



Research Articles

Identifikasi Hubungan Antara Salinitas dan EC (*Electrical Conductivity*) Untuk Pengembangan Mitigasi Pengukuran Numerik-*in Situ* di Area Estuari: Mitigasi Kebencanaan Kualitas Air di Muara Kerandangan

Salinity and Electrical Conductivity (EC) Relationship for In-Situ Numerical Measurement and Mitigation in Estuaries: A Case Study of Water Quality Disaster Mitigation in the Kerandangan Estuary

Arif Budianto¹, Alfina Taurida Alaydrus¹, Susi Rahayu^{1*}, Mira Andini¹,
Ni Ketut Anggriani², Shinta Desiyana Fajarica³

¹Program Studi Fisika, Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat, INDONESIA

²Program Studi Magister Pendidikan IPA, Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat, INDONESIA

³Program Studi Ilmu Komunikasi, Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat, INDONESIA

*corresponding author, email : susirahayu@unram.ac.id

Manuscript received: 30-06-2025. Accepted: 25-09-2025

ABSTRAK

Sifat perairan muara yang fluktuatif menuntut metode pendekatan yang baru dan akurat untuk menentukan kadar garam atau salinitasnya. Cara ini dapat dilakukan melalui pengukuran secara langsung dan *real-time* tingkat EC sesaat dan harian di perairan muara secara langsung (*direct measurement*) menggunakan sensor EC. Di sisi lain, penelitian sejenis belum banyak dilakukan, terlebih bagi riset yang bersifat *real-time*. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi hubungan antara EC dengan salinitas di muara dengan studi kasus muara sekitaran Batulayar, Kabupaten Lombok Barat, dengan model pengukuran secara langsung selama satu hari non-stop. Pengukuran dilakukan selama 5 hari fase bulan yang berbeda dengan data langsung dan pendekatan linearitas numerik menggunakan *plug in data analysis*. Hasil identifikasi menunjukkan adanya hubungan antara EC dan salinitas. Pada saat nilai minimum, nilai salinitas berubah berkurang saat EC berkurang. Pengurangan atau penurunan yang terjadi bersifat kuadratik dengan nilai koefisien determinasi yang didapatkan sebesar 0,8684 ($y = 87397x^2 - 11173x + 2004,8$). Karakteristik ini juga didukung dengan parameter lain hasil pengukuran, seperti nilai TDS yang bersifat linear dengan TDS. Karakteristik hubungan TDS dengan EC jauh lebih kuat, yang ditunjukkan dengan persamaan linear ($R^2 > 0,90$).

Kata kunci : air; electrical conductivity; Kerandangan; metode pengukuran; muara; salinitas

ABSTRACT

The dynamic nature of estuarine waters necessitates new and accurate methodological approaches for determining salt content or salinity. This can be achieved through direct and real-time measurement of instantaneous and daily EC (Electrical Conductivity) levels in estuaries using EC sensors. On the other hand, similar real-time research has been limited, especially for studies of a continuous real-time nature. Therefore, this study aims to identify the

relationship between EC and salinity in an estuary, using the area around the Batulayar estuary, West Lombok Regency, as a case study, employing a direct measurement model continuously for one full day. Measurements were conducted over 5 days during different lunar phases, using direct data acquisition and a numerical linearity approach via data analysis plug-ins. The identification results demonstrate a relationship between EC and salinity. At minimum values, salinity decreases as EC decreases. This reduction follows a quadratic pattern, with an obtained coefficient of determination (R^2) of 0.8684 ($y = 87397x^2 - 11173x + 2004.8$). This characteristic is also supported by other measured parameters, such as TDS (Total Dissolved Solids), which exhibits a linear relationship with EC. The relationship characteristic between TDS and EC is considerably stronger, as indicated by a linear equation ($R^2 > 0.90$).

Keywords: water; electrical conductivity; Kerandangan; measurement method; estuary; salinity

PENDAHULUAN

Ekosistem perairan muara (ekosistem estuari) merupakan area ekosistem perairan semi tertutup (secara acak atau periodik bersifat terbuka atau tertutup mengikuti pasang surut air laut/ *tide level*) Ekosistem muara terletak di pesisir pantai, tempat bertemunya air tawar dari sungai dengan air asin dari laut. Karakteristik unik area ini adalah tingkat salinitas (kadar garam) yang fluktuatif atau berubah-ubah yang dipengaruhi oleh pasang surut air laut dan volume air tawar yang masuk dari sungai (Dix et al., 2025). Ekosistem air muara menjadi habitat penting bagi berbagai spesies hewan dan tumbuhan, area pembesaran, dan kawasan perlindungan bagi berbagai spesies ikan, kerang kecil, krustasea, dan burung, terutama pada tahap awal kehidupan (Jantama et al., 2025).

Salah satu ekosistem air muara di pulau Lombok adalah muara sekitar Batulayar yang berada di kabupaten Lombok Barat. Sama halnya dengan muara lain, area perairan ini memiliki karakteristik unik, yakni sifatnya yang dinamis, seperti pada salinitas. Tingkat garam dapat meningkat saat air pasang atau musim kemarau, dan menurun saat air surut atau musim hujan (Zhu et al., 2025). Sebagaimana muara lain pada umumnya, dasar perairan muara ini umumnya terdiri dari substrat berlumpur dan pasir halus yang berasal dari endapan yang dibawa oleh air sungai dan air laut (Lee et al., 2025).

Arus di area muara cenderung lebih tenang dan lambat dibandingkan dengan laut terbuka, memungkinkan terjadinya pengendapan material (Jantama et al., 2025). Oleh sebab itu, pengukuran EC (*electrical conductivity*) dan TDS (*total dissolved solvent*) dapat dilakukan secara *real-time* dan berulang-ulang dengan lebih efektif. Pengukuran parameter EC dapat digunakan untuk mengidentifikasi kemungkinan tingkat salinitas di daerah perairan tersebut (Benavente et al., 2025). Di sisi lain, pengukuran EC dapat digunakan untuk menganalisis tingkat TDS secara langsung dengan tingkat akurasi dan presisi yang baik.

Pengukuran salinitas dapat dilakukan dengan berbagai cara. Untuk mengukur salinitas (kadar garam) air di muara, dapat digunakan beberapa metode dan alat yang berbeda. Karena salinitas di muara cenderung berubah-ubah, metode yang dipilih harus praktis dan akurat. Refraktometer adalah alat yang paling umum dan mudah digunakan untuk pengukuran di lapangan. Alat ini bekerja dengan mengukur indeks bias cahaya melalui sampel air. Metode lain yaitu menggunakan alat *portable* bernama salinometer atau konduktimeter. Metode ini adalah metode standar ilmiah dan sangat akurat, terutama untuk penelitian. Alat ini mengukur konduktivitas listrik (daya hantar listrik) air. Prinsip fisika utama adalah sifat air asin yang menghantarkan listrik lebih baik dibandingkan air tawar. Metode ketiga yakni menggunakan

hidrometer. Hidrometer adalah alat berbentuk gelas sederhana yang mengukur berat jenis (densitas) cairan, dengan prinsip fisika sifat air asin yang lebih padat dibandingkan air tawar. Meskipun unggul secara ekonomis, pengukuran menggunakan hidrometer kurang akurat dibandingkan refraktometer atau salinometer, mudah pecah, dan pembacaan dapat dipengaruhi oleh suhu air secara signifikan (Sane et al., 2025).

Proses pemantauan kualitas air muara merupakan salah satu cara yang dapat digunakan dalam proses mitigasi kebencanaan kualitas air di muara. Langkah ini termasuk ke dalam berbagai strategi mitigasi untuk mengelola dan mengurangi risiko bencana terkait penurunan kualitas air di ekosistem muara. Mitigasi ini penting karena ekosistem muara sangat rentan terhadap polusi dari darat maupun laut. Strategi mitigasi kebencanaan kualitas air muara dapat dikategorikan menjadi tiga pendekatan utama, yaitu: pengendalian sumber polusi, restorasi dan konservasi ekosistem muara, serta pengawasan, peraturan, dan peringatan dini (Hendrickx et al., 2023).

Sifat perairan muara di Batulayar yang fluktuatif menuntut metode pendekatan yang baru dan akurat untuk menentukan kadar garam atau salinitasnya, serta langkah-langkah mitigasi kebencanaan yang dapat diterapkan. Cara ini dapat dilakukan melalui pengukuran secara langsung dan *real-time* tingkat EC sesaat dan harian di perairan muara secara langsung (*direct measurement*) menggunakan sensor EC. Di sisi lain, penelitian sejenis belum banyak dilakukan, terlebih bagi riset yang bersifat *real-time*. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi hubungan antara EC dengan salinitas di muara sekitaran Batulayar, Kabupaten Lombok Barat, dengan model pengukuran secara langsung selama satu hari non-stop.

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan setiap 24 jam selama 5 sesi bulan yang berbeda (*moon phase*). Penelitian dilakukan di area muara di sekitaran Senggigi-Batulayar, Kabupaten Lombok Barat dengan parameter ukur yang ditampilkan pada Tabel 1. Parameter utama yang diukur adalah salinitas dan EC yang digunakan untuk membentuk linearitas hubungan antara kedua parameter tersebut.

Tabel 1. Parameter pengukuran di lokasi penelitian

Variabel	Variasi Pengukuran
EC (uS/cm)	Hari 1, Hari 2, Hari 3, Hari 4, Hari 5 (24 jam non-stop)
TDS (ppt)	Hari 1, Hari 2, Hari 3, Hari 4, Hari 5 (24 jam non-stop)
Salinitas (%)	Hari 1, Hari 2, Hari 3, Hari 4, Hari 5 (24 jam non-stop)
pH	Hari 1, Hari 2, Hari 3, Hari 4, Hari 5 (24 jam non-stop)

Pengukuran EC di Ekosistem Muara

Pengukuran EC dilakukan menggunakan sistem EC meter yang didesain menggunakan sensor EC (DF-Robot versi 2.0) (Gambar 1).



Gambar 1. Desain sistem pengukuran EC-salinitas menggunakan sensor dan mikrokontroler berbasis IoT (Budianto et al., 2021)

Sensor ini dihubungkan ke mikrokontroler jenis Arduino Mega2560-ESP8266 yang mampu bekerja secara IoT (*Internet of Things*) (Azreen et al., 2024; Widhowati et al., 2021). Untuk koneksi internet, digunakan *wireless router* yang terhubung melalui antena mikrokontroler. Data keluaran sensor yang sudah dikalibrasi dikirim ke server ThingSpeak.com secara *real-time*.

Analisis Data

Seluruh data ditampilkan dalam bentuk rata-rata (mean value) dan standar deviasi (SD) yang berasal dari unduhan ThingSpeak.com (portal untuk *server* IoT). Data dibandingkan menggunakan ANOVA *test* (*p-value*) untuk membedakan hari pertama dan hari kedua pengukuran. Data kalibrasi ditampilkan dalam persamaan berikut (Persamaan 1) (Budianto et al., 2021).

$$y = ax + b \tag{1}$$

Nilai koefisien determinasi (R^2) juga dianalisis untuk mengetahui linearitas kinerja dari hasil pengukuran yang telah dilakukan. Pengujian numerik dilakukan dengan kode pemrograman melalui fitur *plug in* Data Analysis di Microsoft Excel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tabel 2 berikut menunjukkan hasil pengukuran secara langsung di lapangan. Pengukuran ini dilakukan dalam waktu 24 jam selama 5 hari dalam fase bulan yang berbeda. Keseluruhan data ditampilkan dalam bentuk rata-rata selama 5 hari tersebut.

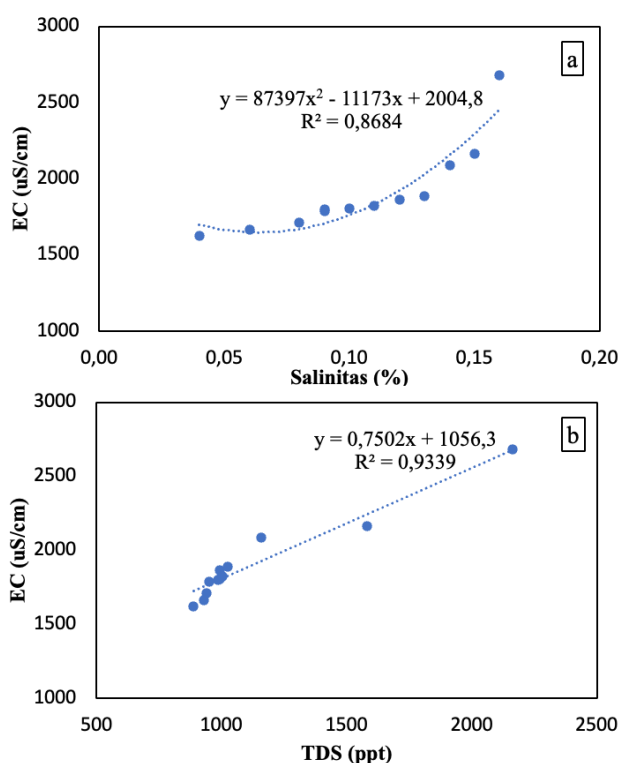
Tabel 2. Hasil pengukuran EC, TDS, dan parameter lainnya secara 24 jam non-stop

Jam	EC (uS/cm)	TDS (ppt)	pH	Sal (%)	Temp (°C)
00.00	1785	951	8,51	0,09	26,90
02.00	1885	1023	8,63	0,13	26,90
04.00	1822	1002	8,59	0,11	26,90
06.00	1803	991	8,57	0,10	26,70
08.00	1797	985	8,53	0,09	26,60
10.00	1864	994	8,59	0,12	27,40
12.00	2161	1580	9,09	0,15	28,60
14.00	2680	2164	9,45	0,16	32,80
16.00	2087	1159	9,18	0,14	30,40
18.00	1711	938	8,97	0,08	26,50
20.00	1664	928	8,75	0,06	26,40
22.00	1622	888	8,57	0,04	26,10

Data hasil pengukuran menunjukkan adanya hubungan yang cukup signifikan antara EC dengan salinitas. Hasil aproksimasi linearitas yang diolah menggunakan *Data Analysis* menunjukkan kecenderungan kenaikan salinitas terjadi saat level EC meningkat. Dapat dilihat berdasarkan sebaran data rata-rata bahwa pada nilai maksimum EC (2680 uS/cm), nilai salinitasnya juga meningkat hingga 0,16% (14.00). Di sisi yang lain, pada saat nilai minimum, nilai salinitas berubah menjadi 0,04% saat EC berada pada level 1622 uS/cm (pukul 22.00 WITA) (Gambar 2). Nilai koefisien determinasi yang didapatkan sebesar 0,8684, dengan pendekatan non-linear berupa persamaan kuadrat $y = 87397x^2 - 11173x + 2004,8$. Karakteristik ini juga didukung dengan parameter lain hasil pengukuran, seperti nilai TDS yang bersifat linear dengan TDS. Karakteristik hubungan TDS dengan EC jauh lebih kuat, yang ditunjukkan dengan persamaan linear berikut.

$$y = 0.7502x + 1056,3 \tag{2}$$

Nilai koefisien determinasi R^2 yang dihasilkan sebesar 0,9339 ($p < 0,05$).



Gambar 2. Hubungan antara (a) salinitas dengan EC, dan (b) TDS dengan EC.

Salinitas, EC, dan TDS merupakan parameter yang saling berkaitan dalam menggambarkan kondisi kualitas air di wilayah muara. Ketiganya berkaitan erat karena dipengaruhi oleh jumlah ion terlarut dalam air (Oktavia et al., 2025). Salinitas menggambarkan konsentrasi total garam yang terdapat dalam air, terutama ion-ion seperti natrium (Na^+), klorida (Cl^-), magnesium (Mg^{2+}), dan sulfat (SO_4^{2-}). Sementara EC mencerminkan kemampuan air untuk menghantarkan arus listrik, yang meningkat seiring bertambahnya konsentrasi ion-ion tersebut (Chasanah, 2025). TDS menggambarkan total padatan terlarut, baik anorganik maupun organik, yang menjadi bagian utama dalam menentukan tingkat kekeruhan ionik dan

tingkat keasinan air (Salelatu et. al. 2025). Secara umum, semakin tinggi nilai salinitas, maka EC dan TDS juga akan meningkat karena ketiganya dipengaruhi oleh jumlah ion terlarut dalam air.

Lingkungan muara, interaksi antara air sungai dan air laut menciptakan gradien salinitas yang sangat dinamis (Amatullah et al. 2024). Ketika pengaruh air laut lebih dominan seperti saat pasang naik, jumlah garam terlarut meningkat sehingga EC dan TDS juga cenderung naik. Sebaliknya, ketika debit air sungai meningkat (berkaitan dengan mitigasi kebencanaan saat pasang surut air laut atau banjir rob), khususnya pada musim penghujan, salinitas cenderung menurun yang diikuti menurunnya nilai EC dan TDS (Nadillah et al. 2025). Hubungan ini menunjukkan bahwa EC dapat digunakan sebagai indikator cepat untuk mendeteksi perubahan salinitas, sementara TDS memberikan gambaran lebih menyeluruh mengenai total kandungan terlarut. Fluktuasi musiman yang berhubungan dengan bulan juga memiliki peran penting dalam variasi salinitas, EC, dan TDS di muara (Gea & Telaumbanua, 2025). Pada bulan-bulan basah atau curah hujan tinggi meningkatkan aliran air tawar ke muara, mengencerkan salinitas sehingga nilai EC dan TDS turun. Sebaliknya, pada bulan-bulan kering dan saat kondisi pasang purnama (*spring tide*), air laut lebih jauh masuk ke muara sehingga menyebabkan peningkatan salinitas, EC, dan TDS. Perubahan ini semakin dipengaruhi oleh siklus bulan yang memengaruhi tinggi rendahnya pasang-surut (Mbaba et al. 2025). saat bulan purnama dan bulan baru, gaya tarik gravitasi lebih kuat sehingga pasang menjadi lebih tinggi dan intrusi air laut ke muara lebih besar (Liana et al. 2025). Kondisi ini menyebabkan nilai salinitas, EC, dan TDS cenderung lebih tinggi dibandingkan pada fase seperempat bulan (*neap tide*).

Suhu air diyakini turut berkontribusi dalam fluktuasi temperatur atau suhu udara *ambient*, yang merujuk pada fenomena variasi antarbulan, dan faktor ini turut memengaruhi nilai EC. Pada bulan-bulan dengan suhu lebih tinggi, mobilitas ion dalam kolom air meningkat sehingga nilai EC cenderung naik meskipun tingkat salinitas relatif tetap. Interaksi antara variabel musim, intensitas hujan, suhu, serta fase bulan menghasilkan pola fluktuasi yang kompleks namun masih dapat diprediksi dalam jangka Panjang (Pratiwi et al. 2025). Pemahaman terhadap dinamika tersebut sangat penting dalam pengelolaan ekosistem muara, karena perubahan pada parameter salinitas, EC, dan TDS akan berdampak langsung terhadap kelangsungan organisme muara, stabilitas struktur sedimen, serta kualitas air yang digunakan untuk aktivitas perikanan maupun kebutuhan domestik (Sakinatunnisa et al. 2025). Dengan demikian, dalam hal ini ketiga parameter tersebut menunjukkan korelasi positif yang kuat di lingkungan muara, sementara variabilitas bulanan yang dipengaruhi oleh mekanisme pasang-surut dan kondisi musim berperan penting dalam mengatur tingkat pencampuran antara air tawar dan air laut. Oleh karena itu, pemantauan ketiga parameter tersebut secara simultan pada berbagai fase bulan menjadi langkah krusial untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai dinamika sifat fisik-kimia perairan muara, yang dapat bermanfaat dalam proses mitigasi kebencanaan ekosistem air muara.

KESIMPULAN

Hasil identifikasi menunjukkan adanya hubungan antara EC dan salinitas. Pada saat nilai minimum, nilai salinitas berubah berkurang saat EC berkurang. Pengurangan atau penurunan yang terjadi bersifat kuadratik dengan nilai koefisien determinasi yang didapatkan sebesar

0,8684 ($y = 87397x^2 - 11173x + 2004,8$). Karakteristik ini juga didukung dengan parameter lain hasil pengukuran, seperti nilai TDS yang bersifat linear dengan TDS. Karakteristik hubungan TDS dengan EC jauh lebih kuat, yang ditunjukkan dengan persamaan linear ($R^2 > 0,90$).

DAFTAR PUSTAKA

- Amatullah, D., Sukmono, T., Ihsan, M., Wulandari, T., & Suprayogi, D. (2024). Kelimpahan perifiton pada substrat alami di air terjun muara Karing kawasan Geopark Merangin Jambi. *BIOMA: Jurnal of Biologi dan Pembelajarannya*, 6(1), 82-93.
- Azreen, N., Jais, M., Fikri, A., Saufi, M., Kassim, M., Marlina, M., Karim, A., Abdulsalam, M., & Atirah, N. (2024). Improved accuracy in IoT-Based water quality monitoring for aquaculture tanks using low-cost sensors: Asian seabass fish farming. *Heliyon*, 10(8), e29022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29022>
- Benavente, D., Ruiz, M. C., García-martínez, N., Vergara, M., Fernandez-cortes, A., & Sanchez-moral, A. (2025). Estimation of mineral saturation and CO₂ partial pressure in natural waters using electrical conductivity and pH: A fast and versatile on-site tool. *Journal of Hydrology*, 660(PB), 133474. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133474>
- Budianto, A., Wardoyo, A. Y. P., Masrurroh, Dharmawan, H. A., & Nurhuda, M. (2021). Performance test of an aerosol concentration measurement system based on quartz crystal microbalance. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1811(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1811/1/012033>
- Chasanah, U. (2025). Tinjauan pustaka: analisis spasial-temporal fluktuasi TDS dan konduktivitas listrik sebagai indikator awal kontaminasi logam berat. *Jurnal of Penginderaan Jauh Indonesia*, 4(2), 76-81.
- Gea, J. H., & Telaumbanua, A. T. P. (2025). Ekosistem perairan payau: struktur, komponen, dan peran ekosistem dalam mendukung biodiversitas pesisir. *Jurnal of Perikanan dan Kelautan*, 2(1), 175-180.
- Hendrickx, G. G., Kranenburg, W. M., Antolínez, J. A. A., Huismans, Y., Aarninkhof, S. G. J., & Herman, P. M. J. (2023). Sensitivity of salt intrusion to estuary-scale changes: A systematic modelling study towards nature-based mitigation measures. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 295, 108564. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108564>
- Jantama, U., Jati, Y., & Hisaki, Y. (2025). Water quality in the macro-tidal Kampar estuary, Indonesia: Real-time measurement during significant tidal bore passages. *Kuwait Journal of Science*, 52(3), 100409. <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2025.100409>
- Lee, H., Zhumabieke, M., Jeon, G. ui, Shin, K. H., Khim, B. K., & Park, J. H. (2025). Differential river-to-sea transfers and CH₄ dominance of greenhouse gas emissions in urbanized and impounded estuaries. *Science of the Total Environment*, 978(March). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179444>
- Liana, L., Jabbar, M. A., & Nurhudah, M. (2024). Analisis kualitas air sebagai indikator pelabuhan perikanan berwawasan lingkungan di PPN Muara Angke. *ALBACORE Jurnal of Penelitian Perikanan Laut*, 8(3), 245-254.

- Pratiwi, N., Handoyo, G., & Indrayanti, E. (2025). Hubungan kandungan fosfat dan parameter lingkungan di muara sungai Mrican, Pekalongan. *Indonesian Journal of Oceanography*, 7(1), 54-60.
- Mbaba, K. Y., Lero, O. R., & Wohangara, M. G. (2024). Studi kualitas perairan budidaya rumput laut Di Kabupaten Sumba Timur. *Kappa Journal*, 8(3), 451-456.
- Nadillah, N., Maysarah, N. A., & Putra, N. (2025). Pengaruh pasang surut terhadap salinitas dan suhu permukaan laut di muara sungai Kalimantan. *Jurnal of Pendidikan Sosial dan Humaniora*, 4(2), 4354-4373.
- Oktavia, T., Indrayanti, E., & Yusuf, M. (2025). Zonasi daerah estuari berdasarkan salinitas permukaan di Teluk Tanjungpinang, Kepulauan Riau. *Indonesian Journal of Oceanography*, 7(4), 379-388.
- Salelatu, K., Sihasale, D. A., & Riry, J. (2025). Kualitas air laut dan indeks pencemaran berdasarkan parameter fisik kimia pada perairan laut teluk dalam kota Ambon. *Hatunuku: Jurnal of Pendidikan IPS*, 1(1), 98-111.
- Sane, B., Flye-Sainte-marie, J., Diouf, M., Jean, F., Poirier, E., & Thomas, Y. (2025). Physiological and metabolic response of the bloody cockle (*Senilia senilis*) to salinity in the Sine Saloum estuary, Senegal. *Regional Studies in Marine Science*, 92, 104636. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104636>
- Widhowati, A. A., Wardoyo, A. Y. P., Dharmawan, H. A., Nurhuda, M., & Budianto, A. (2021). Development of a portable volatile organic compounds concentration measurement system using a CCS811 air quality sensor. *IEEE Xplore*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ISESD53023.2021.9501642>
- Zhu, H., Zhang, P., Zhou, D., Liu, P., Wu, B., Zhao, X., & Lin, J. (2025). Dynamic water quality criteria for estuaries: Exploration and implementation in the Yangtze estuary. *Regional Studies in Marine Science*, 91, 104501. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104501>