan berkurangnya tangkapan ikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abigail, W., Zainuri, M., Kuswardani, A. T. D., & Pranowo, W. S. (2015). Sebaran nutrien, intensitas cahaya, klorofil-a dan kualitas air di Selat Badung, Bali pada Monsun Timur. *Jurnal Depik*, 4(2), 87-94. <http://dx.doi.org/10.13170/depik.4.2.2494>
- Ainiyah, S. D., Lestari, I., & Andini, A. (2018). Hubungan antara kadar besi (Fe) air tambak terhadap kadar besi (Fe) pada daging ikan nila (*oreochromis niloticus*) dan ikan bandeng (*chanos chanos*) di Kecamatan Jabon Sidoarjo. *Jurnal SainHealth*, 2(2), 21-28. <https://doi.org/10.51804/jsh.v2i2.258.21-28>
- Arrigo, R. D., Seager, R., Smerdon, J. E., LeGrande, A. N., & Cook, E. R. (2011). The anomalous winter of 1783-1784: was the Laki eruption or an analog of the 2009-2010 winter to blame?. *Geophysical Research Letters*, 38, 5. <https://doi.org/10.1029/2011GL046696>
- Arofah, S., Sari, L. A., & Kusdarwati, R. (2021). The relationship with N/P ratio to phytoplankton abundance in mangrove Wonorejo waters, runkut, Surabaya, East Java. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 718, 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/718/1/012018>
- Asriyana, & Yuliana. (2019). *Produktivitas perairan (Edisi Revisi)*. PT Bumi Aksara. Jakarta Timur.
- Ayuningsih, M. S., Hendrarto, I. B., & Purnomo, P. W. (2014). Distribusi kelimpahan fitoplankton dan klorofil-a di Teluk Sekumbu Kabupaten Jepara: hubungannya dengan kandungan nitrat dan fosfat di perairan. *Diponegoro Journal of Maquares*, 3(2), 138-147. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/maquares/article/view/5017/4849>
- Aziza, N. (2023). *Metodologi penelitian I*. Media Sains Indonesia. Bandung.
- Bahril., Armid., Jabir., Takwir, A., & Rahim, A. (2019). Distribusi spasial logam berat besi (Fe) di perairan Teluk Staring, Sulawesi Tenggara. *Journal of Chemistry*, 7(2), 30-39. <https://doi.org/10.18860/al.v7i2.7192>

- Barasa, H., Hamdani., & Nursalam. (2023). Dinamika nutrien pada estuari sungai kusan Kabupaten Tanah Bumbu. *Marine Coastal and Small Islands Journal-Jurnal Kelautan*, 6(2).
<https://ppjp.ulm.ac.id/journals/index.php/mcs>
- Biswas, S. R., Biswas, P. L., Limon, S. H., Vargo, J. P., & Animesh, K. (2021). Nitrogen cycling in mangrove ecosystems: a review on the current state of knowledge and future research needs. *Science of The Total Environment*, 756,143826. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143826>
- Bundy, R.M., Abdulla, H.A.N., Hatcher, P.G., Biller, D.V., Buck, K.N., & Barbeau, K.A. (2015). Iron-binding ligands and humic substances in the San Francisco bay estuary and estuarine-influenced shelf regions of coastal California. *Marine Chemistry*, 173, 183-194.
<https://doi.org/10.1016/j.marchem.2014.11.005>
- Bundy, R. M., Boiteau, R. M., McLean, C., Turk-Kubo, K. A., McIlvin, M. R., Saito, M. A., & Repeta, D. J. (2018). Distinct siderophores contribute to iron cycling in the mesopelagic at station ALOHA. *Frontiers in Marine Science*, 5, 61. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00061>
- Bundy, R. M., Tagliabue, A., Hawco, N. J., Morton, P. L., Twining, B. S., Hatta, M., & Saito, M. A. (2022). Elevated sources of cobalt in the Arctic Ocean. *Biogeosciences*, 17(18), 4745-4767. <https://doi.org/10.5194/bg-17-4745-2020>
- Boyd, P. W., Ellwood, M. J., Tagliabue, A., & Twining, B. S. (2017). Biotic and abiotic retention, recycling and remineralization of metals in the ocean. *Nature Geoscience*, 10(3), 167-173. <https://doi.org/10.1038/ngeo2876>
- Boyd, P. W., Claustre, H., Levy, M., Siegel, D. A., & Weber, T. (2019). Multifaceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean. *Nature*, 568(7752), 327-335. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1098-2>
- Browning, T. J., Achterberg, E. P., Rapp, I., Engel, A., Bertrand, E. M., Tagliabue, A., & Moore, C. M. (2017). Nutrient co-limitation at the boundary of an oceanic gyre. *Nature*, 551(7679), 242-246.
<https://doi.org/10.1038/nature24063>
- Carvalho, M., Santiago, S., & Nunes, M. L. (2019). Assessment of the environmental impact of aquaculture using life cycle assessment: a review. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(4), 794-812.
<https://doi.org/10.1007/s11367-019-01579-w>
- Coale, T. H., Lampe, R. H., & Allen, A. E. (1991). Molecular mechanisms underlying micronutrient utilization in marine diatoms. *The Molecular Life of Diatoms*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. 567-604, pp.

- Charters, F. J., Cochrane, T. A., & O'Sullivan, A. D. (2016). Untreated runoff quality from roof and road surfaces in a low intensity rainfall climate. *Science of the Total Environment*, 550, 265-272. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.093>
- Chakraborty, P., Babu, P. V. R., & Sarma, V. V. (2014). A study of lead and cadmium speciation in some estuarine and coastal sediments. *Chemical Geo-logy*, 367, 70-78. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMGEO.2011.11.026>
- Chakraborty, S., Cadier, M., Visser, A. W., Bruggeman, J., & Andersen, K. H. (2020). Latitudinal variation in plankton traits and ecosystem function. *Global Ecology and Biogeography*, 29(12), 2008-2019. <https://doi.org/10.1111/geb.13161>
- Chen, M. (2014). Chlorophyll modifications and their spectral extension in oxygenic photosynthesis. *Annual Review of Biochemistry*, 83, 317-340. <https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-072711-162943>
- Diana, N. Z. A., Sari, L. A., Arsad, S., Pursetyo, K. T., & Cahyoko, Y. (2021). Monitoring of phytoplankton abundance and chlorophyll-a content in the estuary of Banjar kemuning River, Sidoarjo Regency, East Java. *Journal of Ecological Engineering*, 22(1), 29-35. <https://doi.org/10.12911/22998993/128877>
- Domingues, R. B., Guerra, C. C., Barbosa, A. B., & Galvão, H. M. (2015). Are nutrients and light limiting summer phytoplankton in a temperate coastal lagoon?. *Aquatic Ecology*. 49(2), 127-146. <https://doi.org/10.1007/s10452-015-9512-9>
- Dhani, K. H., Yulianto, B., & Haryono, T. J. (2019). Analisis kualitas air pada budidaya udang vaname (*Litopenaeus vannamei*) di tambak udang dengan penerapan silvofishery di Kabupaten Probolinggo, Jawa Timur. *Journal of Aquaculture and Fish Health*, 8(2), 46-54. <https://doi.org/10.20473/jafh.v8i2.12735>
- Djuwito, R. D. P., & Irwani. (2016). Pengaruh kandungan nitrat dan fosfat terhadap kelimpahan diatom di muara Sungai Wulan, Demak. *Diponegoro Journal of Maquares*. 5(4),224-232. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/maquares>
- Firmansyaf, A. D., Yulianto, B., & Sedjati, S. (2013). Studi kandungan logam berat besi (fe) dalam air, sedimen dan jaringan lunak kerang darah (*Ana-dara granosa linn*) di sungai morosari dan sungai gonjol Kecamatan Sayung, Kabupaten Demak. *Journal of Marine Research*, 2(2), 45-54. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jmr>

- Ferreira, N. C., Bonetti, C., & Seiffert, W. Q. (2019). Hydrological and water quality indices as management tools in marine shrimp culture. *Aquaculture*, 511, 734241.
<https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2011.05.045>
- Flynn, K. J., Clark, D. R., Mitra, A., Fabian, H., Hansen, P. J., Glibert, P. M., & Brownlee, C. (2015). Ocean acidification with (de)eutrophication will alter future phytoplankton growth and succession. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1804), 20142604.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2014.2604>
- Glibert, P. M., Wilkerson, F. P., Dugdale, R. C., Raven, J. A., Dupont, C. L., Leavitt, P. R., & Kana, T. M. (2016). Pluses and minuses of ammonium and nitrate uptake and assimilation by phytoplankton and implications for productivity and community composition, with emphasis on nitrogen-enriched conditions. *Limnology and Oceanography*, 61(1), 165-197. <https://doi.org/10.1002/lno.10203>
- Glibert, P. M. (2017). Eutrophication, harmful algae and biodiversity challenging paradigms in a world of complex nutrient changes. *Marine Pollution Bulletin*, 124(2), 591-606.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.04.027>
- Gledhill, M., & Buck, K.N. (2012). The organic complexation of iron in the marine environment: a review. *Frontiers in Microbiology*, 3, 69.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00069>
- Gledhill, M., Achterberg, E.P., Li, K., Mohamed, K.N., & Rijkenberg, M.J.A. (2015). Influence of ocean acidification on the complexation of iron and copper by organic ligands in estuarine waters. *Marine Chemistry*, 177, 421-433. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2015.03.016>
- Gledhill, M., Achterberg, E. P., Li, K., Mohamed, K. N., & Rijkenberg, M. J. (2022). The role of copper speciation in iron acquisition by marine phytoplankton. *Nature Communications*, 13(1), 1-12.
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-27581-1>
- Gupta, M. (2014). A new tropic state index for lagoons. *Journal of Ecosystem*. 8 Pages.
- Guo, J., Lapi, S., Ruth, T. J., & Maldonado, M. T. (2012). The effects of iron and copper availability on the copper stoichiometry of marine phytoplankton. *Journal of Phycology*. 48, 312-325.
<https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2012.01133.x>

- Ghiffari, L., Gusriani, N., & Parmikanti, K. (2021). Pemetaan jenis tindak kriminal di Indonesia menggunakan *canonical correspondence analysis*. *Jurnal Statistika dan Aplikasinya*, 5(2), 133-145.
<https://doi.org/10.21009/JSA.05202>
- Gökçe, D. (2016). *Algae as an indicator of water quality*. in *algae - organisms for imminent biotechnology*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/62916>
- Hakanson, L., & Bryann, A. C. (2008). *Eutrophication in the Baltic Sea present situation, nutrient transport processes, remedial strategies*. Heidelberg (DE): Springer-Verlag GmbH.
- Hamuna, B., Tanjung, R.H.R., Suwito., Maury, H.K., & Alianto. (2018). Kajian kualitas air laut dan indeks pencemaran berdasarkan parameter fisika-kimia di perairan Distrik Depapre, Jayapura. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 16(1), 35-43. <https://doi.org/10.14710/jis.v25i.633-644>
- Hatta, M. (2014). Hubungan antara parameter oseanografi dengan kandungan klorofil-a pada musim timur di perairan Utara Papua. *Torani (Jurnal Ilmu Kelautan dan Perikanan)*, 24(3), 29-39.
<https://doi.org/10.35911/torani.v24i3.235>
- Hippmann, A. A., Schuback, N., Moon, K.-M., McCrow, J. P., Allen, A. E., Foster, L. J., Green, B. R., & Maldonado, M. T. (2017). Contrasting effects of copper limitation on the photosynthetic apparatus in two strains of the open ocean diatom *Thalassiosira oceanica*. *PLOS One*, 114(47), E9954-E9963. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181753>
- Herlambang, A., & Marsidi, R. (2002). Proses nitrifikasi dengan system biofilter untuk pengolahan air limbah yang mengandung amoniak konsentrasi tinggi. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 3(3), 195-204.
<https://dx.doi.org/10.29122/jtl.v3i3.255>
- Hendriyani, I. S., & Setiari, N. (2009). Kandungan klorofil dan pertumbuhan kacang panjang (*Vigna sinensis*) pada tingkat penyediaan air yang berbeda. *Jurnal Sains & Matematika*, 17(3), 145–150.
<https://eprints.undip.ac.id/2335/>
- Hutagalung, T. A. (2018). *Penentuan kadar besi (Fe), timbal (Pb) dan seng (Zn) pada air sumur di kawasan binjai utara dengan metode spektrofotometer serapan atom (ssa) di laboratorium kesehatan daerah*. (Laporan tugas akhir tidak terpublikasi). Universitas Sumatera Utara. Medan.
- Hutchins, D. A., & Boyd, P. W. (2016). Marine phytoplankton and the changing ocean iron cycle. *Nature Climate Change*, 6(12), 1072-1079.
<https://doi.org/10.1016/j.marchem.2015.03.016>

- Hopwood, M. J., Bacon, S., Arendt, K., Connelly, D. P., & Statham, P. J. (2015). Glacial meltwater from greenland is not likely to be an important source of fe to the North Atlantic. *Biogeochemistry*, 124(1), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10533-015-0091-6>
- Hopwood, M. J., Carroll, D., Dunse, T., Hodson, A., Holding, J. M., Iriarte, J. L., Ribeiro, S., Achterberg, E. P., Cantoni, C., Carlson, D. F., Chierici, M., Clarke, J. S., Cozzi, S., Fransson, A., Juul-Pedersen, T., Winding, M. S., & Meire, L. (2020). Review article: how does glacier discharge affect marine biogeochemistry and primary production In The Arctic?. *The Cryosphere*, 14(4), 1347-1383. <https://doi.org/10.5194/tc-14-1347-2020>
- Isnaeni, N., Suryanti., & Purnomo. (2015). Kesuburan perairan berdasarkan nitrat, fosfat, dan klorofil-a di perairan ekosistem terumbu karang Pulau Kari munjawa. *Diponegoro Journal of Maquares*, 4(2), 75-81. <http://ejournal.s1.undip.ac.id/index.php/maquares>
- Jennerjahn, T. C., Gilman, E., Krauss, K. W., Lacerda, L. D., Nordhaus, I., & Wolanski, E. (2017). Mangrove ecosystems under climate change. In: Rivera-Monroy, Victor, H., Lee, S. H, Kristensesn, Erik & Twilley, Robert R., (Eds.) Mangrove ecosystems: a global biogeographic perspective (pp. 211-244). *Springer International Publishing, Cham*. James Cook University.
- Kumar, V., Parihar, R. D., Sharma, A., Bakshi, P., Sidhu, G. P. S., Bali, A. S., & Rodrigo-Comino, J. (2019). Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: A meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses. *Chemosphere*, 236, 124364. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124364>
- Kunugi, M., Satoh, S., Ihara, K., Shibata, K., Yamagishi, Y., Kogame, K., Obokata, J., Takabayashi, A., & Tanaka, A. (2016). Evolution of green plants accompanied changes in light-harvesting systems. *Plant and Cell Physiology*, 61(10), 1651-1667. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcaa097>
- Kulkarni, R., Deobagkar, D., & Zinjarde, S. (2018). Metals in mangrove ecosystems and associated biota: A global perspective. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 153, 215-228. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.02.021>
- Kobayashi, K., & Masuda, T. (2016). Transcriptional regulation of tetrapyrrole biosynthesis in *Arabidopsis thaliana*. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1811. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01811>

- Lange, P. K., Brewin, R. J. W., Dall'Olmo, G., Tarran, G. A., Sathyendranath, S., Zubkov, M., & Bouman, H. A. (2018). Scratching beneath the surface: A model to predict the vertical distribution of *Prochlorococcus* using remote sensing. *Remote Sensing*, 10(6), 847. <https://doi.org/10.3390/rs10060847>
- Li, Y., Yin, H., Liu, X., Wang, C., & Chen, G. (2021). Influence of sediment resuspension on the transformation and distribution of iron species in a shallow eutrophic lake. *Science of The Total Environment*, 751, 141754. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141754>
- Liang, X., Song, J., Duan, L., Yuan, H., Li, X., & Li, N. (2023). Biogeochemical behavior and flux of dissolved Fe in the Changjiang Estuary and its adjacent sea area. *Marine Chemistry*, 248, 104208. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2022.104208>
- Lefcheck, J. S., Orth, R. J., Dennison, W. C., Wilcox, D. J., Murphy, R. R., Keisman, J., Gurbisz, C., Hannam, M., Landry, J. B., Moore, K. A., Patrick, C. J., Testa, J., Weller, D. E., & Batiuk, R. A. (2018). Long-term nutrient reductions lead to the unprecedented recovery of a temperate coastal region. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(14), 3658-3662. <https://doi.org/10.1073/pnas.1715798115>
- Lewandowska, A. M., Sommer, U., & Worm, B. (2014). Effects of sea surface warming on marine plankton. *Ecology Letters*, 17(5), 614-623. <https://doi.org/10.1111/ele.12265>
- Makatita, J. R., Susanto, A. B., & Mangimbulude, J. C. (2014). Kajian zat hara fosfat dan nitrat pada air dan sedimen padang lamun Pulau Tujuh Seram Utara Barat Maluku Tengah (No Publikasi 4959) [Skripsi, Universitas Terbuka]. Repository Universitas Terbuka.
- Maldonado, M.T., Allen, A.E., Chong, J.S., Lin, K., Leus, D., Karpenko, N., & Harris, S.L. (2023). Copper-dependent iron uptake in coastal and oceanic diatoms. *Limnology and Oceanography*, 51(4), 1729-1743. <https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.4.1729>
- Maldonado, M. T., Surma, S., & Pakhomov, E. A. (2016). Southern Ocean biological iron cycling in the pre-whaling and present ecosystems. *Philosophical transactions Series A, Mathematical, physical and engineering sciences*, 374(2081), 20150292. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0292>
- Marlian, N., Damar, A., & Effendi, H. (2015). Distribusi horizontal klorofil-a fitoplankton sebagai indikator kesuburan perairan di Teluk Meulaboh Aceh Barat. *Jurnal Ilmu Pertanian*, 20(3), 272-279. <https://doi.org/10.18343/jipi.20.3.272>

- Marendi, F., Hartoni., & Isnaini. (2017). Analisis pola sebaran konsentrasi klorofil-a menggunakan citra satelit landsat pada musim timur di perairan sekitar muara sungai lumpur Kabupaten Oki Provinsi Sumatera Selatan. *Maspari Journal*, 9(1), 33-42. <https://doi.org/10.56064/maspari.v9i1.4224>
- Marchetti, A., & Maldonado, M. T. (2016). *Iron*. In M. A. Borowitzka, J. Beardall, & J. A. Raven (Eds.), *The physiology of microalgae* (pp. 233-279). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24945-2_11
- Martiny, A. C., Pham, C. T., Primeau, F. W., Vrugt, J. A., Moore, J. K., Levin, S. A., & Lomas, M. W. (2013). Strong latitudinal patterns in the elemental ratios of marine plankton and organic matter. *Nature Geoscience*, 6(4), 279-283. <https://doi.org/10.1038/ngeo1757>
- Martiny, A. C., Lomas, M. W., Fu, W., Boyd, P. W., Chen, Y. L., Cutter, G. A., & Moore, J. K. (2019). Biogeochemical controls of surface ocean phosphate. *Science advances*, 5(8), eaax0341. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0341>
- Maslahah, N. H. M., Muskananfolo, M. R., & Purnomo, P. W. (2021). Analisis kandungan klorofil makroalga hijau dominan di perairan Teluk Awur, Jepara. *Journal of Fisheries and Marine Research*, 5(3), 617-627. <http://dx.doi.org/10.21776/ub.jfmr.2021.005.03.14>
- Mustofa, A. (2015). Kandungan nitrat dan pospat sebagai faktor tingkat kesuburan perairan pantai. *Jurnal Departemen Informatika, Sistem Informasi, Teknik Elektro, Keteknikan, Teknik Sipil dan Perikanan*, 6(1). <https://doi.org/10.34001/jdpt.v6i1.193>
- Mustofa, A., & Suryanto, A. (2020). Hubungan antara nitrat dan fosfat dengan klorofil-a di perairan Pulau Pari, Kepulauan Seribu. *Journal of Fisheries and Marine Research*, 4(2), 298-305. <https://doi.org/10.21776/ub.jfmr.2020.004.02.14>
- Meng, Y., Zheng, N., Yu, B., Wang, H., Liu, Z., & Zhao, X. (2020). Distribution, sourcing and pollution assessment of heavy metals in the sediments of The Xiangjiang River (China). *Environmental Geochemistry and Health*, 42(11), 3783-3798. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00614-2>
- Meng, X., Chen, W., Sun, C., Zhang, L., & Feng, X. (2021). Characteristics of nitrogen transport and transformation in the Yangtze Estuary under the influence of the Three Gorges Dam. *Science of The Total Environment*. 761, 143233. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143233>

- Moore, C. M., Mills, M. M., Arrigo, K. R., Berman-Frank, I., Bopp, L., Boyd, P. W., & Ulloa, O. (2013). Processes and patterns of oceanic nutrient limitation. *Nature geoscience*, 6(9), 701-710. <https://doi.org/10.1038/ngeo1765>
- Moreau, S., Boyd, P. W., & Strutton, P. G. (2020). Remote assessment of the fate of phytoplankton in the Southern Ocean sea-ice zone. *Nature Communications*, 11(1), 3108. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16931-0>
- Mouw, C. B., Hardman-Mountford, N. J., Alvain, S., Bracher, A., Brewin, R. J. W., Bricaud, A., Ciotti, A. M., Devred, E., Fujiwara, A., Hirata, T., Hirawake, T., Kostadinov, T. S., Roy, S., & Uitz, J. (2017). A consumer's guide to satellite remote sensing of multiple phytoplankton groups in the global ocean. *Frontiers in Marine Science*, 4, 41. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00041>
- McGillicuddy Jr, D. J. (2016). Mechanisms of physical-biological-biogeochemical interaction at the oceanic mesoscale. *Annual Review of Marine Science*. 8, 125-159. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010814-015606>
- Nastiti, A. S., Mujiyanto., & Krismono. (2020). Kelimpahan *Chaetoceros* spp. dan hubungannya dengan parameter kualitas air di perairan Muara Gembong, Jawa Barat. *Jurnal Biologi Indonesia*, 16(1), 39-46. <https://doi.org/10.47349/jbi/16012020/39>
- Nurmala, E., Utami, E., & Umroh. (2017). Analisis klorofil-a di perairan Kurau Kabupaten Bangka Tengah. *Akuatik Jurnal Sumberdaya Perairan*, 11(1), 61-68. <https://journal.ubb.ac.id/akuatik/article/view/216>
- Palar, H. 2012. *Pencemaran dan toksikologi logam berat*. Rineka Cipta. Jakarta.
- Palinkas, C. M., Nittrouer, C. A., Zheng, S., & Kuehl, S. A. (2021). Tracing the sources and cycling of suspended sediment and associated organic carbon in the lower Mississippi River. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 248, 106806. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106806>
- Patty, S. I., Arfah, H., & Abdul, M. S. (2015). Zat hara (fosfat, nitrat), oksigen terlarut dan pH kaitannya dengan kesuburan di perairan Jikumerasa, Pulau Buru. *Jurnal Pesisir dan Laut Tropis*, 1(1), 43-50. <https://media.neliti.com/media/publications/124813-ID-zat-hara-fosfat-nitrat-oksigen-terlarut.pdf>
- Patty, S. I. (2015). Karakteristik fosfat, nitrat dan oksigen terlarut di perairan Selat Lembeh, Sulawesi Utara. *Jurnal Pesisir dan Laut Tropis*, 2(1), 1-7. <https://doi.org/10.35800/jplt.3.2.2015.9581>

- Patty, S. I., Arfah, H., & Abdul, M. S. (2015). Zat hara (fosfat, nitrat), oksigen terlarut dan pH kaitannya dengan kesuburan di perairan Jikumerasa, Pulau Buru. *Jurnal Pesisir dan Laut Tropis*, 3(1), 43-50. <https://doi.org/10.35800/jplt.3.1.2015.9578>
- Paytan, A., & McLaughlin, K. (2007). The oceanic phosphorus cycle. *Chemical reviews*, 107(2), 563-576. <https://doi.org/10.1021/cr0503613>
- Paytan, A., Mackey, K. R., Chen, Y., Lima, I. D., Doney, S. C., Mahowald, N., & Post, A. F. (2009). Toxicity of atmospheric aerosols on marine phytoplankton. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(12), 4601-4605. <https://doi.org/10.1073/pnas.0811486106>
- Paerl, H. W., Hall, N. S., Peierls, B. L., & Rossignol, K. L. (2014). Evolving paradigms and challenges in estuarine and coastal eutrophication dynamics in a culturally and climatically stressed world. *Estuaries and Coasts*, 37(2), 243-258. <https://doi.org/10.1007/s12237-014-9773-x>
- Paerl, H. W., Scott, J. T., McCarthy, M. J., Newell, S. E., Gardner, W. S., Havens, K. E., & Wurtsbaugh, W. A. (2016). It takes two to tango: when and where dual nutrient (n & p) reductions are needed to protect lakes and downstream ecosystems. *Environmental Science & Technology*, 50(20), 10805-10813. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02575>
- Paerl, H. W., Gardner, W. S., Havens, K. E., Joyner, A. R., McCarthy, M. J., Newell, S. E., & Scott, J. T. (2016). Mitigating cyanobacterial harmful algal blooms in aquatic ecosystems impacted by climate change and anthropogenic nutrients. *Harmful Algae*, 54, 213-222. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2015.09.009>
- Purnaini, R., Widyastuti, E., & Suharno. (2017). Analisis kandungan nitrat dan fosfat pada tambak udang vannamei (*Litopenaeus vannamei*) yang berdekatan dengan hutan mangrove di Kabupaten Kendal, Jawa Tengah. *Jurnal Rekayasa Proses*, 11(1), 7-12. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.31085>
- Peers, G., & Price, N. M. (2021). Copper in the marine environment: Importance to phytoplankton and potential toxicity. *Frontiers in Marine Science*, 8, 653012. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.653012>
- Peers, G., & Price, N.M. (2022). Copper-containing plastocyanin used for electron transport by an oceanic diatom. *Nature*, 441(7091), 341-344. <https://doi.org/10.1038/nature04630>

- Permata, M. A. D., Purwiyanto, A. I. S., & Diansyah, G. (2018). Kandungan logam berat Cu (tembaga) dan Pb (timbal) pada air dan sedimen di kawasan industri Teluk Lampung, Provinsi Lampung. *Journal of Tropical Marine Science*, 1(1), 7-14.
<https://doi.org/10.33019/jour.trop.mar.sci.v1i1.667>
- Permadi, A., Suhendra., Ahda, M., Padya, S. A., Zufar, A. F., Anugrah, N., Hadi, S., & Suharto, E. T. (2022). Nilai klorofil dan antioksidan pada pencampuran spirulina dengan beberapa campuran sayuran. *Seminar Nasional Penelitian LPPM UMJ*. Hal 39.
<https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnaslit/article/view/14256>
- Posacka, A. M., Semeniuk, D. M., Whitby, H., van den Berg, C. M. G., Cullen, J. T., Orians, K., & Maldonado, M. T. (2019). Dissolved copper and copper-binding ligands in the western Arctic Ocean. *Marine Chemistry*, 215, 103689. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2019.103689>
- Pratama, W. F. (2022). Kontribusi alga *Gracilaria verrucosa* dalam perbaikan kualitas air dan penyerapan Pb pada tambak di pesisir Muara Gembong, Bekasi (Tesis Tidak Terpublikasikan). FPIK. IPB.
- Pratiwi, N. E., Eryati, R., & Ghitarina. (2019). Kandungan nutrisi di perairan Tanjung Jumalai Penajam Paser Utara Kalimantan Timur. *Jurnal Aquarine*, 6(2). <https://e-journals.unmul.ac.id/index.php/aquarine/article/view/6301>
- Pratiwi, N. T., Lukman, M., & Agustiadi, T. (2022). The spatial and temporal distribution of chlorophyll-a in the Brantas River Estuary, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 973(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/973/1/012031>
- Priadana, S., & Sunarsi, D. 2021. *Metode penelitian kuantitatif*. Pascal Books. Kota Tangerang. 39-42. 220 hlm.
- Price, N. M., & Morel, F. M. M. (1998). *Biological cycling of iron in the oceans. in: metal ions in biological systems (Sigel, A and Sigel, H., Eds.)*. Vol 35, 1-36 pp. Marcel Dekker, New York.
<https://morel.princeton.edu/publications/Biological-cycling-of-iron-in-the-ocean>
- Prihatin, M. S., Suprpto, D., & Rudiyaniti, S. (2016). Hubungan nitrat dan fosfat dengan klorofil-a di muara sungai Wulan Kabupaten Demak. *Diponegoro Journal of Maquares*, 5(2), 27-34. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/maquares>

- Prihatin, A., Setyono, P., & Sunarto. (2018). Sebaran klorofil-a, nitrat, fosfat dan plankton sebagai indikator kesuburan ekosistem di mangrove Tapak Tugurejo Semarang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 16(1), 68-77. <https://doi.org/10.14710/jil.16.1.68-77>
- Qotrunada, Y. A., Suryoputro, A. A. D., & Kunarso. (2023). Distribusi klorofil-a secara horizontal di perairan Pantai Slamiran Jawa Tengah. *Indonesian Journal of Oceanography*, 5(2), 141-150. <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/ijoce>
- Racault, M. F., Sathyendranath, S., Brewin, R. J., Raitsos, D. E., Jackson, T., & Platt, T. (2017). Impact of El Niño variability on oceanic phytoplankton. *Frontiers in Marine Science*, 4, 133. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00133>
- Rahmadani, P. A., Wicaksono, A., Jayanthi, O. W., Effendy, M., Nuzula, N. I., Kartika, A. G. D., Syaifullah, M., Putri, D. S., & Hariyanti, A. (2021). Analisa kadar fosfat sebagai parameter cemaran bahan baku garam pada badan sungai, muara, dan pantai di Desa Padelagan Kabupaten Pamekasan. *Juvenil*, 2(4), 318-323. <https://journal.trunojoyo.ac.id/juvenil>
- Rahman, M. S., Khan, M. D. H., Jolly, Y. N., Kabir, J., Akter, S., & Salam, A. (2021). A critical review on present status, impacts, and mitigation of heavy metals in surface water: modeling and remediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(45), 63197-63225. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16441-6>
- Raharjo, M., Muslim., & Maslukah, L. (2016). Sebaran konsentrasi nitrat, fosfat dan klorofil-a di perairan Pantai Slamiran Pekalongan. *Jurnal Oseanografi*, 5(4), 462-469. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>
- Ramos, R. J., Vinzon, S. B., & França, G. B. (2021). Hydrodynamics and morphodynamics of the Caravelas Estuary, Brazil. *Ocean & Coastal Management*. 199, 105383. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105383>
- Richon, C., & Tagliabue, A. (2019). Insights into the major processes driving the global distribution of copper in the ocean from a global model. *Global Biogeochemical Cycles*, 33, 1594-1610. <https://doi.org/10.1029/2019GB006280>
- Rico, A., Vighi, M., Van den Brink, P. J., ter Horst, M., Macken, A., Lillicrap, A., & Gezgin, T. (2018). Use of models for the environmental risk assessment of veterinary medicines in European aquaculture: Current situation and future perspectives. *Reviews in Aquaculture*, 11(4), 969-988. <https://doi.org/10.1111/raq.12274>

- Ridwan, M., Suryono, & Nuraini, R. A. T. (2018). Studi kandungan nutrisi pada ekosistem mangrove perairan muara sungai kawasan pesisir Semarang. *Journal of Marine Research*, 7(4), 283-292. <https://doi.org/10.14710/jmr.v7i4.25927>
- Rios, M. F., Moresino-Hernandez, R. D., & Galvan, D. E. (2020). Assessing urban microplastic pollution in a benthic habitat of Patagonia Argentina. *Marine Pollution Bulletin*, 159, 111491. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111491>
- Rivaro, P., Lanni, C., Massolo, S., Abelson, M. L., Vittor, C. D., and Frache, R. (2011). Distribution of dissolved labile and particulate iron and copper in Terra Nova Bay Polynya (Ross Sea, Antarctica) surface waters in relation to nutrients and phytoplankton growth. *Continental Shelf Research*, 31, 879-889. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2011.02.013>
- Rumanti, M., Rudiyan, S., & Suparjo, M. N. 2014. Hubungan antara kandungan nitrat dan fosfat dengan kelimpahan fitoplankton di Sungai Breksi Kabupaten Pekalongan. *Jurnal Management of Aquatic Resources*, 3(1), 168-176. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/maquares>
- Rousseaux, C. S., & Gregg, W. W. (2015). Recent decadal trends in global phytoplankton composition. *Global Biogeochemical Cycles*, 29(10), 1674-1688. <https://doi.org/10.1002/2015GB005139>
- Saito, M.A., Bertrand, E.M., Dutkiewicz, S., Bulygin, V.V., Moran, D.M., Monteiro, F.M., Follows, M.J., Valois, F.W., & Waterbury, J.B. (2022). Iron conservation by reduction of metalloenzyme inventories in the marine diazotroph *Crocospaera watsonii*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(6), 2184-2189. <https://doi.org/10.1073/pnas.1006943108>
- Sunda, W. G., & Huntsman, S. A. (2004). Relationship among photoperiod, carbon fixation, growth, chlorophyll a, and cellular iron and zinc in a coastal diatoms. *Limnology Oceanography*, 49(5), 1742-1753. <https://doi.org/10.4319/lo.2004.49.5.1742>
- Supriyanti, E., & Endrawati, H. (2015). Kandungan logam berat besi (Fe) pada air, sedimen, dan kerang hijau (*Perna viridis*) di perairan Tanjung Emas Semarang. *Jurnal Kelautan Tropis*, 18(1), 38-45. <https://doi.org/10.14710/jkt.v18i1.512>
- Suratri, A. (2021). Kelimpahan spasial temporal mikronutrien besi, zink, dan tembaga pada aliran yang berbeda di Pantai Menganti (Tesis Tidak Terpublikasi). Universitas Jendral Soedirman.

- Susanti, R., Marwati, T., & Yudhistira, A. (2020). Analisis nitrat dan fosfat di tambak udang vannamei (*Litopenaeus vannamei*) Kabupaten Bangkalan, Jawa Timur. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 21(2), 205-212. <https://doi.org/10.29122/jtl.v21i2.3848>
- Semeniuk, D. M., Taylor, R. L., Bundy, R. M., Johnson, W. K., Cullen, J. T., Robert, M., Barbeau, K. A & Maldonado, M. T. (2016). Iron-copper interactions in iron-limited phytoplankton in the Northeast Subarctic Pacific Ocean. *Limnology and Oceanography*, 61, 279-297. <https://doi.org/10.1002/lno.10210>
- Setiani, H., Anhar, S., & Norma, A. (2019). Hubungan kandungan nitrat dan fosfat pada air dan sedimen terhadap kerapatan lamun di pantai Prawean Bandengan, Jepara. *Diponegoro Journal of Maquares*, 8(4), 291-299. <https://doi.org/10.14710/marj.v8i4.26485>
- Schlitzer, R., Anderson, R. F., Dodas, E. M., Lohan, M., Geibert, W., & Tagliabue, A. (2018). *The GEOTRACES intermediate data product 2017*. Chemical Geology. 493, 210-223. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.05.040>
- Schoffman, H., Lis, H., Shaked, Y., & Keren, N. (2016). Iron-nutrient interactions within phytoplankton. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1223. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01223>
- Tagliabue, A., Bowie, A. R., Boyd, P. W., Buck, K. N., Johnson, K. S., & Saito, M. A. (2017). The integral role of iron in ocean biogeochemistry. *Nature*. 543(7643), 51-59. <https://doi.org/10.1038/nature21058>
- Tagliabue, A., Hawco, N. J., Bundy, R. M., Landing, W. M., Milne, A., Morton, P. L., & Saito, M. A. (2018). The role of external inputs and internal cycling in shaping the global ocean cobalt distribution: Insights from the first cobalt biogeochemical model. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(4), 594-616. <https://doi.org/10.1002/2017GB005830>
- Tagliabue, A., Hawco, N. J., Bundy, R. M., Landing, W. M., Milne, A., Morton, P. L., & Saito, M. A. (2019). Hydrothermal activity lowers iron limitation of primary productivity in the northeast Pacific Ocean. *Nature Communications*, 12(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24281-8>
- Tong, Y., Zhang, W., Wang, X., Couture, R. M., Larssen, T., Zhao, Y., & Lin, Y. (2017). Decline in Chinese lake phosphorus concentration accompanied by shift in sources since 2006. *Nature Geoscience*, 10(7), 507-511. <https://doi.org/10.1038/ngeo2967>

- Tortell, P. D., Maldonado, M. T., Granger, J., and Price, N. M. (1999). Marine bacteria and biogeochemical cycling of iron in the oceans. *FEMS Microbiology Ecology*, 29, 1-11. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1999.tb00593.x>
- Thomas, M. K., Aranguren-Gassis, M., Kremer, C. T., Gould, M. R., Anderson, K., Klausmeier, C. A., & Litchman, E. (2017). Temperature–nutrient interactions exacerbate sensitivity to warming in phytoplankton. *Global Change Biology*, 26(8), 4444-4456. <https://doi.org/10.1111/gcb.15126>
- Twining, B. S., & Baines, S. B. (2013). The trace metal composition of marine phytoplankton. *Annual review of marine science*, 5, 191-215. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121211-172322>
- Twining, B. S., Rauschenberg, S., Baer, S. E., Lomas, M. W., Martiny, A. C., & Antipova, O. (2019). A nutrient limitation mosaic in the eastern tropical Indian Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 166, 125-140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.05.001>
- Wang, Y., Ao, L., Lei, B., & Zhang, S. (2019). Sources, distribution, and ecological risks of heavy metals in river water and sediments: a comprehensive review. *Journal of Hazardous Materials*, 441, 129818. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129818>
- Widiardja, A. R., Nuraini, R. A. T., & Wijayanti, D. P. (2021). Kesuburan perairan berdasarkan kandungan nutrisi pada ekosistem mangrove Desa Bedono, Demak. *Journal of Marine Research*, 10(1), 64-71. <https://doi.org/10.14710/jmr.v10i1.28480>
- Wu, P., Kainz, M. J., Åkerblom, S., Bravo, A. G., Sonesten, L., Branfireun, B., Deininger, A., Bergström, A. K., & Bishop, K. (2019). Terrestrial diet influences mercury bioaccumulation in zooplankton and macroinvertebrates in lakes with differing dissolved organic carbon concentrations. *Science of The Total Environment*, 669, 821-832. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.171>
- Xiao, W., Liu, X., Irwin, A. J., Laws, E. A., Wang, L., Chen, B., & Huang, B. (2018). Warming and eutrophication combine to restructure diatoms and dinoflagellates. *Water Research*, 128, 206-216. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.10.051>
- Yao, X., Zhang, Y., Zhang, L., & Zhou, Y. (2019). A bibliometric review of nitrogen cycling research in aquatic environments. *Water Science and Technology*, 80(10), 1987-1997. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.026>

- Yuliana., Adiwilaga, E. M., Harris, E., dan Pratiwi, T. M. (2012). Hubungan antara kelimpahan fitoplankton dengan parameter fisika kimia perairan di Teluk Jakarta. *Jurnal Akuatik*, 3(2), 169-179.
<https://jurnal.unpad.ac.id/akuatika/article/view/1617>
- Yuan, L. L., & Pollard, A. I. (2015). Classifying lakes to improve precision of nutrient–chlorophyll relationships. *Freshwater Science*, 34(2), 698-708.
<https://doi.org/10.1086/681128>
- Yolanda, D. S., Prartono, T., Koropitan, A. F., Hartanto, M. T., Lestari., & Lubis, M. R. K. (2019). Partisi kimiawi Cu dan Fe pada sedimen permukaan di pesisir timur dan barat Sumatra Utara. *Jurnal Imu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 11(2), 387-397.
<https://doi.org/10.29244/jitkt.v11i2.24057>
- Zakiyah, U., Rohani, G. A., & Darmawan, A. (2019). Distribusi spasial klorofil-a di perairan pantai Kabupaten Tulungagung Jawa Timur menggunakan teknologi penginderaan jauh. *Journal of Fisheries and Marine Research*, 3(3), 315-321.
<https://doi.org/10.21776/ub.jfmr.2019.003.03.5>
- Zhang, Y., Naidu, R., Xu, Y., Zhang, Y., Gillam, A. H., Schofield, R., Zhu, Y., & Wang, Z. (2014). Regulation of copper on iron uptake and growth of a coastal diatom: implications for phytoplankton growth in the marine environment. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(8), 2431-2446. <https://doi.org/10.1029/2019JG005041>
- Zhang, C., Ding, S., Xu, D., Tang, Y., & Wong, M. H. (2019). Bioavailability assessment of phosphorus and metals in soils and sediments: A review of diffusive gradients in thin films (DGT). *Science of The Total Environment*, 670, 50-64.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.222>
- Zhang, C., Yu, Z., Zeng, G., Jiang, M., Yang, Z., Cui, F., Zhu, M., Shen, L., & Hu, L. (2021). Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability. *Environment International*, 73, 270-281.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106288>
- Zhao, S., Feng, C., Wang, D., Liu, Y., & Shen, Z. (2014). Salinity increases the mobility of Cd, Cu, Mn, and Pb in the sediments of Yangtze Estuary: relative role of sediments' properties and metal speciation. *Chemosphere*, 144, 2329-2335.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.02.001>

Zhao, L. S., Huokko, T., Wilson, S., Simpson, D. M., Wang, Q., Ruban, A. V., Mullineaux, C. W., Zhang, Y. Z., & Liu, L. N. (2020). Structural variability, coordination and adaptation of a native photosynthetic machinery. *Nature Plants*, 6(7), 869-882.
<https://doi.org/10.1038/s41477-020-0694-3>

Zhou, L., Liu, Z., Liu, F., Peng, J., & Zhou, P. (2023). Nonlinear canonical correspondence analysis and its application. *Scientific Reports*, 13,7518.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-34515-y>