

Karakteristik Estuari di Muara Angke pada Musim Timur

Ivonne M. Radjawane^{1,2,3,4*}, Grahadi Pandu Mughny², Gandhi Napitupulu^{1,3}

¹Kelompok Keahlian Oseanografi Lingkungan dan Terapan, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung

²Program Studi Oseanografi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No. 10, Bandung, Jawa Barat 40132 Indonesia

³Program Studi Oseanografi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Kebonturi, Kabupaten Cirebon, Jawa Barat 45162 Indonesia

⁴Korea-Indonesia Marine Technology Cooperation Research Center
Jl. Fatahillah No.24, Kabupaten Cirebon, Jawa Barat 45611 Indonesia
Email: ivonnemr@itb.ac.id

Abstract

Estuary Characteristics in the Angke Estuary in the East Season

Estuaries are important transitional environments between freshwater and marine ecosystems. These areas are often centers of economic activity, environmental sustainability and natural resources. In this context, this study aims to investigate the estuary characteristics of Muara Angke, particularly in terms of changes in water level, salinity, and the influence of river flow in the face of changing tidal conditions. Research on estuary characteristics in one of the Ciliwung River Estuaries was conducted on August 9-10, 2015. The research area is Muara Angke, North Jakarta, DKI Jakarta Province. The measurement point consists of 11 stations starting from point A1 at the mouth of the estuary to point A11 which is the farthest station point from the estuary, with a distance of 200 m between stations. Oceanographic parameter measurements were made at 3 depths (0.2h; 0.6h and 0.8h) with 4 tidal conditions (towards the tide, tide, towards the ebb and ebb). Angke Estuary has a diurnal tidal type with a range of water levels between 0.98 m - 1.41 m and an average discharge of 7.75 m³/s during the measurement time. The results showed that the Angke Estuary has a partially mixed estuary type with salinity values at the surface increasing relatively small to the middle layer and also the bottom layer decreasing relatively small to the middle layer which indicates vertical mixing from the bottom to the surface. In addition, based on the estuary numbers ($N = 0.337$; $Ed = 0.279$; $R = 0.593$), there is a freshwater flow that is smaller or equal to the tidal influence. Salinity intrusion occurs as far as 2 km when conditions are towards high tide and high tide.

Keywords: Angke Estuary, Drain Time, Estuary Numbers, Estuary Type

Abstrak

Estuari merupakan lingkungan peralihan yang penting antara ekosistem air tawar dan laut. Daerah ini sering kali menjadi pusat kegiatan ekonomi, keberlanjutan lingkungan, dan sumber daya alam. Dalam konteks ini, penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi karakteristik estuari Muara Angke, khususnya dalam hal perubahan tinggi muka air, salinitas, dan pengaruh aliran sungai dalam menghadapi perubahan kondisi pasang surut. Penelitian mengenai karakteristik estuari di salah satu Muara Sungai Ciliwung telah dilakukan pada tanggal 9-10 Agustus 2015. Daerah penelitian adalah Muara Angke, Jakarta Utara Provinsi DKI Jakarta. Titik pengukuran terdiri dari 11 stasiun mulai dari titik A1 yang berada di mulut muara sampai dengan titik A11 yang merupakan titik stasiun terjauh dari muara, dengan jarak antar stasiunnya adalah 200 m. Pengukuran parameter Oseanografi dilakukan terhadap 3 kedalaman (0,2h; 0,6h dan 0,8h) dengan 4 kondisi pasang surut (menuju pasang, pasang, menuju surut dan surut). Muara Angke memiliki tipe pasang surut diurnal dengan kisaran tinggi muka air antara 0,98 m – 1,41 m dan debit rata-rata sebesar 7,75 m³/s selama waktu pengukuran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Muara Angke memiliki tipe estuari tercampur sebagian (partially mixed) dengan nilai salinitas di permukaan yang bertambah relatif kecil ke lapisan tengah dan juga lapisan dasar yang berkurang relatif kecil ke lapisan tengah yang menandakan adanya pencampuran secara vertikal dari dasar ke permukaan. Selain itu berdasarkan bilangan-bilangan estuari ($N = 0,337$; $Ed = 0,279$; $R = 0,593$) menunjukkan adanya aliran air tawar yang besarnya lebih kecil atau sama dengan pengaruh pasang surutnya. Intrusi salinitas terjadi sejauh 2 km ketika kondisi menuju pasang dan pasang.

Kata kunci: Bilangan Estuari, Profil Salinitas, Tipe Estuari, Waktu Kuras, Muara Angke

PENDAHULUAN

Intrusi air laut, sebagai peristiwa fundamental di wilayah estuari, memerlukan pemahaman mendalam mengenai faktor-faktor yang mempengaruhinya. Dalam konteks ini, jarak intrusi air laut

ke dalam estuari menjadi sangat tergantung pada karakteristik unik dari setiap estuari, serta interaksi kompleks antara pasang surut dan debit sungai (Mikhailova, 2013). Estuari bukan hanya sebagai perantara antara air tawar dan air laut (Zhu *et al.*, 2024), tetapi juga sebagai tempat di mana air laut membawa mineral dan nutrisi yang esensial (Akhtar & Equeenuddin, 2023), memperkaya kesuburan di dalamnya (Salamun, 2008). Dalam konteks ini, penelitian ilmiah menunjukkan bahwa estuari, seperti yang diamati oleh Dijkstra *et al.* (2022), menjadi wilayah pesisir yang membanggakan tingkat kesuburan yang luar biasa tinggi. Dinamika estuari, yang terus-menerus berubah baik secara biologis maupun fisik (Jay & Parker, 1994), menciptakan lingkungan yang unik dan dinamis (Dykstra & Dzwonkowski, 2020). Campuran antara air tawar dan air laut membentuk air payau dengan salinitas yang fluktuatif, menciptakan ekosistem estuari yang khas (Phillips, 2022). Tingkat fluktuasi salinitas yang berubah-ubah dipengaruhi oleh efek pasang surut dan variasi musiman (Pritchard, 1989). Selanjutnya, aliran air tawar yang bergerak ke arah hilir dan fluktuasi permukaan air laut akibat efek pasang surut memberikan dasar bagi produktivitas yang melimpah di estuari, melebihi bahkan produktivitas di laut lepas dan perairan tawar (Nguyen, 2008).

Muara Angke, sebagai contoh konkret dari wilayah estuari, menampilkan kompleksitas hubungan antara intervensi manusia dan karakteristik alaminya. Dengan letaknya Muara Angke di utara-barat Provinsi DKI Jakarta dan berhubungan langsung dengan Laut Jawa, pemerintah telah mendirikan infrastruktur seperti tempat pelelangan ikan, pasar grosir ikan, pengecoran ikan, kios, gudang, dan kantor yang digunakan oleh pelaku usaha perikanan (Balqis *et al.*, 2019; Maolani *et al.*, 2021; Rachmat *et al.*, 2019; Soeyanto *et al.*, 2023; Wiryomartono, 2020). Lebih jauh, Muara Angke mencakup area konservasi mangrove dan suaka margasatwa, menyediakan habitat bagi beragam jenis burung dan satwa lainnya (Wibowo *et al.*, 2022). Walaupun sejumlah penelitian sebelumnya telah dilakukan di Muara Angke, fokusnya cenderung pada parameter kimia dan potensi pencemaran lingkungan (Balqis *et al.*, 2019; Cordova *et al.*, 2021; Ariwibowo *et al.*, 2020; Maolani *et al.*, 2021). Penelitian terkini ini, mengambil pendekatan yang lebih holistik dengan tujuan utama untuk mengidentifikasi tipe estuari Muara Angke berdasarkan karakteristik fisiknya, memberikan gambaran menyeluruh tentang kondisi fisik estuari, dan menyelidiki sejauh mana pengaruh pasang surut di wilayah ini.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengkaji karakteristik estuari dengan menentukan tipe estuari berdasarkan profil dan bilangan-bilangan estuari di Muara Angke, Jakarta Utara pada bulan Agustus (musim Timur) 2015. Analisis ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang kondisi fisik Muara Angke dan mengungkapkan perubahan parameter Oseanografi dari perubahan pasang surut di wilayah tersebut. Perubahan parameter Oseanografi meliputi salinitas, temperatur, densitas, dan *Total Dissolved Solid* (TDS).

MATERI DAN METODE

Daerah kajian penelitian berada pada wilayah estuari di Muara Angke dengan koordinat 6°6'21" LS dan 106°46'29.8" BT. Daerah aliran sungainya berhulu di daerah Semplak, Kabupaten Bogor dan bermuara di Laut Jawa. Panjang aliran mencapai 40 km dan bagian tengahnya mengalir di wilayah Kota Tangerang sepanjang 10 km, dan sisanya di daerah Bogor dan Jakarta (Achmad, 2008). Penelitian ini dilakukan dengan mengumpulkan data primer Muara Angke di daerah Jakarta Utara (Gambar 1). Pengambilan data dilaksanakan pada tanggal 9-10 Agustus 2015 dengan melakukan pengukuran pasang surut selama 24 jam dan kemudian pengambilan data parameter Oseanografi di 11 titik stasiun sepanjang Muara Angke. Jarak antar stasiun adalah 200 m dari stasiun yang letaknya berada tepat di Muara (A1) sampai titik stasiun yang letaknya dekat dengan wilayah perkotaan (A11).

Muara Angke termasuk ke dalam Muara yang cukup lebar dan dalam. Muara Angke memiliki kedalaman hingga 2,6 m dan lebar 73,6 m di stasiun A1 dan kedalaman paling besar berada di stasiun A9 yaitu bisa mencapai 6,2 m. Data yang digunakan dalam penelitian

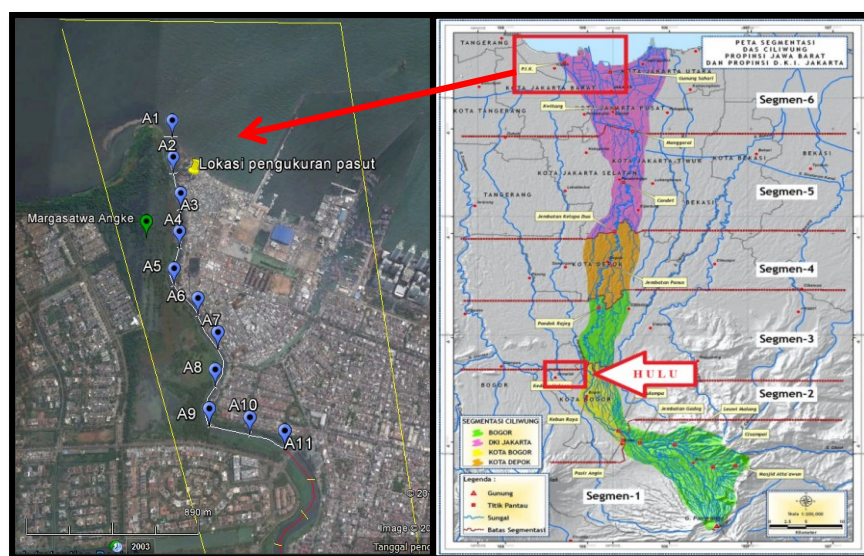
merupakan data parameter Oseanografi seperti pasang surut, suhu, salinitas, TDS, kecepatan arus, penampang sungai dan debit aliran sungai.

Pengukuran pasang surut dilakukan selama 24 jam dengan interval waktu pengamatan 1 jam. Pengukuran tersebut dilakukan pada pukul 09:00 WIB (GMT+7) di Muara Angke pada koordinat 6°6'10.49" LS dan 106°46'4.93" BT. Pengambilan data pasang surut dibantu dengan menggunakan alat seperti palem pasang surut yang di pasang di lokasi yang tidak jauh dengan titik stasiun A2.

Pengukuran parameter Oseanografi seperti suhu, salinitas dan TDS dilakukan di sepanjang aliran sungai di sekitar Muara Angke atau di setiap titik stasiun dengan interval jarak 200 m. Dari setiap titik stasiun yang berada di tengah-tengah sungai diambil sampel air dengan menggunakan alat seperti botol Nansen. Sampel air yang diambil merupakan sampel air dari 3 kedalaman setiap titik stasiunnya yaitu 0,2h; 0,6h dan 0,8 h. Kemudian ketiga sampel air tersebut diukur dengan menggunakan alat HORIBA U-50 Series agar dapat mengetahui besar nilai dari setiap parameter Oseanografi. Pengambilan titik sampel air yang berada di tengah sungai dimaksudkan bahwa parameter-parameter Oseanografi yang diukur di titik tersebut mewakili besarnya nilai parameter di bagian tepi sungainya. Pengukuran dilakukan pada kondisi menuju pasang, saat pasang, menuju surut, dan surut.

Pengukuran kecepatan arus sama halnya dengan pengukuran parameter-parameter Oseanografi yang dilakukan di sepanjang aliran di Muara Angke atau di setiap titik stasiun pengukuran dengan menggunakan alat Current meter OTT CM 1/2. Pengukuran arus dilakukan di bagian tengah sungai dan diambil 3 kedalaman (0,2h; 0,6h dan 0,8h) dari setiap titik stasiunnya. Hal tersebut dimaksudkan bahwa kecepatan arus yang diukur di bagian tengah sungai mewakili kecepatan arus di bagian tepi sungainya. Pengukuran arus dilakukan saat kondisi menuju pasang, saat pasang, menuju surut dan saat surut.

Luas penampang sungai diukur dengan menggunakan bantuan alat seperti senter duga dan GPS. Pengukuran tersebut dilakukan di setiap titik stasiun dari titik A1 yang berada di mulut muara sampai titik A11 yang merupakan titik terjauh dari muara. Pengukuran dilakukan pada 3 titik permukaan setiap stasiun yaitu pada bagian tengah dan 2 titik pada bagian tepi sungai sehingga didapat 3 kedalaman. Kemudian alat seperti GPS berfungsi untuk mengukur lebar sungainya. Data debit menggunakan data hasil perkalian antara data kecepatan arus rata-rata setiap stasiun pengukuran (A1 - A11) dengan data luas penampangnya.



Gambar 1. Daerah penelitian untuk pengukuran parameter Oseanografi dan pasang surut

Data primer dan data sekunder yang diperoleh dalam penelitian ini kemudian disusun dan diatur untuk membuat visualisasi data parameter Oseanografi sehingga didapatkan profilnya terhadap kedalaman dalam bentuk 2D. Dengan metode *Kriging* yang ada dalam program tersebut akan didapat profil dan kontur dari stasiun A1 sampai stasiun A11. Data pasang surut yang diambil pada koordinat $6^{\circ}6'10.49''$ LS dan $106^{\circ}46'4.93''$ BT diplot agar didapat grafik fluktuasi muka air di estuari. Data-data penampang sungai yang didapat kemudian dibuat sketsa gambarnya untuk menghitung luas penampang dan debit aliran. Data luas penampang, kecepatan, volume, debit, densitas dan salinitas dihitung menggunakan rumus yang ada untuk memperoleh bilangan-bilangan estuari di Muara Angke.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hidrolika Estuari di Muara Angke

Muara Angke, sebagai sebuah estuari, mengalami variasi pasang surut yang memainkan peran penting dalam dinamika hidrolika. Prediksi pasang surut menggunakan program TMD pada Gambar 2a, terjadi pasang purnama atau *spring tide* di lokasi pengukuran. Karakteristik pasang surut di Teluk Jakarta adalah bertipe tunggal dengan nilai Formzahl sebesar 6,5. Data hasil pengukuran langsung di lapangan menunjukkan pola pasang surut diurnal, dengan satu kali pasang dan satu kali surut dalam sehari. Tinggi muka air pada kondisi pasang tertinggi mencapai 1,41 m pada pukul 20:00 WIB, sementara pada saat surut, tinggi muka air mencapai 0,98 m pada pukul 06:00 WIB. Meskipun demikian, terdapat keterlambatan fase sebesar 3 jam dalam prediksi pasang surut menggunakan program TMD dibandingkan dengan data pengukuran langsung di lapangan. Sebagai contoh, pasang tertinggi pada grafik TMD terjadi pada pukul 17:00 WIB.

Grafik elevasi pasang surut dari pengukuran langsung menunjukkan adanya kondisi *tidal asimetris* di stasiun pengamatan. Saat kondisi pasang lebih lama daripada saat surut, menandakan fenomena *tidal asimetris* yang umumnya terjadi di daerah sungai dan muara sungai. Lamanya waktu kondisi pasang mencapai 15 jam, sementara saat surut hanya 9 jam. Fenomena ini dijelaskan oleh pergerakan massa air laut yang keluar dari estuari, didorong oleh debit aliran sungai, sehingga elevasi muka air turun lebih cepat daripada saat mengalami kenaikan (Garel et al., 2021). Rentang waktu antara kondisi pasang dan surut, bersama dengan pemahaman tentang kondisi *tidal asimetris*, memberikan acuan yang penting untuk pengambilan data parameter oseanografi dari mulut muara hingga stasiun A11.

Di hulu Muara Angke, di mana air dari sungai mengalir ke estuari, pasang surut memiliki dampak signifikan terhadap debit sungai. Selama pasang surut naik, debit sungai dapat bertambah karena peningkatan tekanan air laut yang memasuki estuari (Gambar 2b). Data debit sungai di Muara Angke mencerminkan hasil perhitungan yang menggabungkan luas penampang pada setiap stasiun dengan rata-rata kecepatan arus. Besarnya debit sungai di daerah muara Angke terkait erat dengan kondisi pasang surut. Rata-rata debit aliran saat menuju surut mencapai $14,99 \text{ m}^3/\text{s}$, sementara pada saat pasang tertinggi dan surut terendah, debit mencapai $4,21 \text{ m}^3/\text{s}$ dan $3,97 \text{ m}^3/\text{s}$. Nilai rata-rata selama pasang, menuju surut, dan surut adalah $4,21 \text{ m}^3/\text{s}$; $14,99 \text{ m}^3/\text{s}$; dan $3,97 \text{ m}^3/\text{s}$.

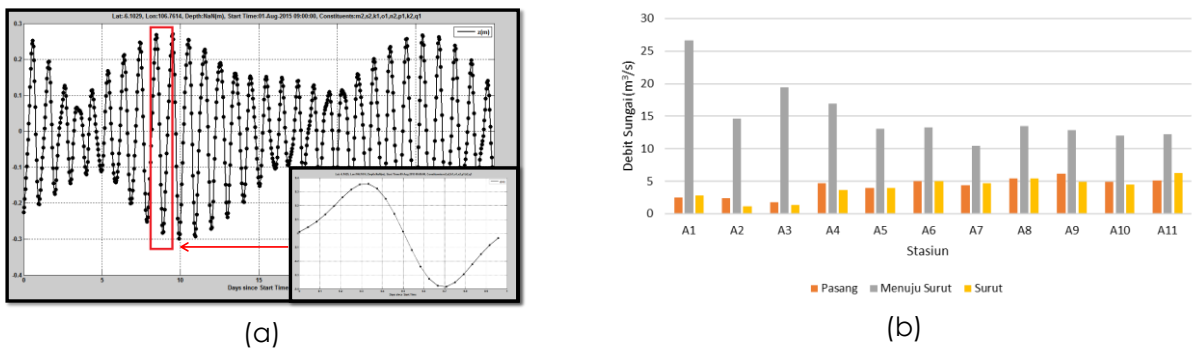
Debit sungai meningkat saat menuju surut karena kecepatan arus mencapai maksimum pada kondisi *slack water*. Fenomena ini umum terjadi di estuari, di mana kecepatan arus saat pasang tertinggi mendekati nol karena pengaruh gaya tarik-menarik benda langit berkurang (Melo et al., 2020). Pada saat tersebut, arus mencapai kesetimbangan dan bergerak ke hilir untuk mengisi kekosongan massa air di daerah muara. Kecepatan arus yang besar saat menuju surut juga dipengaruhi oleh suplai air sungai dari hilir. Selain dipengaruhi oleh kecepatan arus, besar debit aliran juga terkait dengan luas penampang sungai. Hal ini terlihat pada Gambar 1, di mana debit di mulut muara atau stasiun A1 jauh lebih besar dibandingkan stasiun lainnya. Di samping pengaruh pasang surut, debit sungai juga dipengaruhi oleh kondisi musiman, terutama curah hujan (Calero Quesada et al., 2019). Musim kemarau, seperti pada bulan Agustus dengan curah

hujan rendah, mengakibatkan penurunan debit aliran yang mencapai puncaknya pada gambar debit aliran terendah berkisar antara 10 – 20 m³/s. Meskipun terdapat perbedaan antara data lapangan dan hasil perhitungan, rata-rata debit aliran sebesar 7,72 m³/s memberikan gambaran yang konsisten tentang dinamika pasang surut dan debit sungai di Muara Angke. Variasi ini memengaruhi distribusi salinitas dan temperatur di estuari, memberikan kontribusi pada lingkungan estuari yang unik. Oleh karena itu, memahami interaksi antara pasang surut dan debit sungai di hulu dan hilir Muara Angke menjadi kunci dalam menguraikan kompleksitas hidrolika estuari ini.

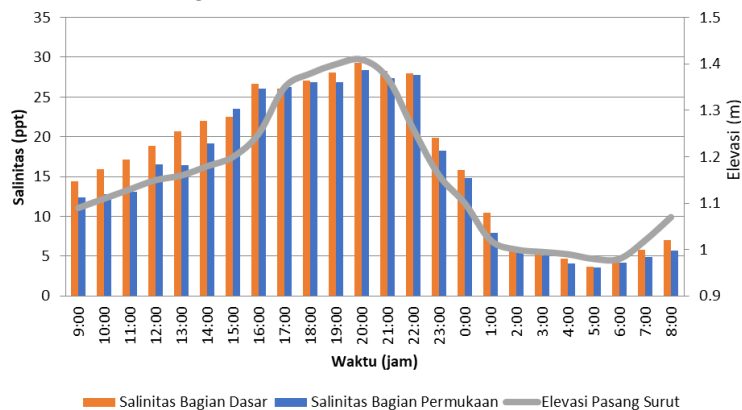
Distribusi Spasial Parameter Oseanografi

Pada musim timur, suhu air di Muara Angke cenderung dipengaruhi oleh kondisi udara yang lebih hangat, dan variasi spasialnya dapat mencerminkan perbedaan suhu antara daerah hulu dan hilir estuari. Salinitas juga menunjukkan variasi, terutama di sepanjang garis pantai dan dekat muara sungai, di mana air tawar dari sungai dapat mempengaruhi kandungan garam. Kedalaman perairan bervariasi, dipengaruhi oleh topografi dasar laut dan interaksi antara aliran sungai dan air laut.

Nilai salinitas selama 24 jam, dengan interval waktu pengukuran setiap 1 jam di stasiun A2 (Gambar 3), menggambarkan variasi nilai salinitas baik di permukaan maupun di dasar estuari Muara Angke. Puncak nilai salinitas terjadi pada pukul 20:00 WIB, dengan nilai tertinggi mencapai 28,4 ppt di permukaan dan 29,3 ppt di dasar, sementara nilai salinitas terendah terjadi pada pukul 5:00 WIB dengan 3,6 ppt di permukaan dan 3,7 ppt di dasar. Perubahan nilai salinitas ini dipengaruhi oleh efek pasang surut yang memungkinkan masuknya air laut sepanjang aliran sungai di Muara Angke (Akbar *et al.*, 2020), dan fluktuasi muka air yang teramati di lokasi pengukuran.



Gambar 2. (a) Pasang surut menggunakan TMD di Muara Angke. (b) Debit di setiap stasiun pada berbagai kondisi pasang surut

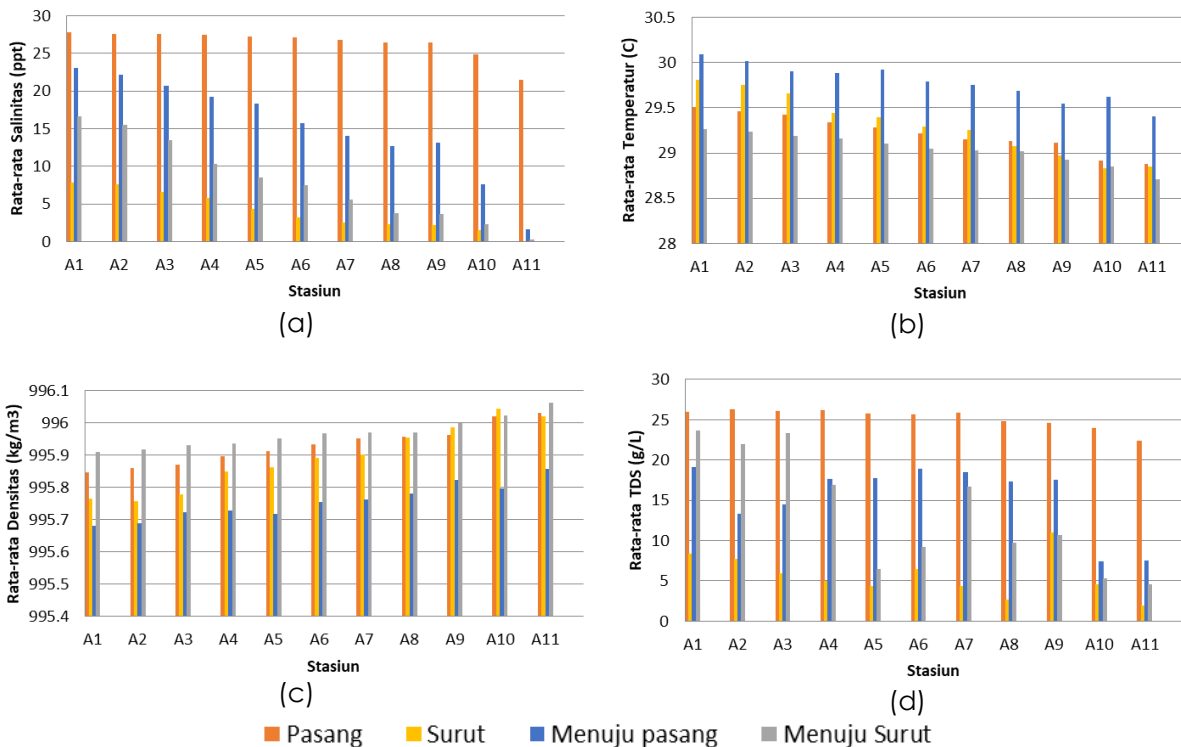


Gambar 3. Perbandingan elevasi pasang surut dengan pengukuran salinitas di titik A2 selama 24 jam

Distribusi salinitas selama 24 jam pada Gambar 4a menunjukkan pola kenaikan dan penurunan yang mirip dengan fluktuasi elevasi muka air laut karena pengaruh pasang surut. Kondisi pasang surut menuju pasang terlihat pada peningkatan salinitas antara pukul 08:00 WIB hingga 20:00 WIB, sementara kondisi pasang surut menuju surut terlihat pada penurunan salinitas antara pukul 21:00 WIB hingga 05:00 WIB. Perlu dicatat bahwa penurunan nilai salinitas lebih cepat saat menuju surut dibandingkan dengan kenaikan nilai salinitas saat menuju pasang, hal ini disebabkan oleh gerakan keluar massa air laut dari estuari didorong oleh debit aliran sungai, sehingga salinitas berkurang lebih cepat selama 9 jam dibandingkan dengan kenaikan selama 12 jam.

Distribusi profil vertikal salinitas pada keempat kondisi pasang surut menunjukkan keseragaman nilai salinitas secara horizontal dan vertikal. Di semua stasiun, nilai salinitas cenderung berkurang ke arah hulu, dan distribusi vertikal salinitas hampir seragam terhadap kedalaman. Tipe estuari di Muara Angke dapat diidentifikasi sebagai estuari tercampur sebagian (*Partially Mixed*), di mana terjadi pencampuran massa air tawar dan air asin secara vertikal. Kontur salinitas vertikal menunjukkan bahwa perubahan salinitas di lapisan permukaan dan dasar relatif kecil dibandingkan dengan perubahan di lapisan tengah, menandakan adanya pencampuran antara air tawar dan air asin di lapisan tengah estuari.

Pada kondisi menuju pasang, profil salinitas secara vertikal (Gambar 4a) mencerminkan keseragaman nilai di stasiun A1 - A11, kecuali di A9, di mana batimetri yang curam menyebabkan salinitas tinggi pada kedalaman 0,8h. Fenomena ini dipengaruhi oleh peran arus dalam mendistribusikan salinitas di tempat lain, namun di A9 dengan kedalaman 6,2 m, arus kurang efektif, menyebabkan nilai salinitas di titik tersebut sangat tinggi. Distribusi horizontal suhu (Gambar 4b) menunjukkan kenaikan nilainya ke hilir selama pasang. Suhu permukaan mencapai 29,4 - 30,2°C, sementara di dasar berkisar 29,37 - 29,9°C. Profil vertikal suhu menunjukkan rata-rata suhu permukaan lebih tinggi daripada di kedalaman, terutama pada siang hari, namun nilai suhu secara keseluruhan tetap relatif konstan vertikal di setiap stasiun, berada pada kisaran 29°C. Densitas di permukaan berkisar antara 995,6 - 995,8 kg/m³, dan di dasar berkisar antara 995,7 - 995,8 kg/m³ (Gambar 4c).



Gambar 4. Perbandingan rata-rata (a) Salinitas, (b) Temperatur, (c) Densitas dan (d) TDS dari semua kondisi pasang surut

Distribusi horizontal menunjukkan peningkatan densitas ke arah hulu, dan distribusi vertikal menunjukkan peningkatan terhadap kedalaman. Nilai densitas lebih tinggi di arah hulu, terutama selama pasang, disebabkan oleh pengaruh temperatur terhadap densitas air laut. Distribusi *Total Dissolved Solid* (TDS) ketika pasang (Gambar 4d) memiliki kisaran 0,57 - 18,5 g/L di permukaan dan 14,4 - 23,6 g/L di dasar. Fenomena ini menunjukkan peningkatan nilai TDS ke arah hulu, dan distribusi vertikal menunjukkan peningkatan nilai TDS terhadap kedalaman. Penurunan nilai TDS terjadi pada stasiun A10-A11, yaitu sekitar 0,5-3 g/L, yang dapat dijelaskan sebagai dampak pencampuran air tawar dan air asin di estuari Muara Angke.

Pada kondisi pasang, distribusi horizontal suhu menunjukkan peningkatan nilai ke arah hilir, dengan suhu permukaan mencapai kisaran 29,44 - 30,2°C dan di dasar berkisar antara 29,37 - 29,9°C. Profil vertikal suhu menunjukkan rata-rata suhu permukaan lebih tinggi daripada di kedalaman, terutama pada siang hari. Namun, nilai suhu secara keseluruhan tidak mengalami perubahan signifikan secara vertikal di setiap stasiun, umumnya berada pada kisaran 29°C. Densitas di permukaan berkisar antara 995,63 - 995,85 kg/m³, dan di dasar berkisar antara 995,73 - 995,87 kg/m³. Distribusi horizontal menunjukkan peningkatan densitas ke arah hulu, dan distribusi vertikal menunjukkan peningkatan terhadap kedalaman. Nilai densitas lebih besar di arah hulu, terutama pada kondisi pasang tertinggi, disebabkan oleh pengaruh temperatur yang memengaruhi densitas air laut. Distribusi TDS secara vertikal memiliki kisaran 0,57 - 18,5 g/L di permukaan dan 14,4 - 23,6 g/L di dasar. Pada kondisi pasang tertinggi, nilai TDS mencapai 25,8 g/L di permukaan dan 26,2 g/L di dasar. Terjadi peningkatan nilai TDS ke arah hulu, dan distribusi vertikal menunjukkan peningkatan nilai TDS terhadap kedalaman. Fenomena ini dapat disebabkan pencampuran antara air tawar dan air asin secara vertikal di estuari Muara Angke.

Pada kondisi menuju surut, profil salinitas secara vertikal menunjukkan keseragaman nilai di stasiun A1 - A11, dengan pencampuran air laut dan air tawar yang terjadi karena pengaruh pasang surut yang kuat. Pengecualian terdapat di stasiun A9, di mana batimetri yang curam menyebabkan salinitas tinggi pada kedalaman 0,8h. Distribusi horizontal suhu menunjukkan peningkatan nilai ke arah hilir saat menuju surut. Suhu di permukaan dan di dasar mengalami penurunan, dengan kisaran suhu di permukaan antara 28,73 - 29,28°C dan di dasar antara 28,68 - 29,25°C. Profil vertikal suhu menunjukkan bahwa rata-rata suhu di permukaan lebih tinggi daripada di kedalaman, terutama pada siang hari. Perubahan suhu yang mencolok antara permukaan (29,55°C) dan kedalaman (29,73°C) di titik A3 pada kondisi surut dapat dijelaskan oleh perubahan intensitas cahaya matahari dan suhu lingkungan. Selain itu, perbedaan suhu yang mencolok antara permukaan (29,55°C) dan kedalaman 0,8h (29,73°C) di titik A3 mencerminkan pengaruh kondisi lingkungan yang turun saat surut. Densitas di permukaan berkisar antara 995,906 - 996,055 kg/m³, dan di dasar berkisar antara 995,914-996,069 kg/m³. Distribusi horizontal menunjukkan peningkatan densitas ke arah hulu, dan distribusi vertikal menunjukkan peningkatan terhadap kedalaman. Nilai densitas lebih besar di arah hulu, terutama pada kondisi menuju surut, akibat pengaruh temperatur terhadap densitas. Distribusi TDS memiliki kisaran 5,67-23,2 g/L di permukaan dan 3,55 - 24,2 g/L di dasar. Terjadi penurunan nilai TDS pada stasiun A10-A11, sekitar 0,5-3 g/L, menunjukkan perubahan nilai TDS yang signifikan di sepanjang muara.

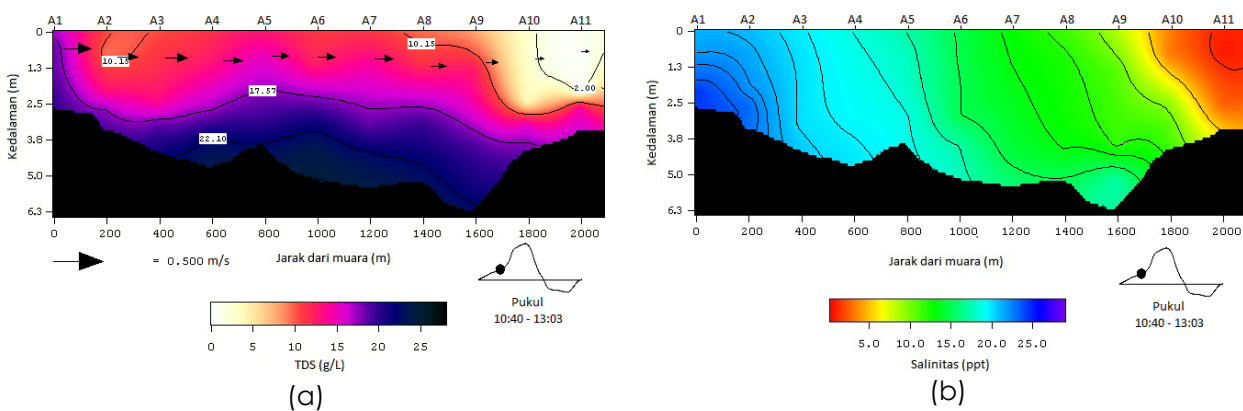
Pada kondisi surut, terlihat penurunan nilai rata-rata salinitas di Muara Angke. Salinitas maksimum di muara saat kondisi surut mencapai 7,7 ppt, berbeda jauh dengan kondisi pasang di mana salinitas maksimum mencapai 28,1 ppt. Pengaruh pasang surut terhadap distribusi salinitas di muara Angke terlihat signifikan, dengan nilai salinitas dapat turun hingga mencapai 7,7 ppt di muara pada kondisi surut. Peran debit aliran sungai juga memengaruhi kondisi ini, terutama pada kondisi pasang surut di mana nilai salinitas dapat turun hingga 7,7 ppt di muara. Profil salinitas secara vertikal menunjukkan keseragaman nilai salinitas di stasiun A1 - A11, dengan pencampuran antara air laut dan air tawar yang telah terjadi akibat pengaruh pasang surut yang kuat. Pengecualian terdapat di stasiun A9, di mana batimetri yang curam menyebabkan salinitas tinggi pada kedalaman 0,8h. Perbedaan suhu yang mencolok antara permukaan (29,55°C) dan

kedalaman 0,8h (29,73°C) di titik A3 juga mencerminkan pengaruh kondisi lingkungan yang turun saat surut. Distribusi horizontal suhu menunjukkan peningkatan nilai ke arah hilir saat menuju surut. Suhu di permukaan dan di dasar mengalami penurunan saat menuju surut, dengan kisaran suhu di permukaan antara 28,73 - 29,28°C dan di dasar antara 28,68 - 29,25°C. Profil vertikal suhu menunjukkan bahwa rata-rata suhu di permukaan lebih tinggi daripada di kedalaman, terutama pada siang hari. Perubahan suhu yang cukup mencolok antara permukaan (29,55°C) dan kedalaman (29,73°C) di titik A3 pada kondisi surut dapat dijelaskan oleh perubahan intensitas cahaya matahari dan suhu lingkungan. Distribusi horizontal menunjukkan peningkatan densitas ke arah hulu, dan distribusi vertikal menunjukkan peningkatan terhadap kedalaman. Nilai densitas lebih besar di arah hulu, terutama pada kondisi surut, yang disebabkan oleh pengaruh temperatur yang memengaruhi densitas air laut. Terjadi penurunan nilai TDS pada stasiun A10 - A11, yaitu sekitar 0,5 - 3 g/L. Fenomena ini menunjukkan perubahan nilai TDS yang signifikan di sepanjang muara (Sá et al., 2022), dan pengaruh pasang surut (Al-Asadi et al., 2023) serta pencampuran antara air tawar dan air asin memainkan peran penting dalam penentuan distribusi TDS saat surut.

Dari semua kondisi pasang surut distribusi nilai rata-rata TDS secara horizontal dari hulu sampai muara terjadi fluktuasi nilai saat kondisi menuju surut, menuju pasang dan saat surut seperti pada Gambar 5a di mana nilainya akan mengalami kenaikan dan penurunan. Tetapi ketika pasang nilainya akan bertambah ke arah muara dan berkurang ke arah hulu. Namun terhadap kedalaman bisa berubah cukup besar. Titik A6 atau titik pengukuran yang berjarak 1 km dari muara nilai TDS di permukaan adalah 12,1 g/L dan nilai di kedalaman adalah 21 g/L. Dengan perbedaan yang cukup besar antara nilai TDS di permukaan dan di dasar membuktikan adanya stratifikasi di lokasi tersebut di mana zat padat terlarut di dasar lebih besar dibandingkan di permukaan. Berbeda dengan kondisi pasang surut saat pasang dan surut, perubahan nilai TDS terhadap kedalaman di setiap stasiun tidak jauh berbeda. Hal tersebut menunjukkan bahwa distribusi sebaran zat padat terlarut sudah tersebar secara merata saat kondisi pasang dan surut hanya saja nilai TDS saat pasang lebih besar dibandingkan saat surut.

Penentuan Kuantitatif Tipe Estuari

Tipe estuari di Muara Angke, berdasarkan profil salinitasnya, dapat dilihat pada Gambar 5b di mana distribusi salinitas secara vertikal hampir seragam dari lapisan permukaan hingga ke bagian dasar sungai, mulai dari stasiun A9 hingga A6, dan membesar ke arah laut dari stasiun A5 hingga A1, menandakan pengaruh dari pasang surut. Dengan nilai salinitas yang hampir seragam terhadap kedalaman, hal ini juga mencerminkan pencampuran vertikal antara air laut dan air tawar di wilayah estuari, terlihat dari nilai salinitas air payau yang berkisar 6-29 ppt (Akter & Tanim, 2021).



Gambar 5. Distribusi (a) TDS dan (b) salinitas dari stasiun A1-A11 saat menuju pasang.

Tabel 1. Tipe Estuari Berdasarkan Perhitungan Data Pengukuran Langsung

Bilangan-bilangan Estuari	Stasiun	Besar Nilai	Kriteria bilangan dan Jenis Estuari
Rasio Volume (<i>N</i>)	A1	0,337	0,1 < <i>N</i> < 1 (Partially Mixed)
	A2	0,303	
	A3	0,248	
Bilangan Estuari (<i>Ed</i>)	A1	0,279	0,2 < <i>Ed</i> < 8 (Partially Mixed)
	A2	0,244	
	A3	0,246	
Bilangan Richardson (<i>R</i>)	A1	0,593	0,08 < <i>R</i> < 0,8 (Partially Mixed)
	A2	0,658	
	A3	0,790	

Berdasarkan profil kontur salinitas vertikal, bahwa salinitas di lapisan permukaan bertambah relatif kecil ke lapisan tengah dan begitu juga salinitas di lapisan dasar berkurang relatif kecil ke lapisan tengah sedangkan di lapisan tengah sendiri nilai salinitasnya berada diantara nilai salinitas di permukaan dan di dasar yang menandakan di lapisan tengah ini terjadi pencampuran massa air tawar dan air asin. Sama seperti yang dilakukan Wakigari & Leconte (2022) di Sungai Susquehanna di Amerika Serikat bahwa estuari tercampur sebagian memiliki karakteristik utama yaitu nilai salinitasnya akan bervariasi di sepanjang muara maupun terhadap kedalaman dan nilai salinitas dari lapisan atas ke lapisan bawah memiliki nilai yang hampir seragam.

Berdasarkan Gambar 5b, intrusi air laut terdeteksi sejauh 2 km dari mulut muara (stasiun A1) yang teramati pada stasiun A11 saat kondisi menuju pasang dengan nilai salinitas permukaan dan dasar mencapai 0,6 ppt dan 2,6 ppt. Saat pasang salinitas di stasiun A11 mencapai 18,6 ppt di permukaan dan 23 ppt di dasar (gambar tidak diperlihatkan).

Perhitungan bilangan-bilangan estuari, yang diperoleh dari pengukuran kondisi fisik di Muara Angke, dapat dilihat pada Tabel 1, mengacu pada (Nguyen, 2008; Hadi dan Radjawane, 2009), yang mencerminkan keadaan muara saat pengukuran. Bilangan estuari Muara Angke terdiri dari Bilangan Rasio Volume, Bilangan Estuari, dan Bilangan Richardson.

Hasil perhitungan bilangan Rasio Volume (*N*) pada stasiun A1, A2, dan A3 (yang berada di mulut muara) adalah 0,337; 0,303; dan 0,248. Hal ini menunjukkan bahwa Muara Angke memiliki nilai *N* di antara 0,1 dan 1, sesuai dengan kriteria estuari tercampur sebagian. Bilangan ini mencerminkan hubungan antara kecepatan aliran sungai dan arus pasang surut, menunjukkan bahwa aliran air sungai ke estuari lebih kecil atau sebanding dengan aliran air laut.

Bilangan Estuari (*Ed*) pada ketiga stasiun tersebut adalah 0,279; 0,244; dan 0,246, menunjukkan bahwa Muara Angke memenuhi kriteria estuari tercampur sebagian, dengan nilai *Ed* di antara 0,2 dan 8. Bilangan ini menggambarkan hubungan antara kecepatan arus pasang surut, gradien densitas vertikal, dan menunjukkan bahwa Muara Angke memiliki kecepatan arus pasang surut yang hampir sama dengan kecepatan arus sungai (Gusti *et al.*, 2023), dengan perbedaan densitas yang relatif kecil antara lapisan permukaan dan dasar.

Bilangan Richardson (*R*) pada stasiun A1, A2, dan A3 adalah 0,593; 0,658; dan 0,790, menunjukkan bahwa Muara Angke memiliki nilai *R* di antara 0,08 dan 0,8, sesuai dengan kriteria estuari tercampur sebagian. Bilangan ini mencerminkan hubungan antara gradien densitas vertikal, debit sungai, lebar sungai, dan kecepatan arus pasang surut. Dengan gradien densitas yang tidak terlalu besar secara vertikal dan kecepatan aliran sungai yang hampir sama dengan

arus pasang surut, Muara Angke memungkinkan terjadinya pencampuran air pada lapisan yang hampir sama densitasnya.

Berdasarkan karakteristik di atas, dapat disimpulkan bahwa Muara Angke merupakan estuari tipe tercampur sebagian (*Partially Mixed*). Estuari seperti ini ditandai oleh peningkatan nilai salinitas ke arah muara, seiring dengan aliran dari laut menuju muara, serta penambahan salinitas secara vertikal terhadap kedalaman, yang nilainya hampir sama, menunjukkan adanya pencampuran massa air asin dan air tawar dari hulu sungai.

KESIMPULAN

Muara Angke memiliki pola pasang surut diurnal dengan satu siklus pasang dan satu siklus surut dalam satu hari. Tinggi surut terendah dan tinggi pasang tertinggi mencapai 0,98 m hingga 1,41 m. Analisis parameter estuari, yaitu bilangan rasio volume (N), bilangan estuari (Ed), dan bilangan Richardson (R), memberikan nilai yang sesuai dengan kriteria estuari tipe *Partially Mixed* atau tercampur sebagian ($N = 0,337; 0,303; 0,248$; $Ed = 0,279; 0,244; 0,246$; $R = 0,593; 0,658; 0,790$). Perubahan nilai salinitas menunjukkan bahwa penurunan nilai salinitas lebih cepat pada kondisi menuju surut dibandingkan kenaikan saat menuju pasang. Hal ini disebabkan oleh kecepatan arus yang cukup besar, mengarah ke laut, memfasilitasi penurunan nilai salinitas. Intrusi air laut terdeteksi sejauh 2 km dari mulut muara, teramati pada stasiun A11 saat kondisi menuju pasang, di mana nilai salinitas mencapai 0,6 ppt di permukaan dan 2,6 ppt di bagian dasar dan saat pasang telah mencapai 18,6 ppt dan 23 ppt di permukaan dan di dasar perairan. Temuan ini menggambarkan bahwa Muara Angke memiliki karakteristik estuari dengan intrusi air laut yang signifikan, terutama selama kondisi menuju pasang dan pasang.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, H.I., Supriatna, S., & Patria, M.P. (2020). The relationship between total suspended matter and sea current for the spread of Chlorophyll-a and fishing area in Jakarta Bay. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 561(1), 012052. doi: 10.1088/1755-1315/561/1/012052
- Akhtar, S., & Equeenuddin, S.M. (2023). Spatio-temporal variation of major ion chemistry and nutrient stoichiometry in a tropical monsoonal estuary: insight into biogeochemical processes. *Environmental Earth Sciences*, 82(1), 1–13. doi: 10.1007/S12665-022-10740-Y/FIGURES/8
- Akter, A., & Tanim, A.H. (2021). Salinity Distribution in River Network of a Partially Mixed Estuary. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 147(2), 04020055. doi: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000621
- Al-Asadi, S.A.R., Alhello, A.A., Ghalib, H.B., Muttashar, W.R., & Al-Eydawi, H.T. (2023). Seawater intrusion into Shatt Al-Arab River, Northwest Arabian/Persian Gulf. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 11(2), 289–302. doi: 10.1080/23249676.2022.2113460
- Balqis, A.N., Ramadhana, L., Wirawan, R., & Isnainiyah, I.N. (2019). Bid-Fish: An android application for online fish auction based on case study from Muara Angke, Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 508(1), 012128. doi: 10.1088/1757-899X/508/1/012128
- Calero Quesada, M.C., García-Lafuente, J., Garel, E., Delgado Cabello, J., Martins, F., & Moreno-Navas, J. (2019). Effects of tidal and river discharge forcings on tidal propagation along the Guadiana Estuary. *Journal of Sea Research*, 146, 1–13. doi: 10.1016/J.SEARES.2019.01.006
- Cordova, M.R., Ulumuddin, Y. I., Purbonegoro, T., & Shiomoto, A. (2021). Characterization of microplastics in mangrove sediment of Muara Angke Wildlife Reserve, Indonesia. *Marine Pollution Bulletin*, 163, 112012. doi: 10.1016/J.MARPOLBUL.2021.112012
- Ariwibowo, P. (2020). Performance evaluation of fish auction (TPI) in improving fisherman welfare at Muara Angke, Penjaringan – North Jakarta. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 485(1), 012001. doi: 10.1088/1755-1315/485/1/012001
- Dijkstra, Y.M., Schuttelaars, H.M., & Kranenburg, W.M. (2022). Salt Transport Regimes Caused by Tidal and Subtidal Processes in Narrow Estuaries. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(12), e2021JC018391. doi: 10.1029/2021JC018391

- Dykstra, S.L., & Dzwonkowski, B. (2020). The Propagation of Fluvial Flood Waves Through a Backwater-Estuarine Environment. *Water Resources Research*, 56(2), e2019WR025743. doi: 10.1029/2019WR025743
- Garel, E., Zhang, P., & Cai, H. (2021). Dynamics of fortnightly water level variations along a tide-dominated estuary with negligible river discharge. *Ocean Science*, 17(6), 1605–1621. doi: 10.5194/OS-17-1605-2021
- Gusti, G.N.N., Kawanisi, K., Al Sawaf, M. B., Khadami, F., & Xiao, C. (2023). Investigating tidal river dynamics in a longitudinally varying channel geometry. *Continental Shelf Research*, 253, 104901. doi: 10.1016/J.CSR.2022.104901
- Hadi, S. & Radjawane, I.M. (2009), Arus Laut, Institut Teknologi Bandung
- Jay, D., & Parker, B. B. (1994). Tidal Hydrodynamics. *Estuaries*, 17(1), 301. doi: 10.2307/1352582
- Maolani, R.A., Dalimunthe, A.S., Haryanto, D., Bifa, R., Azzahra, P., Juwita, C., & Suryamika, P.E. (2021). Perluasan Hutan Mangrove dalam Mitigasi Risiko Bencana Pemanasan Global: Kegiatan PkM di Kawasan Pesisir Muara Angke Jakarta. *Dinamisia: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 5(6), 1380–1388. doi: 10.31849/DINAMISIA.V5I6.8096
- Melo, W., Pinho, J., Iglesias, I., Bio, A., Avilez-Valente, P., Vieira, J., Bastos, L., & Veloso-Gomes, F. (2020). Hydro-and morphodynamic impacts of sea level rise: The Minho estuary case study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(6), 441. doi: 10.3390/JMSE8060441
- Mikhailova, M.V. (2013). Processes of seawater intrusion into river mouths. *Water Resources*, 40(5), 483–498. doi: 10.1134/S0097807813050059/METRICS
- Nguyen, A. D. (2008). Salt intrusion, tides and mixing in multi-channel estuaries. *Salt Intrusion, Tides and Mixing in Multi-Channel Estuaries*, 1–159. doi: 10.1201/9781439828342/salt-intrusion-tides-mixing-multi-channel-estuaries-anh-duc-nguyen
- Phillips, J. D. (2022). Geomorphology of the fluvial–estuarine transition zone, lower Neuse River, North Carolina. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(8), 2044–2061. doi: 10.1002/ESP.5362
- Pritchard, D.W. (1989). Estuarine Classification — A Help or a Hindrance. *Estuarine Circulation*, 1–38. doi: 10.1007/978-1-4612-4562-9_1
- Rachmat, S.L., Purba, N.P., Agung, M.U., & Yuliadi, L.P., (2019). Karakteristik sampah mikroplastik di Muara Sungai DKI Jakarta. *Depik*, 8(1), 9–17. doi: 10.13170/depik.8.1.12156
- Sá, A.K.D.S., Feitosa, F.A.N., Cutrim, M.V.J., Flores-Montes, M.J., dos, D., & Cavalcanti, L.F. (2022). Phytoplankton community dynamics in response to seawater intrusion in a tropical macrotidal river-estuary continuum. *Hydrobiologia* 2022 850:20, 850(20), 4351–4383. doi: 10.1007/S10750-022-04851-7
- Salamun, S. (2008). Instruksi Air Laut Sungai Gangsa. *Keairan*, 14(1), 21–34.
- Soeyanto, E., Morimoto, A., Hayami, Y., & Sudaryanto, A. (2023). Seasonal spreading and age of Citarum River water in the Jakarta Bay. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1137(1), 012009. doi: 10.1088/1755-1315/1137/1/012009
- Wakigari, S.A., & Leconte, R. (2022). Enhancing Spatial Resolution of SMAP Soil Moisture Products through Spatial Downscaling over a Large Watershed: A Case Study for the Susquehanna River Basin in the Northeastern United States. *Remote Sensing* 2022, Vol. 14, Page 776, 14(3), 776. doi: 10.3390/RS14030776
- Wibowo, A., Basukriadi, A., Nurdin, E., & Nasution, N.S. (2022). Habitat Suitability Spatial Model Of Near Threatened Sunda Teal *Anas gibberifrons* (Muller, 1842) (Anseriformes: Anatidae) In Muara Angke Wetlands, Jakarta, Indonesia. *Treubia*, 49(1), 1–14. doi: 10.14203/TREUBIA.V49I1.4364
- Wirymartono, B. (2020). Capitalist Agenda Behind the Seawall Development in Jakarta Bay, Indonesia: The Marginalization of Urban Poor. *Traditions and Transformations of Habitation in Indonesia*, 223–245. doi: 10.1007/978-981-15-3405-8_11
- Zhu, X., Weiser, M.W., Harringmeyer, J.P., Kaiser, K., Walker, B.D., Bélanger, S., Anderson, C.H., & Fichot, C.G. (2024). The apparent quantum yield matrix (AQY-M) of CDOM photobleaching in estuarine, coastal, and oceanic surface waters. *Science of The Total Environment*, 912, 168670. doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2023.168670