

REKONSTRUKSI DAN PROYEKSI KONDISI LINGKUNGAN TELUK JAKARTA BERDASARKAN KEJADIAN MUSIM UBUR-UBUR TAHUN 2018 DAN 2019

ENVIRONMENTAL RECONSTRUCTION AND PROJECTION OF JAKARTA BAY BASED ON THE 2018 AND 2019 JELLYFISH BLOOM EVENTS

Afriel Alex Handro Lumban-Gaol¹⁾, Mochamad Ramdhan Firdaus^{2*)}, Darrell Ariel Saiman¹⁾, Dearlyn Merry Christine Togatorop³⁾, Lady Ayu Sri Wijayanti⁴⁾, Unggul Handoko⁵⁾

¹⁾Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University, Bogor, Indonesia

²⁾Pusat Riset Sistem Biota Oseanografi, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jakarta, Indonesia

³⁾Departemen Meteorologi Terapan, Fakultas Ilmu dan Pengetahuan Alam, IPB University, Bogor, Indonesia

⁴⁾Departemen Perikanan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Padjadjaran, Indonesia

⁵⁾Direktorat Pengelolaan Laboratorium, Fasilitas Riset, dan Kawasan Sains dan Teknologi, BRIN, Jakarta, Indonesia

Teregistrasi tanggal : 30 Juni 2025; Diterima setelah perbaikan tanggal 16 Desember 2025;

Disetujui terbit tanggal : 21 Desember 2025

ABSTRAK

Peningkatan populasi ubur-ubur yang tinggi dilaporkan terjadi di Teluk Jakarta pada Oktober 2018 dan 2019. Namun, informasi ilmiah mengenai fenomena ini masih terbatas, terutama dari aspek lingkungannya. Penelitian ini merekonstruksi kondisi lingkungan laut Teluk Jakarta berdasarkan kejadian musim ubur-ubur tahun 2018 dan 2019, serta memproyeksikan variasi lingkungan sebelum dan sesudah kejadian tersebut dengan menganalisis deret waktu 2014–2024. Analisis dilakukan menggunakan data *sea surface temperature* (SST) dan *sea surface salinity* (SSS) dari model CMEMS GLORYS12V1, serta curah hujan dari reanalisis CHIRPS. Variabilitas iklim diobservasi menggunakan indeks *Indian Ocean Dipole* (DMI) dan *El Niño–Southern Oscillation* (SOI). Analisis deret waktu meliputi *Empirical Orthogonal Function* (EOF), *Continuous Wavelet Transform* (CWT), dan *Power Spectral Density* (PSD). Anomali lingkungan dievaluasi dengan membandingkan kondisi perairan pada periode *Time of Interest* (ToI) 2018 dan 2019 terhadap anomali sebelum ToI (2014–2017) dan sesudahnya (2020–2024). Verifikasi kebenaran peristiwa ledakan populasi ubur-ubur dilakukan melalui *cross-checking* terhadap wawancara, survei lapangan, dan laporan berita (2010–2024). Hasil penelitian menunjukkan bahwa ledakan populasi ubur-ubur benar terjadi di Teluk Jakarta pada Oktober 2018 dan 2019, tanpa ditemukan laporan serupa di tahun lainnya. Variabilitas iklim mengindikasikan dominasi pengaruh IOD akibat lemahnya pengaruh ENSO yang mendekati netral pada periode ToI. Dominasi IOD terlihat dari anomali peningkatan SSS, serta anomali penurunan SST dan curah hujan. Kombinasi kondisi tersebut diduga dapat mendukung strobilasi dan pertumbuhan ephyra ubur-ubur, sehingga mendorong peningkatan populasi. Pendekatan rekonstruksi berbasis kejadian ini memperluas konteks temporal untuk memahami hubungan antara karakteristik perairan dan variabilitas iklim terhadap respon ekologi ubur-ubur di Teluk Jakarta.

Kata Kunci: Muson; Anomali; Variabilitas Iklim; Ubur-Ubur; Rekonstruksi; Lingkungan Laut

ABSTRACT

Massive jellyfish blooms were reported in Jakarta Bay in October 2018 and 2019. However, scientific information regarding this phenomenon remains limited, particularly concerning the environmental conditions. This study reconstructs the marine environmental conditions of Jakarta Bay during the jellyfish bloom seasons of 2018 and 2019, and projects the environmental variations before and after these events by analyzing time series data from 2014 to 2024. The analysis utilized sea surface temperature (SST) and sea surface salinity (SSS) data from the CMEMS GLORYS12V1 model, as well as precipitation data from CHIRPS reanalysis. Climate variability was observed using the Indian Ocean Dipole (DMI) and El Niño–Southern Oscillation (SOI) indices. Time series analyses included Empirical Orthogonal Function (EOF), Continuous Wavelet Transform (CWT), and Power Spectral Density (PSD). Environmental anomalies were evaluated by comparing oceanic conditions during the Time of Interest (ToI) period of 2018 and 2019 with anomalies before (2014–2017) and after (2020–2024) the ToI. The occurrence of jellyfish blooms was verified through cross-checking with interviews, field surveys, and media reports (2010–2024). The results confirmed

Korespondensi penulis:

e-mail: ramdhan.ekologi@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.15578/bawal.17.3.2025.179-197>

that massive jellyfish blooms indeed occurred in Jakarta Bay in October 2018 and 2019, with no similar reports in other years. Climate variability during the ToI was dominated by a strong Indian Ocean Dipole (IOD) signal, while ENSO influence was weak and near-neutral, reflected by increased SSS, decreased SST, and reduced precipitation. These combined conditions are suspected to have supported strobilation and ephyra development, thereby triggering the massive population increase. This event-based reconstruction approach expands the temporal context for understanding how marine environmental characteristics and climate variability influence the ecological response of jellyfish in Jakarta Bay.

Keywords: Monsoon; Anomalies; Climate Variability; Jellyfish; Marine Environmental; Reconstruction

PENDAHULUAN

Pada bulan Oktober tahun 2018 dan 2019, berbagai media nasional di Indonesia melaporkan terjadinya ledakan populasi ubur-ubur yang masif di Teluk Jakarta (National Geographic Indonesia, 2018; Tempo, 2018, 2019; Kompas, 2018, 2019). Jumlah ubur-ubur pada periode tersebut dilaporkan sangat melimpah hingga banyak yang terdampar di Pantai Ancol, Jakarta. Menurut pengelola Pantai Ancol, intensitas ledakan populasi ubur-ubur sebesar ini belum pernah terjadi pada tahun-tahun sebelumnya. Untuk melindungi wisatawan, pihak pengelola kemudian memasang papan peringatan bahaya ubur-ubur serta menempatkan jaring pengaman di sekitar perairan agar ubur-ubur tidak mendekati area pantai.

Ledakan populasi atau mekar ubur-ubur (*jellyfish bloom*) merupakan fenomena alam yang banyak ditemukan di berbagai perairan dunia (Mills, 2001; Condon et al., 2012a), termasuk juga di Indonesia (Firdaus, 2020). Fenomena ini menunjukkan pola musiman yang kuat dan diduga berkaitan erat dengan osilasi iklim global (Condon et al., 2012b; Pitt et al., 2014). Ledakan populasi ubur-ubur dapat terjadi melalui dua mekanisme utama, yaitu peningkatan laju reproduksi ubur-ubur (*true bloom*) atau pergerakan massal populasi ubur-ubur ke suatu lokasi tertentu (*apparent bloom*) (Graham et al., 2001). Hingga saat ini, belum ada penelitian yang merumuskan secara kuantitatif ambang kepadatan ubur-ubur yang dapat dikategorikan sebagai ledakan populasi. Namun secara umum, istilah ini merujuk pada peningkatan jumlah ubur-ubur yang signifikan di suatu area dalam waktu singkat, bersifat sementara, dan terlokalisasi (Condon et al., 2012b; Fernández-Álías et al., 2024).

Ledakan populasi ubur-ubur diyakini terus meningkat frekuensinya dalam beberapa dekade terakhir akibat tekanan lingkungan seperti degradasi ekosistem laut (Jackson et al., 2001; Purcell et al., 2007; Condon et al., 2012a). Namun, klaim fenomena tersebut masih memerlukan validasi karena sebagian besar studi hanya berbasis kasus di wilayah tertentu (Purcell et al., 2007; Condon et al., 2012a; Richardson et al., 2012). Persepsi terbaru justru meyakini bahwa ledakan populasi ubur-ubur merupakan indikator ekosistem perairan yang sehat (Hays et al., 2018). Oleh karena itu, studi yang lebih komprehensif di berbagai ekosistem, termasuk perairan tropis seperti di Teluk Jakarta, Indonesia, menjadi sangat diperlukan.

Secara geografis, Teluk Jakarta merupakan perairan tropis semi-tertutup yang sangat dipengaruhi oleh sistem iklim musiman dan antar-tahunan. Sistem angin muson Asia–Australia, yang terbentuk akibat perbedaan tekanan antara Benua Asia dan Australia sebagai konsekuensi dari gerak semu tahunan matahari, secara konsisten mengatur dinamika angin di kawasan ini (Aldrian & Djamil, 2008; Chang et al., 2005). Muson barat (Oktober–Maret) membawa massa udara lembab dari Asia menuju Australia, sedangkan muson timur (April–September) membawa udara kering dari Australia ke Asia (Dida et al., 2016). Selain itu variabilitas iklim di Teluk Jakarta juga dipengaruhi fenomena antar-tahunan seperti *Indian Ocean Dipole* (IOD) dan *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO).

Fenomena IOD merupakan fenomena anomali iklim di Samudra Hindia yang ditandai oleh perbedaan suhu permukaan laut antara bagian barat (dekat pantai Afrika Timur) dan bagian timur (sekitar perairan barat Indonesia). Ketika suhu di bagian barat lebih hangat dan di timur lebih dingin dari kondisi normal, terjadi fase IOD positif, sedangkan kondisi sebaliknya disebut fase IOD negatif (Saji et al., 1999; Webster et al., 1999; Ashok et al., 2003). Fenomena ENSO merupakan fenomena iklim global yang terbentuk akibat interaksi laut–atmosfer di Samudra Pasifik tropis, yang ditandai oleh perubahan SST dan pola tekanan udara antara wilayah barat dan timur Pasifik (Philander, 1990; McPhaden et al., 2006). Fase El Niño terjadi ketika SST di Pasifik tengah dan timur menghangat dari kondisi normal, sedangkan fase La Niña ditandai oleh pendinginan di wilayah yang sama. Kedua fase ini mempengaruhi sirkulasi atmosfer dan distribusi curah hujan di kawasan tropis, termasuk Indonesia, di mana El Niño cenderung menyebabkan kondisi lebih kering dan panas, sementara La Niña meningkatkan curah hujan dan menurunkan suhu permukaan laut (Aldrian & Susanto, 2003; McBride et al., 2003).

Kombinasi beberapa sistem iklim seperti muson, ENSO dan IOD secara dinamis membentuk karakteristik oseanografi dan meteorologi di Teluk Jakarta. Variasi arah dan kekuatan angin muson serta anomali suhu akibat ENSO dan IOD secara langsung mempengaruhi SST dan *Sea Surface Salinity* (SSS), serta fluktuasi curah hujan lokal di Teluk Jakarta. Dinamika ini diperkirakan dapat mempengaruhi tahapan metagenesis ubur-ubur seperti proses strobilasi dan pertumbuhan ephyra, yang sangat

bergantung pada kondisi lingkungan. Beberapa hipotesis menyebutkan bahwa ledakan populasi ubur-ubur dapat disebabkan oleh eutrofikasi, perubahan iklim, penangkapan ikan berlebihan, dan modifikasi habitat (Purcell, 2005; Dong *et al.* 2010). Namun, pemahaman kita mengenai bagaimana parameter lingkungan mempengaruhi dinamika populasi ubur-ubur masih belum lengkap (Purcell, 2005). Kurangnya data primer membatasi upaya untuk menguji hipotesis terkait ledakan ubur-ubur dalam skala ekosistem yang lebih luas (Pauly *et al.* 2009).

Penelitian ini bertujuan untuk memverifikasi peristiwa ledakan populasi ubur-ubur tahun 2018 dan 2019, serta menganalisis faktor-faktor lingkungan potensial yang diduga memicu ledakan populasi ubur-ubur secara masif di perairan Teluk Jakarta pada periode tersebut. Verifikasi dilakukan dengan metode *cross-checking* informasi yang diperoleh dari wawancara, survey lapangan, dan penelusuran berita. Sedangkan identifikasi faktor lingkungan potensial dilakukan dengan pendekatan *event based environmental reconstruction* berdasarkan parameter oseanografi dan meteorologi untuk periode 2014–2024, sehingga dapat mengidentifikasi pola anomali sebelum, selama, dan sesudah kejadian. Parameter yang dianalisis meliputi variabilitas SST, SSS, curah hujan, serta faktor iklim global seperti IOD dan ENSO. Melalui pendekatan rekonstruksi berbasis kejadian ini, penelitian diharapkan dapat memperluas pemahaman mengenai

hubungan antara dinamika lingkungan dan respon ekologi ubur-ubur di perairan pesisir seperti Teluk Jakarta.

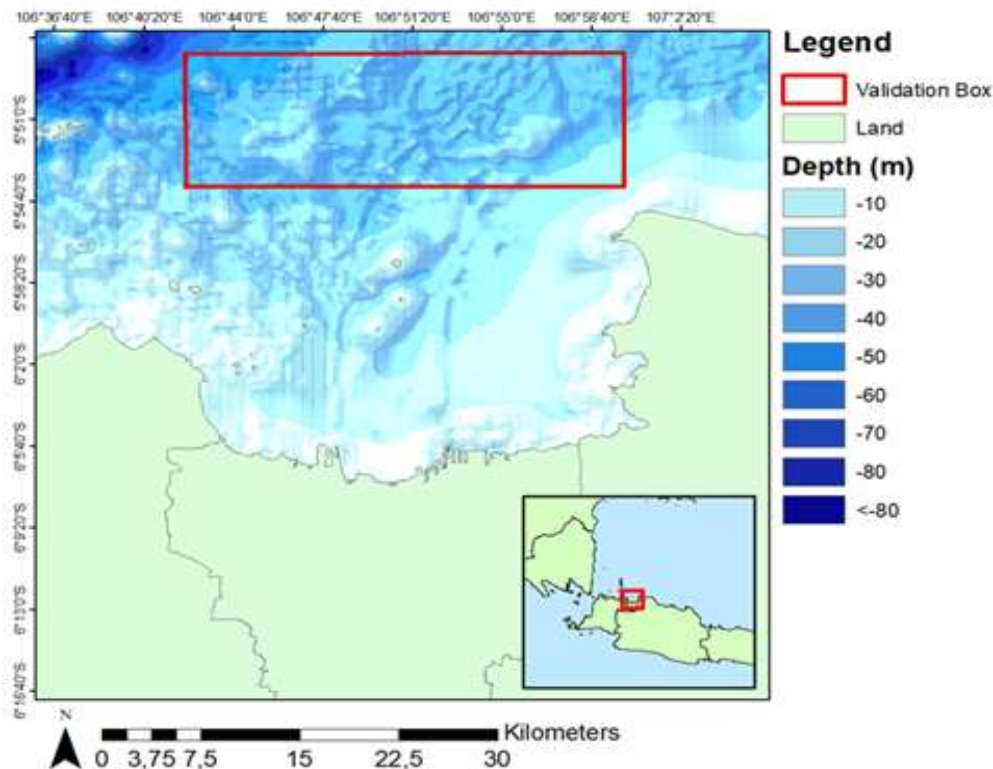
BAHATAN METODE

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada tahun 2025 dengan cakupan area perairan Teluk Jakarta. Perairan ini memiliki karakteristik dangkal dengan rata-rata kedalaman sekitar 15m. Secara geografis, teluk ini berbatasan langsung dengan Laut Jawa di bagian utara, daratan Tangerang di bagian barat, daratan Bekasi di bagian timur, dan daratan DKI Jakarta di bagian selatan, dengan batas koordinat 5,8 – 6,3°LS dan 106,6 – 107,1°BT (Gambar 1). Untuk keperluan validasi data model dengan data observasi dari citra satelit, maka dibuat *sampling box* berwarna merah di sekitar Teluk Jakarta dengan koordinat 5,8 – 5,9°LS dan 106,7 – 107°BT. Nilai data di dalam kotak tersebut akan dibuat anomali deret waktunya dan dilakukan analisis validasi data menggunakan diagram *Taylor*.

Verifikasi Kejadian Ledakan Populasi Ubur-Ubur di Teluk Jakarta tahun 2018 dan 2019

Rujukan ilmiah mengenai musim ubur-ubur di Teluk Jakarta sangat terbatas. Sejauh penelusuran penulis terhadap *database google scholar* menggunakan program *Publish of Perish*, hingga saat ini belum ditemukan jurnal ilmiah yang secara spesifik mengkaji fenomena ini. Informasi mengenai kejadian ledakan populasi ubur-ubur



Gambar 1. Peta Lokasi penelitian dengan batimetri Teluk Jakarta dari data BATNAS.

Figure 1. Map of research location with Jakarta Bay bathymetry from BATNAS data

secara masif di Teluk Jakarta tahun 2018 dan 2019 diketahui terutama bersumber dari pemberitaan di media massa nasional. Untuk itu perlu dilakukan verifikasi langsung mengenai kebenaran kejadian tersebut dengan melakukan cek silang (*cross-check*) terhadap berbagai sumber informasi di lapangan. Sumber informasi meliputi wawancara, kunjungan lapangan, dan penelusuran media massa.

Wawancara dilakukan dengan pihak terkait seperti nelayan dan pengelola kawasan pantai Ancol, Teluk Jakarta. Wawancara fokus pada penggalan informasi dan dokumentasi peristiwa ledakan populasi ubur-ubur tahun 2018 dan 2019, serta tahun tahun lainnya. Sementara itu, survei lapangan dilakukan dengan mengunjungi secara langsung perairan Teluk Jakarta untuk melihat keberadaan ubur-ubur di Teluk Jakarta. Survey dilakukan pada bulan September, Oktober, dan November tahun 2020. Beberapa survey tambahan juga dilakukan seperti pada bulan-bulan lainnya, seperti bulan November dan Desember tahun 2023, serta pada bulan Januari, April, dan Agustus tahun 2024.

Penelusuran berita dilakukan dengan metode *web scraping* terhadap artikel berita daring menggunakan kata kunci “ubur-ubur” pada kurun waktu 2010–2024. Penggunaan kata kunci yang umum tersebut dilakukan untuk mendapatkan hasil berita yang lebih luas. Rentang waktu yang lebar juga digunakan untuk mengidentifikasi apakah ada laporan ledakan populasi ubur-ubur yang masif selain tahun 2018 dan 2019. Proses penelusuran berita dilakukan secara otomatis menggunakan bahasa pemrograman *Python* dari database *google* menggunakan “*library googlesearch*”. Eksekusi kode dilakukan pada *Google Collaboratory (Google Colab)*, yaitu lingkungan komputasi berbasis cloud yang memungkinkan pemrosesan data secara efisien tanpa memerlukan instalasi perangkat lunak lokal. Data hasil *scraping* kemudian disimpan dalam format CSV untuk kemudian diseleksi secara manual untuk mendapatkan berita yang relevan.

Data Oseanografi Permukaan

Data oseanografi permukaan yang digunakan dalam penelitian ini berupa keluaran model sirkulasi laut global 3-dimensi GLORYS12V1 yang merupakan produk dataset dari *Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)* dengan variabel SST dan SSS. Data model diakuisisi dari tanggal 1 Januari 2014 sampai 31 Desember 2024 (11 tahun). Data model berupa data grid dengan resolusi spasial $1/12^\circ$ (9.25 km) dan resolusi temporal harian yang dapat diakses melalui <https://doi.org/10.48670/moi-00021>. Kemudian data satelit observasi SST juga diakuisisi melalui <https://doi.org/10.48670/moi-00165> untuk keperluan validasi model dataset oseanografi permukaan. Data satelit tersebut merupakan citra level 4 keluaran *Operational Sea Surface Temperature and Ice Analysis (OSTIA)* yang memanfaatkan data satelit dari proyek GHRSSST serta observasi in-situ untuk

menghasilkan peta SST harian yang bebas celah (*gap*) dengan resolusi spasial tinggi sebesar $1/20^\circ$ (sekitar 5,5 km) serta resolusi temporal rata-rata harian.

Data Curah Hujan

Curah hujan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari dua jenis, yaitu data curah hujan di wilayah perairan Teluk Jakarta dan curah hujan di wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS) yang sistem hidrologinya bermuara ke perairan Teluk Jakarta. Penggunaan dua data curah hujan tersebut dikarenakan Teluk Jakarta tidak hanya dipengaruhi oleh curah hujan yang jatuh diatasnya, namun juga dipengaruhi oleh masukan air tawar dari sungai-sungai yang bermuara ke teluk tersebut. Berdasarkan batas DAS yang dikeluarkan oleh Pemerintah Indonesia melalui Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), diketahui bahwa Teluk Jakarta masuk kedalam dua sistem DAS Besar yaitu DAS Citarum dan DAS Ciliwung-Cisadane. Sebagian besar perairan Teluk Jakarta masuk ke dalam DAS Ciliwung-Cisadane, dimana DAS Citarum hanya meliputi sebagian kecil area di sisi timur Teluk Jakarta.

Data curah hujan di Teluk Jakarta, DAS Citarum dan DAS Ciliwung – Cisadane diperoleh dari *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS)* dengan resolusi spasial $1/20^\circ$ (sekitar 5,5 km) dan resolusi temporal rata-rata bulanan yang dapat diakuisisi dari laman <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.UCSB/CHIRPS/>. Data CHIRPS yang telah diakuisisi kemudian di klip berdasarkan batas-batas masing-masing DAS dan Teluk untuk mengisolasi data curah hujan yang berada di dalam wilayah DAS Citarum, Ciliwung – Cisadane, dan Teluk Jakarta. Setelah data di klip, dilakukan proses ekstraksi sehingga diperoleh data numerik yang bisa dianalisis lebih lanjut. Kedua jenis data curah hujan tersebut diakuisisi dalam rentang data deret waktu dari bulan Januari 2014 sampai bulan Desember 2024 (11 tahun).

Data Indeks Variabilitas Antar-Tahunan

Fenomena IOD dihitung dengan *Dipole Mode Index (DMI)*. Indeks ini mengukur gradien anomali suhu antara bagian barat dan timur Samudera Hindia. Indeks ini dihitung dengan cara menghitung perbedaan SST di bagian barat (50°E – 70°E and 10°S – 10°N) dan timur samudera Hindia (90°E – 110°E and 10°S – 0°N). Data DMI diakuisisi dalam rata-rata bulanan dari tahun 2014 hingga 2024 (11 tahun), yang diperoleh dari laman <https://psl.noaa.gov/data/timeseries/month/DS/DMI/>. Selain itu, fenomena ENSO direpresentasikan dengan *Southern Oscillation Index (SOI)*. Indeks ini dihitung berdasarkan perbedaan anomali tekanan udara antara Tahiti dan Darwin, yang secara luas digunakan untuk mengidentifikasi fase *El Niño* (SOI negatif) dan *La Niña* (SOI positif). Data SOI diakuisisi dalam rata-rata bulanan dari tahun 2014 hingga 2024 (11 tahun), yang diperoleh dari laman <https://www.bom.gov.au/climate/enso/soi/>.

Pendekatan Rekonstruksi dan Proyeksi *Time of Interest*

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Event Based Environmental Reconstruction*. Pendekatan ini memungkinkan kita untuk mengetahui dinamika lingkungan saat suatu peristiwa terjadi di masa lalu. Rekonstruksi kondisi lingkungan meliputi data oseanografi permukaan (SST dan SSS), meteorologi (curah hujan), dan variabilitas iklim (IOD dan ENSO). Waktu kejadian (*event-based*) yang menjadi acuan adalah ledakan populasi ubur-ubur di Teluk Jakarta tahun 2018 dan 2019, dimana kedua tahun tersebut menjadi *Time of Interest* (ToI) dalam penelitian ini. Selain itu proyeksi juga dilakukan dengan membandingkan kondisi sebelum ToI (2014–2017) dan sesudah ToI (2020–2024) untuk mengevaluasi perubahan temporal jangka panjang.

Rangkaian analisis disusun untuk mengidentifikasi hubungan antara variabilitas lingkungan laut dengan dinamika populasi ubur-ubur secara ekologis. Secara konseptual, analisis meliputi 5 tahapan yaitu: 1). Verifikasi kejadian ledakan populasi ubur-ubur sebagai dasar ToI; 2). Validasi dataset oseanografi permukaan; 3). Penyusunan klimatologi dan hubungan antar parameter lingkungan; 4). Analisis anomali berdasarkan rekonstruksi dan proyeksi ToI; 5). Analisis deret waktu untuk menilai siklus variabilitas Lingkungan

Validasi Dataset Oseanografi

Pengolahan data diawali dengan validasi data model dengan tujuan mengevaluasi tingkat akurasi model. Validasi dilakukan dengan membandingkan data model terhadap data hasil pengamatan satelit observasi melalui nilai koefisien korelasi diagram *Taylor*. Diharapkan, jika hasil validasi menunjukkan kesesuaian yang baik, maka variabel lain dalam model juga memiliki kualitas yang dapat diandalkan (Atmadipoera dan Mubaraq 2016). Diagram *Taylor* digunakan untuk memperoleh hasil nilai statistik koefisien korelasi (r), standar deviasi yang terdiri atas standar deviasi hasil prediksi model (f) dan standar deviasi hasil prediksi satelit (r), dan *root mean square deviation* (RMSD) (E') sebagaimana dijelaskan oleh Taylor (2001) sebagai berikut :

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r})}{\sigma_f \sigma_r} \dots \dots \dots (1)$$

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})^2}{N}} \dots \dots \dots (2)$$

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (r_n - \bar{r})^2}{N}} \dots \dots \dots (3)$$

$$E' = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N [(f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r})]}{N}} \dots \dots \dots (4)$$

dimana r adalah koefisien korelasi; N adalah jumlah data; f_n adalah nilai data model ke- n ; r_n adalah nilai data satelit ke- n ; \bar{f} adalah rata-rata data model; \bar{r} adalah rata-rata data satelit; σ_f adalah standar deviasi data model; σ_r adalah standar deviasi data satelit; dan E' adalah nilai RMSD.

Analisis Klimatologi Oseanografi Permukaan dan Meteorologi

Data parameter oseanografi permukaan (SST dan SSS) serta meteorologi (curah hujan) disusun dalam bentuk rata-rata klimatologi bulanan secara spasial dan temporal untuk mengidentifikasi pola siklus tahunan serta variasi musiman normal dari parameter oseanografi dan meteorologi yang dikaji. Pendekatan klimatologi ini diterapkan dengan menggunakan persamaan yang dikemukakan oleh Thomson dan Emery (2014) sebagai berikut:

$$\bar{X}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(x, y, t) \dots \dots \dots (5)$$

Dimana $\bar{X}(x, y)$ adalah nilai rata-rata bulanan pada posisi (x, y) ; $x_i(x, y, t)$ adalah nilai ke- i dari data pada posisi ; n adalah data dalam satu bulan serta banyaknya data bulanan dalam satu periode klimatologi.

Analisis Anomali dan Variasi Iklim Berdasarkan Rekonstruksi dan Proyeksi ToI

Setelah dilakukan analisis klimatologi, nilai anomali dihitung untuk menyoroti penyimpangan dari kondisi normal, khususnya pada periode kejadian ledakan populasi ubur-ubur yang terdokumentasi oleh media pada tahun 2018–2019. Anomali dihitung dengan persamaan sederhana (Thomson dan Emery 2014; Wilks 2011) sebagai berikut:

$$A(t) = X(t) - \bar{X} \dots \dots \dots (6)$$

dimana $A(t)$ adalah nilai anomali parameter yang dikaji; $X(t)$ adalah nilai data aktual pada waktu t , dan \bar{X} adalah nilai rata-rata klimatologi data yang dikaji. Tahap ini difokuskan pada periode *Time of Interest* (ToI), yaitu tahun 2018 dan 2019, ketika laporan ledakan populasi ubur-ubur dilaporkan oleh media. Analisis dilakukan untuk menilai anomali kondisi lingkungan pada periode ToI serta memproyeksikan dinamika anomali lingkungan pada periode sebelum (2014–2017) dan sesudah (2020–2024) periode ToI. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi perubahan kondisi laut secara temporal dan keterkaitannya dengan fenomena iklim antar-tahunan seperti ENSO dan IOD.

Analisis Pola Spasial dan Variasi Temporal

Analisis data deret-waktu kemudian dilakukan pada dataset oseanografi permukaan (SST dan SSS) dengan menggunakan 3 metode utama yaitu *Empirical Orthogonal Function* (EOF), *Continuous Wavelet Transform* (CWT), dan densitas spektral energi (*power spectral density*, PSD). Analisis EOF dalam penelitian ini

digunakan untuk menganalisis variabilitas perairan di Teluk Jakarta. Tujuan analisis menggunakan EOF untuk mendapatkan representasi pola spasial dan variabilitas temporal dari dataset yang digunakan dalam penelitian ini. Perhitungan EOF ditentukan dengan persamaan Hannachi *et al.* (2007) sebagai berikut :

$$X(t, s) = \sum_{k=1}^M c_k(t) u_k(s) \dots \dots \dots (7)$$

Dimana $X(t, s)$ adalah fungsi waktu (t) dan ruang (s); M adalah banyaknya mode yang dihasilkan; $u_k(s)$ adalah komponen EOF dalam bentuk pola spasial; dan $c_k(t)$ adalah variabilitas temporal EOF.

Analisis *Continuous Wavelet Transform* (CWT) kemudian digunakan untuk mengidentifikasi periode dominan serta mengungkap pola variabilitas dan perubahannya sepanjang waktu (Atmadipoera dan Hasanah 2017). Metode ini diterapkan dengan menggunakan persamaan yang dikemukakan oleh Thomson dan Emery (2014) sebagai berikut :

$$CWT_f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \zeta_{a,b}(x) dx \dots \dots \dots (8)$$

Dengan ζ didefinisikan sebagai berikut:

$$\zeta_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \zeta\left(\frac{x-b}{a}\right) \dots \dots \dots (9)$$

Dimana $f(x)$ adalah keseluruhan data deret-waktu; ζ adalah fungsi wavelet Morlet Mother; a adalah parameter dilatasi; dan b adalah parameter translasi.

Setelah dilakukan analisis CWT maka dilakukan analisis PSD yang bertujuan untuk menganalisis periodisitas dari puncak dominan densitas energi spektrum dataset, sehingga bisa diamati puncak-puncak energi fluktuasi arus pada periode atau frekuensi tertentu. Melalui analisis PSD, dapat ditemukan satu atau lebih puncak densitas energi yang menunjukkan dominasi energi pada frekuensi tertentu, yang dikenal sebagai puncak energi spektral (Atmadipoera dan Mubaraq 2016). Estimasi nilai PSD dihitung dengan metode Fast Fourier Transform (FFT), yaitu dengan menghitung komponen Fourier $X(f_k)$ dari data deret waktu x_n pada interval waktu Δt (1 hari), sesuai dengan persamaan yang dijelaskan oleh Bendat dan Piersol (2010):

$$X(f_k) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp \left[-j \frac{2\pi kn}{N} \right] \dots \dots \dots (10)$$

Dimana $X(f_k)$ adalah komponen Fourier; t adalah selang waktu data (1 hari); dan N adalah jumlah data.

Nilai PSD kemudian dihitung dengan persamaan berikut (Bendat dan Piersol 2010):

$$S_x = \frac{2\Delta t}{N} |X(f_k)|^2 \dots \dots \dots (11)$$

dimana S_x adalah nilai PSD.

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

Kejadian Ledakan Populasi Ubur-Ubur di Teluk Jakarta Tahun 2018 dan 2019

Hasil wawancara dengan pengelola lingkungan di kawasan wisata Ancol, Teluk Jakarta, mencatat bahwa ubur-ubur biasanya datang setiap tahun pada musim kemarau. Namun demikian, populasi ubur-ubur seringkali ditemukan hingga Musim Peralihan II, yaitu bulan September dan Oktober. Pengelola juga menambahkan bahwa intensitas ledakan populasi ubur-ubur bervariasi dari tahun ke tahun, dimana tercatat pada tahun 2018 dan 2019 terjadi ledakan populasi yang masif di seluruh perairan wisata Ancol. Hal tersebut menyebabkan pengelola harus memberikan himbauan kepada pengunjung agar berhati-hati dengan ubur-ubur dan memasang jaring pelindung di sekitar pantai Ancol (Gambar 2).

Wawancara dengan nelayan lokal pun menyebutkan bahwa ubur-ubur ini biasanya muncul sekitar bulan September, Oktober, dan November. Namun nelayan lokal menambahkan bahwa di lokasi tertentu (Tanjung Pasir, Karawang) ubur-ubur biasanya masih ditemukan di luar musim kemarau dalam jumlah yang relatif kecil. Nelayan pun menyampaikan bahwa pada dua tahun sebelumnya (2018 dan 2019), telah terjadi ledakan populasi yang sangat besar di Teluk Jakarta. Nelayan menggambarkan bahwa pada tahun tersebut ubur-ubur memenuhi hampir seluruh perairan Teluk Jakarta. Informasi-informasi diatas menunjukan bahwa kejadian ledakan populasi ubur-ubur di Teluk Jakarta tahun 2018 dan 2019 benar terjadi.

Hasil wawancara dan penelusuran berita lebih fokus pada kejadian ledakan populasi dalam skala yang besar (seperti pada bulan Oktober 2018 dan 2019), maka dilakukan verifikasi dengan melakukan kegiatan survey lapangan untuk melihat keberadaan populasi ubur-ubur di perairan, khususnya selain bulan Oktober. Tim penelitian mengunjungi perairan Teluk Jakarta pada tahun 2020 (September, Oktober, dan November), tahun 2023 (November dan Desember), dan tahun 2024 (Januari, April, dan Agustus). Dari survey yang dilakukan, ditemukannya agregasi populasi ubur-ubur pada semua bulan tersebut di perairan Tanjung Pasir, Karawang, kecuali bulan April (2024).

Meskipun demikian, berdasarkan informasi dari nelayan, sebenarnya pada bulan April keberadaan ubur-ubur ada, namun lokasinya jauh ke arah laut dan tidak berada di sekitar pantai, sehingga tidak terlihat. Agregasi pada bulan-bulan diluar musim kemarau dan Peralihan II ditemukan dalam jumlah serta sebaran yang relatif lebih terbatas.



Gambar 2. Pengunjung mengamati ubur-ubur yang terdampar di Pantai Ancol tahun 2018 (kiri). Pengelola pantai Ancol memasang papan peringatan agar pengunjung menghindari ubur-ubur yang terdapat di sekitar pantai (Dokumentasi Manajemen Pantai Ancol).

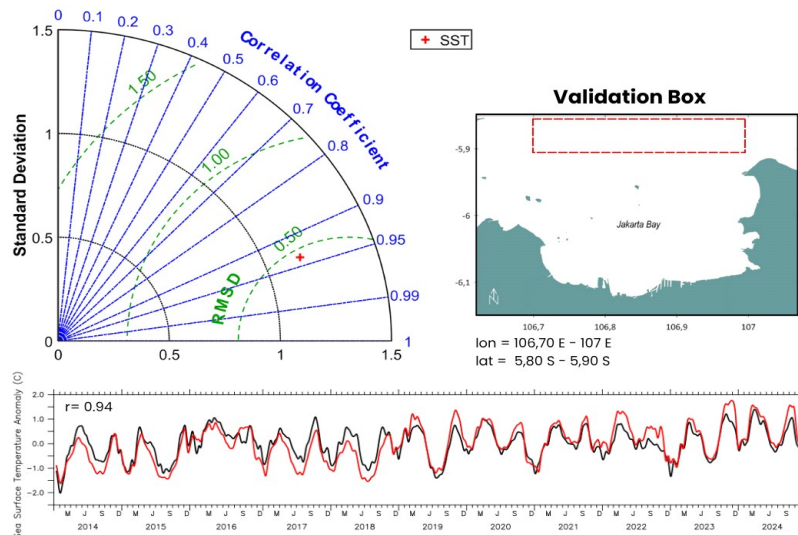
Figure 2. Visitors observe jellyfish stranded on Ancol Beach in 2018 (left). The Ancol Beach management installed warning signs advising visitors to avoid jellyfish found around the beach area (Ancol Beach Management Documentation)

Validasi Data Parameter Oseanografi dan Meteorologi

Data SST model CMEMS divalidasi menggunakan satelit observasi OSTIA pada wilayah *sampling* yang ditandai kotak merah pada Gambar 1, menggunakan diagram *Taylor*. Hasil diagram Taylor disajikan pada Gambar 3, diperoleh bahwa nilai koefisien korelasi antara data model dan satelit sangat tinggi mencapai 0,94, RMSD tergolong sangat rendah mencapai $0,46^{\circ}\text{C}$, serta standar deviasi 1,17. Validasi ini diperkuat oleh informasi dari buku manual dataset CMEMS, yang mencantumkan RMSD sebesar $0,4^{\circ}\text{C}$ untuk SST dan 0,3 psu untuk SSS. Perpaduan antara nilai RMSD yang rendah dan korelasi tinggi menunjukkan bahwa model CMEMS mampu merepresentasikan kondisi SST di Teluk Jakarta dengan akurasi tinggi. Hasil ini juga menjelaskan parameter SSS dari model dianggap dapat merepresentasikan kondisi SSS

di Teluk Jakarta.

Data curah hujan di DAS dan Teluk yang di klip dari data CHIRPS juga ditunjukkan memiliki tingkat akurasi yang tinggi, hal ini dijelaskan dalam penelitian Chakraborty et al. (2025), dimana mereka melakukan validasi data CHIRPS dengan data observasi in situ. Hasil didapatkan koefisien korelasi pearson (r) antara kedua set data selama periode 1981–2021 adalah 0,72. Hasil tersebut menunjukkan tingkat akurasi yang cukup tinggi sehingga data CHIRPS dianggap dapat merepresentasikan kondisi curah hujan di lokasi penelitian. Dengan demikian, keandalan data oseanografi dan meteorologi yang digunakan, mencakup parameter SST, SSS, curah hujan dianggap memiliki akurasi cukup tinggi dan dapat digunakan untuk analisis lanjutan di lokasi penelitian.



Gambar 3. Grafik validasi data SST antara model CMEM (merah) dan data satelit OSTIA (hitam) menggunakan analisis diagram Taylor pada area kotak validasi dengan batas koordinat $5.8 - 5.9^{\circ}\text{S}$ dan $106.7 - 107^{\circ}\text{E}$.

Figure 3. Data validation graph between CMEM model (red) and OSTIA satellite data (black) for sea surface temperature parameters using Taylor analysis diagram on area validation box with coordinate boundaries of $5.8 - 5.9^{\circ}\text{S}$ and $106.7 - 107^{\circ}\text{E}$

Tabel 1. Daftar berita yang melaporkan ledakan populasi ubur-ubur di Teluk Jakarta tahun 2018 dan 2019.

Table 1. List of news reports on jellyfish population outbreaks in Jakarta Bay in 2018 and 2019

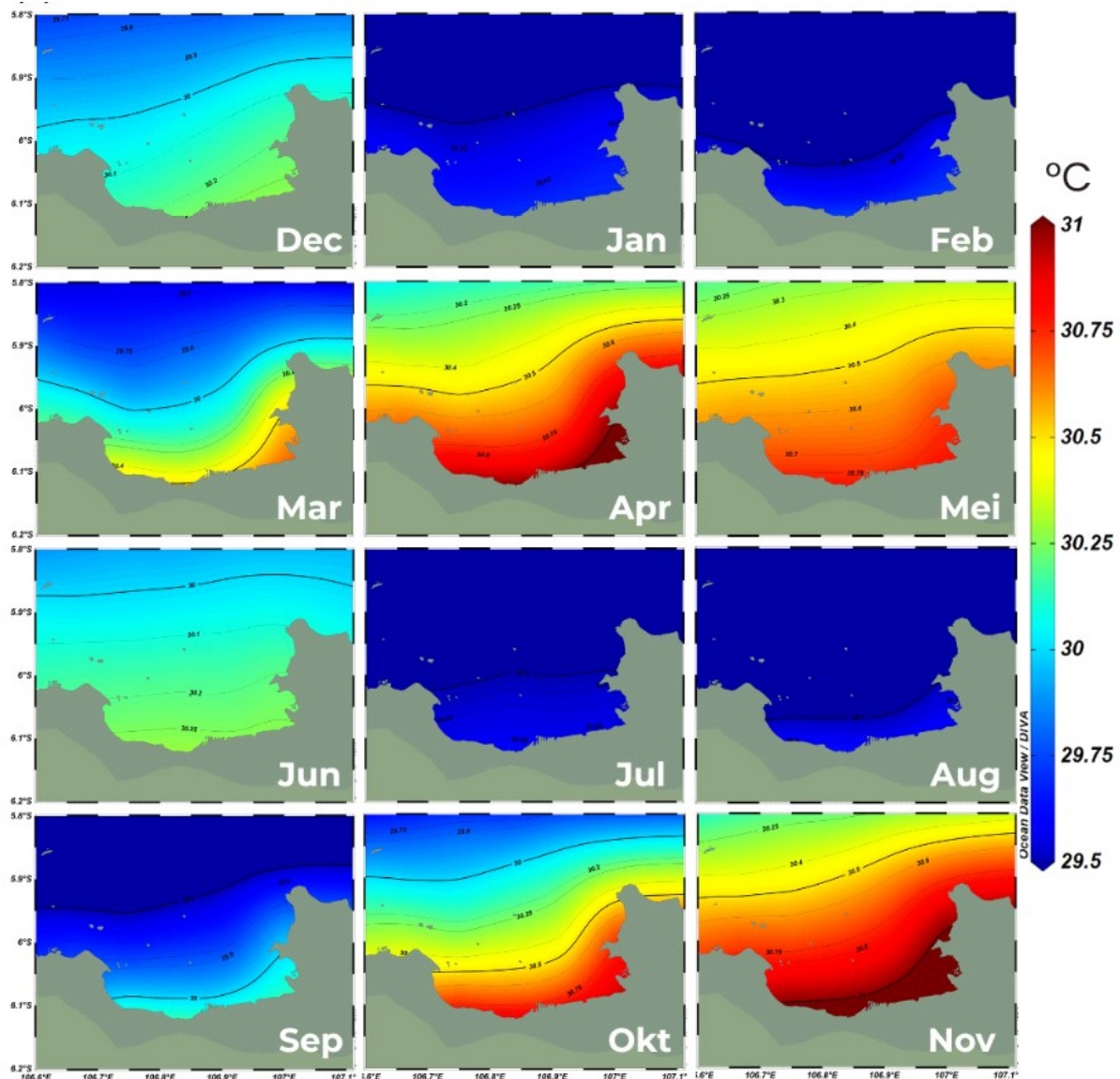
No	Tanggal	Judul Berita	Media
1	13/10/2018	Mengapa Ubur-ubur Tiba-tiba Muncul di Perairan Pantai Ancol?	Kompas.com
2	13/10/2018	Petugas Berburu Ubur-ubur di Pantai Ancol	detikNews
3	13/10/2018	Ribuan Ubur-ubur Naik ke Permukaan Pantai Ancol, Pengunjung Diminta Waspada	Tribunjakarta.com
4	13/10/2018	Sudah Sepekan Ubur-ubur Muncul di Ancol, Ini Penampakannya	detikNews
5	13/10/2018	Ubur-ubur Bermunculan di Permukaan Pantai Ancol	Kompas.com
6	13/10/2018	Ubur-ubur Muncul di Pantai Ancol	detikNews
7	13/10/2018	Video Ribuan Ubur-ubur Serbu Pantai Ancol, Gatal Bila Kena Kulit, Ini Pemicunya	Tribun-medan.com
8	13/10/2018	Wisatawan Harus Waspada, Ada Ribuan Ubur-Ubur Tampak di Permukaan Pantai Ancol	Tribun Wow
9	14/10/2018	Banyak Ubur-ubur di Pantai Ancol, Manajemen Pasang Papan Peringatan	Kompas.com
10	14/10/2018	Fenomena Ribuan Ubur-ubur Bermunculan di Pantai Ancol: Reaksi Pengunjung Hingga Antisipasi Manajemen	Tribunjakarta.com
11	14/10/2018	Heboh Ubur-ubur di Pantai Ancol	detikNews
12	14/10/2018	Melihat Wujud Ubur-ubur yang Muncul di Pantai Ancol	detikNews
13	14/10/2018	Pantai Ancol 'Diserbu' Ribuan Ubur-ubur Sampai Manajemen Keluarkan Peringatan, Ini Penyebabnya!	Tribun-medan.com
14	14/10/2018	Warga Rekam Gerombolan Ubur-ubur yang 'Serang' Pantai Ancol, Lihat Videonya. .	Tribun-medan.com
15	15/10/2018	Beredar Video Ubur-Ubur Migrasi di Pesisir Pantai Ancol Bikin Netizen Geger	travel.okezone.com
16	15/10/2018	Pertama Kalinya, Ratusan Ubur-ubur Muncul di Perairan Pantai Ancol	National Geographic Indonesia
17	16/10/2018	Ada Tiga Jenis Ubur-ubur Muncul di Pantai Ancol, Dua di Antaranya Memiliki Sengat Menyakitkan	Tribunnews.com
18	16/10/2018	Ini Jenis Ubur-ubur yang Muncul di Pantai Ancol	Wartakotalive.com
19	17/10/2018	Ada Ubur-Ubur Muncul di Pantai Ancol, Peneliti Sebut Jenis yang Berbahaya Sengatannya	Tribunkaltim.co
20	17/10/2018	LIPI Teliti Ubur-ubur yang Bermunculan di Pantai Ancol	Tempo.co
21	17/10/2018	Penjelasan Peneliti Plankton Mengenai Ubur-Ubur di Pantai Ancol Jakarta Utara	Wartakotalive.com
22	17/10/2018	Ubur-Ubur Muncul di Pantai Ancol, Peneliti Plankton Temukan Jenis yang Sengatannya Menyakitkan	Tribunnews.com
23	17/10/2018	Waspada, Ini 3 Jenis Ubur-Ubur Berbahaya yang Berkeliaran di Ancol	Liputan6.com
24	20/10/2018	Fenomena Ubur-ubur di Pantai Ancol, Ini Penjelasan Peneliti LIPI	Tempo.co
25	20/10/2018	LIPI: Ubur-ubur Teluk Jakarta Lebih Berbahaya Ketimbang di Ancol	Tempo.co
26	20/10/2018	Menyita Perhatian Masyarakat, Kumpulan Ubur-ubur Muncul di Pantai Ancol	Tribunpontianak.co.id
27	20/10/2018	Meski Masih Ditemukan Ubur-ubur, Pantai Ancol Tetap Ramai Dikunjungi Pengunjung	Tribunjakarta.com
28	20/10/2018	Pasca Munculnya Ubur-ubur, Pantai Ancol Tetap Aman Dikunjungi	Kompas.com
29	20/10/2018	Ubur-ubur di Pantai Ancol, LIPI: Sengatannya Lemah	Tempo.co
30	20/10/2018	Ubur-ubur yang Berada di Ancol Dapat Sebabkan Kulit Merah dan Gatal-gatal	Tribunjakarta.com
31	20/10/2018	Ubur-ubur yang Ditemukan di Ancol Dapat Sebabkan Kulit Merah dan Gatal-gatal	Tribunnews.com
32	21/10/2018	Pengunjung Pantai Ancol Tersengat Ubur-ubur, Kulit Terasa Terbakar dan Jadi Bengkak	Tribunnews.com
33	21/10/2018	Ubur-ubur Serbu Ancol, Ini Saran dan Larangan Korban Sengatannya	Tempo.co
34	22/10/2018	Ada Ubur-ubur di Pantai Ancol, Ini 4 Fakta agar Pengunjung Tak Perlu Khawatir	Kompas.com
35	23/10/2018	Ubur-ubur Terlihat di Pantai Ancol, Berikut Penjelasan LIPI tentang Sengatan Hewan Jeli Kenyal Ini	Tribun Travel
36	06/10/2019	Awas, Ledakan Populasi Ubur-ubur Kembali Terjadi di Pantai Ancol	Tempo.co
37	07/10/2019	Fenomena Ubur-ubur Liar Kembali Muncul di Pantai Ancol Jakarta Utara, Ini Pesan Pengelola Ancol	Wartakotalive.com
38	07/10/2019	Populasi Ubur-ubur Meningkat di Pantai Ancol	Tempo.co
39	07/10/2019	Ubur-ubur Kembali Bermunculan di Pantai Ancol	Tribunjakarta.com
40	07/10/2019	Ubur-Ubur Kembali Bermunculan di Permukaan Pantai Ancol	Kompas.com
41	07/10/2019	Ubur-ubur Muncul di Pantai Ancol, Wisatawan Tetap Bermain di Laut	Kompas.com
42	08/10/2019	Ada Tiga Jenis Ubur-ubur yang Muncul di Ancol, Salah Satunya Berdaya Sengat Tinggi	Kompas.com
43	09/10/2019	Ubur-ubur Muncul di Pesisir Pantai, Pihak Ancol: Hanya Fenomena Alam	Suara.com

Distribusi Spasial Siklus Tahunan Parameter SST dan SSS di Teluk Jakarta

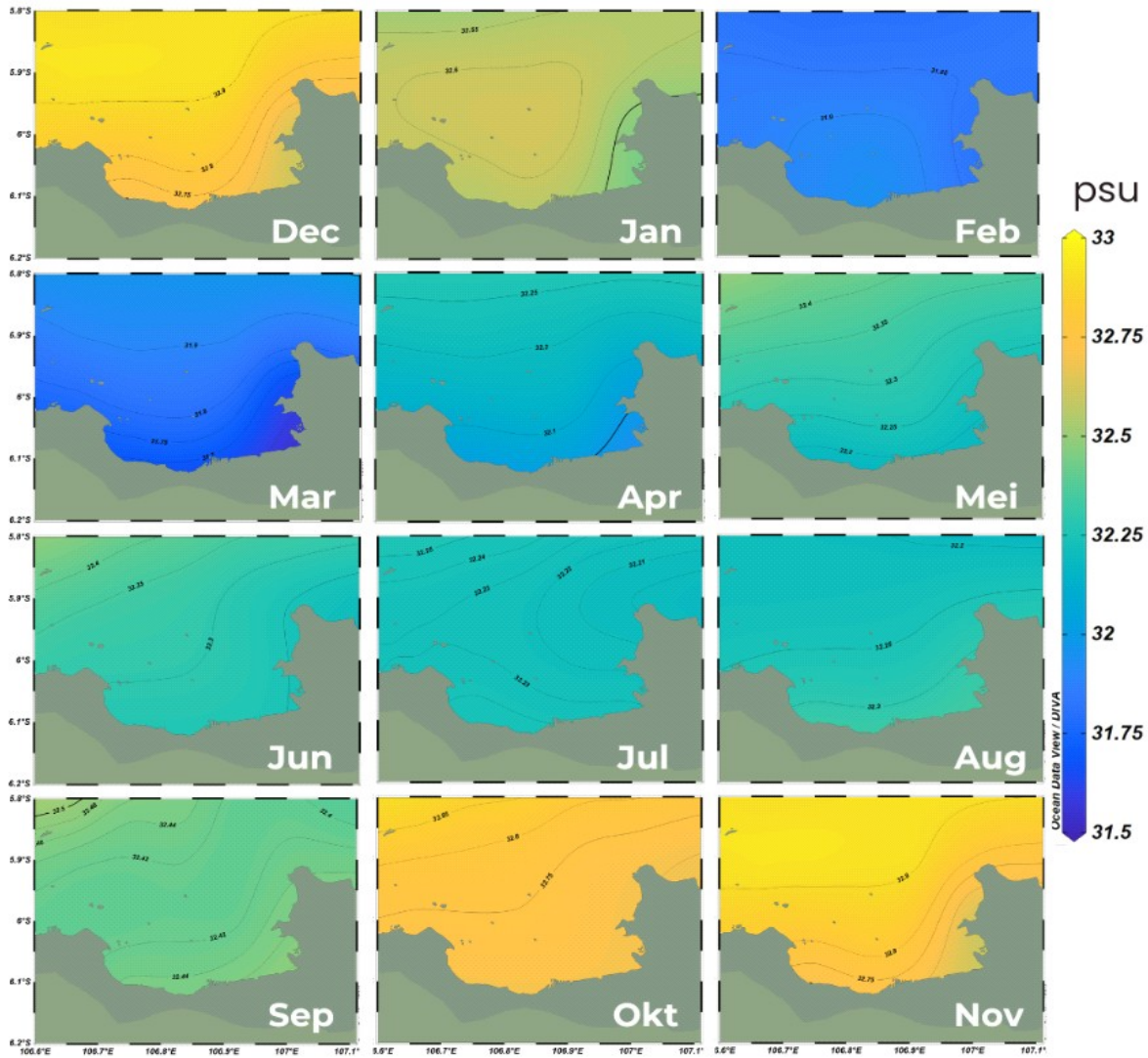
Gambar 4 menunjukkan distribusi spasial siklus tahunan SST di Teluk Jakarta berdasarkan rata-rata bulanan selama periode 2014 – 2024 (11 tahun). Pada musim hujan (Desember – Februari), SST cenderung rendah dengan nilai berkisar antara 29,5 – 31°C, dengan nilai minimum terjadi pada bulan Februari (29,5°C), terutama di perairan utara Jawa. Memasuki musim peralihan I (Maret – Mei), SST mulai mengalami peningkatan signifikan, berkisar antara 29,7 – 31°C. Kenaikan SST dimulai pada bulan Maret dan mencapai puncaknya pada bulan April (31°C) di wilayah pesisir Teluk Jakarta, sebelum kembali menurun pada bulan Mei.

Pada saat memasuki musim kemarau (Juni – Agustus), SST menurun secara merata dibandingkan dengan bulan Mei, dengan kisaran antara 29,5 – 30°C. Penurunan

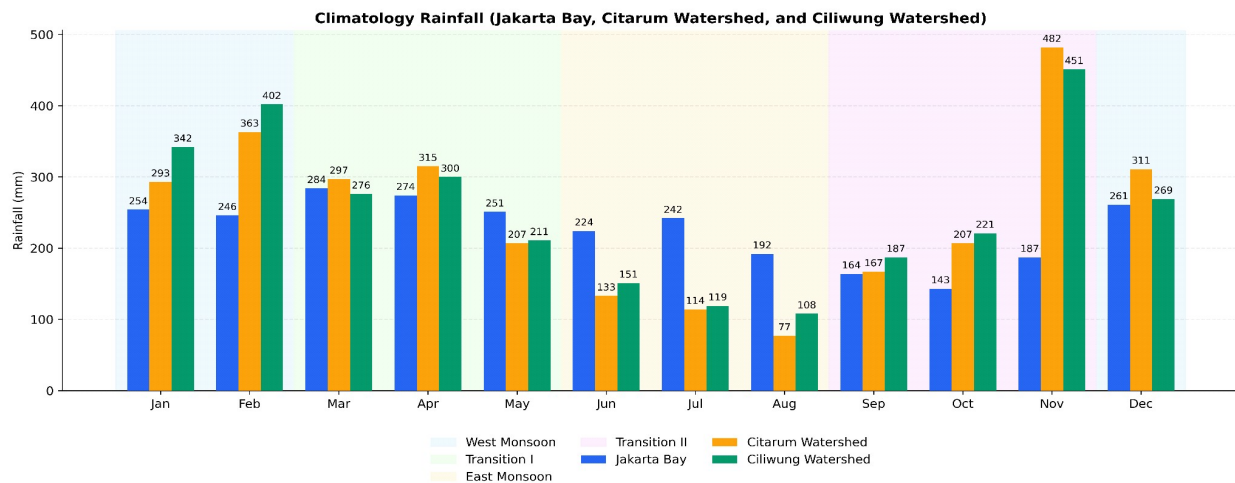
maksimum terjadi pada bulan Agustus (29,5°C), dengan distribusi SST rendah mencakup sebagian besar wilayah Teluk, terutama di bagian tengah hingga utara. Selanjutnya, pada saat musim peralihan II (September – November), SST kembali meningkat secara bertahap. Pada bulan September, SST mulai naik dari kondisi sebelumnya, dengan kisaran antara 29,75 – 30,5°C. Tren peningkatan berlanjut hingga bulan November, yang mencatat nilai tertinggi tahunan (30,75 – 31°C) di wilayah pesisir Teluk Jakarta. Fluktuasi musiman SST di Teluk Jakarta sangat dipengaruhi oleh dinamika radiasi matahari yang dipicu oleh gerak semu tahunan matahari. Gerak semu ini menyebabkan posisi matahari tampak bergeser dari utara ke selatan dan sebaliknya sepanjang tahun, sehingga mengatur distribusi energi surya yang diterima wilayah tropis seperti Teluk Jakarta.



Gambar 4. Distribusi spasial siklus tahunan SST di Teluk Jakarta selama rentang tahun 2014-2024 (11 tahun)
Figure 4. Spatial distribution of the annual cycle of SST in Jakarta Bay over the period 2014-2024 (11 years)



Gambar 5. Distribusi spasial siklus tahunan SSS di Teluk Jakarta selama rentang tahun 2014-2024 (11 tahun)
 Figure 5. Spatial distribution of the annual cycle of SSS in Jakarta Bay over the period 2014-2024 (11 years)



Gambar 6. Siklus tahunan curah hujan rata-rata bulanan di wilayah Teluk Jakarta, DAS Citarum, dan DAS Ciliwung – Cisadane selama periode tahun 2014 – 2024 (11 tahun)
 Figure 6. Annual cycle of monthly average rainfall in the Jakarta Bay area, Citarum Watershed, and Ciliwung-Cisadane Watershed during the period 2014-2024 (11 years)

Gambar 5 menunjukkan distribusi spasial siklus tahunan SSS di Teluk Jakarta berdasarkan rata-rata bulanan selama periode 2014–2024 (11 tahun). Pada musim hujan, SSS cenderung tinggi dengan nilai salinitas berkisar antara 31,5 – 33 psu, terutama pada bulan Desember dan Januari. Namun, pada bulan Februari SSS mulai menurun signifikan sampai 31,8 psu. Memasuki awal periode musim peralihan I, SSS masih mengalami penurunan yang cukup signifikan pada bulan Maret dengan nilai mencapai sekitar 31,5 psu. Nilai rendah ini tersebar luas di bagian tengah hingga barat Teluk Jakarta dan mulai mengalami peningkatan hingga bulan Mei. Pada musim kemarau, SSS mulai menunjukkan peningkatan secara bertahap dengan nilai salinitas berkisar antara 32 – 32,5 psu. Peningkatan ini berlanjut hingga bulan Agustus, meskipun belum mencapai nilai maksimum. Selanjutnya, pada musim peralihan II, SSS kembali meningkat dengan pola yang konsisten dari bulan September hingga November. Distribusi spasial SSS tertinggi tercatat pada bulan November, yang kembali mencapai kisaran antara 32,75 – 33 psu, terutama di bagian barat dan utara Teluk Jakarta.

Siklus Tahunan Curah Hujan di Teluk Jakarta

Gambar 6 menyajikan pola siklus tahunan curah hujan rata-rata bulanan di wilayah Teluk Jakarta, DAS Citarum, serta DAS Ciliwung – Cisadane selama periode 2014 – 2024 (11 tahun). Secara umum, ketiga wilayah menunjukkan pola musiman yang serupa, namun terdapat perbedaan signifikan dalam intensitas curah hujan antar wilayah. Pada periode musim hujan, curah hujan rata-rata mencapai nilai tertinggi sepanjang tahun. Puncak curah hujan tercatat pada bulan Februari, terutama di wilayah DAS Ciliwung – Cisadane, yang mencapai nilai 402 mm, diikuti oleh DAS Citarum (363 mm) dan Teluk Jakarta (246 mm). Memasuki musim peralihan I, curah hujan mulai mengalami penurunan secara bertahap. Pada bulan Maret dan April, nilai curah hujan masih tergolong sedang hingga tinggi, tetapi terus menurun secara bertahap hingga mencapai titik terendah pada bulan Mei, Teluk Jakarta mencatat sekitar 251 mm pada bulan Mei, sedangkan DAS Ciliwung – Cisadane dan DAS Citarum berkisar 207 dan 211 mm. Penurunan ini menandai transisi dari kondisi musim hujan menuju musim kemarau.

Pada musim kemarau, curah hujan berada pada tingkat terendah sepanjang tahun. Bulan Agustus menjadi bulan dengan intensitas curah hujan terendah sepanjang tahun di tiga wilayah. Teluk Jakarta mencatat nilai terendah sekitar 192 mm, sementara DAS Citarum sekitar 77 mm, dan DAS Ciliwung – Cisadane sekitar 108 mm. Pada saat musim peralihan II, curah hujan kembali mengalami peningkatan secara bertahap. Puncaknya terjadi pada bulan November, yang menjadi puncak curah hujan kedua sepanjang tahun. DAS Citarum mencatat nilai tertinggi sekitar 492 mm, diikuti oleh DAS Ciliwung–Cisadane (451 mm) dan Teluk Jakarta (187 mm).

Kondisi Klimatologis Parameter Oseanografi dan Meteorologi (2014–2024)

Gambar 7 memperlihatkan variasi siklus tahunan SST, SSS, dan rata-rata curah hujan DAS dan Teluk selama periode 2014 – 2024 (11 tahun). Selama periode 2014–2024, SST di Teluk Jakarta menunjukkan kisaran 29,3–30,6°C dengan rata-rata tahunan sekitar 30,0°C. Nilai tertinggi tercatat pada bulan April dan November, sedangkan nilai terendah muncul pada bulan Agustus. Sementara itu, SSS berkisar antara 31,8–32,8 psu, dengan nilai maksimum pada akhir tahun dan minimum pada Februari–Maret. Curah hujan rata-rata bulanan berada pada rentang 140–290 mm, dengan puncak curah hujan pada Desember–Januari dan minimum pada Agustus–September.

Secara umum, periode musim hujan (Desember–Februari) ditandai oleh SST rendah ($H^{\circ}29,3-29,8^{\circ}C$), SSS minimum ($H^{\circ}31,8-32,0$ PSU), dan curah hujan maksimum (>250 mm). Selama musim peralihan I (Maret–Mei), SST meningkat tajam hingga 30,6°C, diikuti oleh kenaikan SSS hingga 32,3 PSU dan penurunan curah hujan hingga 240 mm. Musim kemarau (Juni–Agustus) memperlihatkan penurunan SST hingga mencapai 29,3°C pada bulan Agustus, curah hujan minimum di bawah 180 mm, dan SSS yang relatif stabil di sekitar 32,2 PSU. Pada musim peralihan II (September–November), seluruh parameter kembali meningkat, dengan SST dan SSS mencapai nilai maksimum tahunan masing-masing sekitar 30,6°C dan 32,8 PSU, serta curah hujan meningkat kembali setelah bulan Oktober.

Anomali dan Variasi Iklim Berdasarkan Rekonstruksi dan Proyeksi ToI

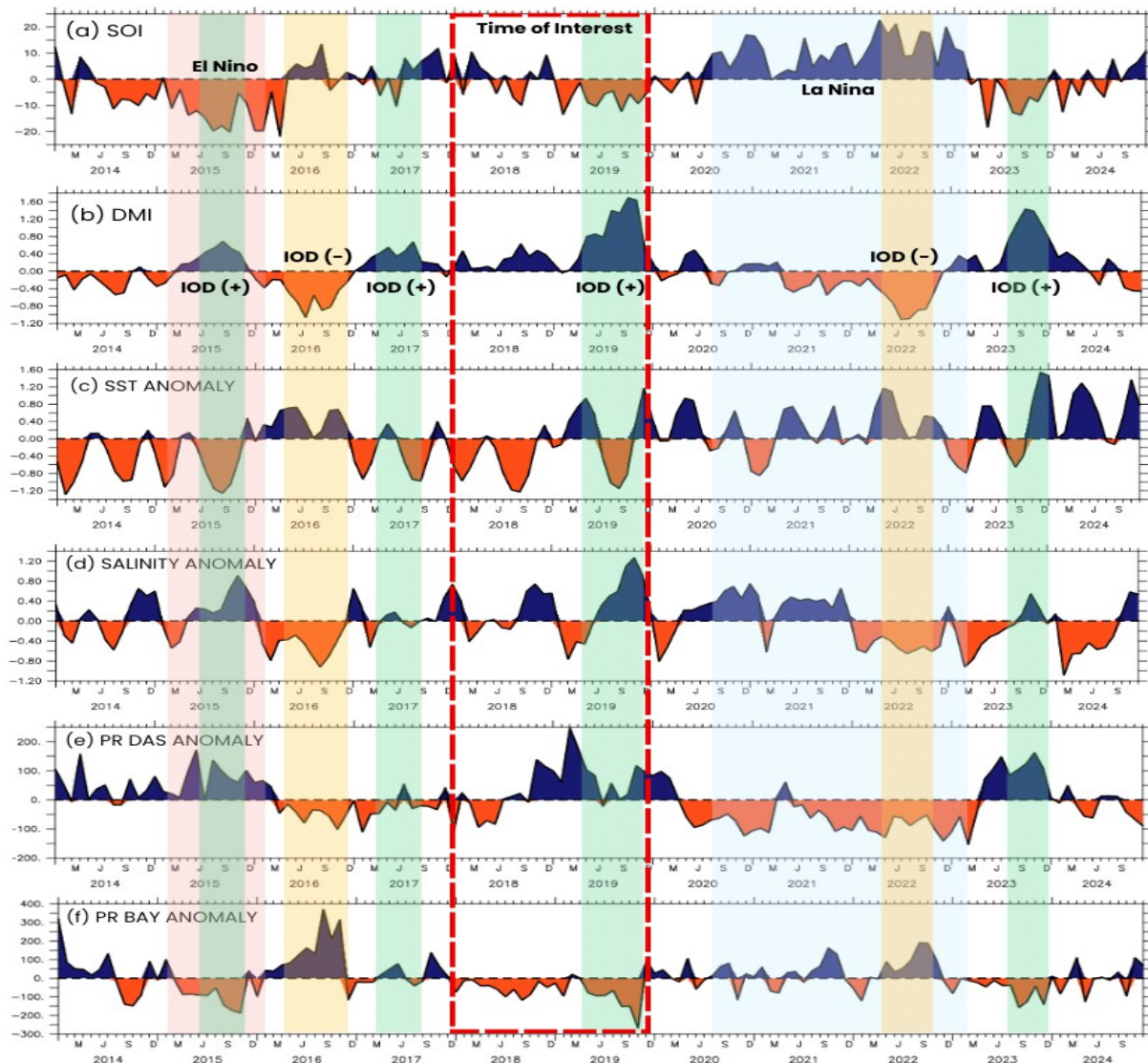
Hasil pengamatan menunjukkan bahwa dinamika anomali kondisi lingkungan di Teluk Jakarta pada periode 2014–2024 memperlihatkan keterkaitan yang konsisten antara perubahan indeks ENSO dan IOD (Gambar 8). Pada periode ToI (2018–2019), indeks SOI menunjukkan nilai negatif moderat yang menandakan kondisi El Niño lemah, sementara indeks DMI mencatat IOD positif kuat dengan puncak mencapai +1,81 pada tahun 2019. Pada periode ini, anomali SST bernilai negatif ($-0,85^{\circ}C$), SSS menunjukkan peningkatan positif (+1,25 psu), serta anomali curah hujan di wilayah DAS dan Teluk mencatat defisit yang signifikan. Kombinasi hasil tersebut menandai kondisi kering di Teluk Jakarta selama fase El Niño lemah dan IOD positif.

Empat tahun sebelum periode ToI (2014–2017) menunjukkan pola fluktuasi yang selaras dengan dinamika ENSO dan IOD. Tahun 2015 ditandai oleh El Niño kuat (SOI negatif ekstrem) dan IOD positif (+1,42), disertai anomali SST negatif ($-1,2^{\circ}C$), SSS positif, serta penurunan curah hujan di Teluk. Sebaliknya, tahun 2016 menunjukkan IOD negatif kuat ($-1,15$), diikuti anomali SST positif ($+0,59^{\circ}C$), SSS negatif, dan peningkatan curah hujan Teluk yang signifikan. Tahun 2017 menunjukkan kondisi

mendekati netral pada kedua indeks dengan fluktuasi anomali lingkungan yang relatif kecil. Pada periode setelah ToI (2020–2024), tren berlawanan muncul ketika SOI menunjukkan nilai positif tinggi (fase *triple* La Niña) sepanjang 2020–2022 dan IOD negatif dominan pada 2021–2022 (“1,12). Kondisi ini disertai anomali SST positif (hingga +1,0°C), anomali SSS negatif, serta anomali curah hujan positif di wilayah Teluk. Tahun 2023 memperlihatkan perubahan kembali ke IOD positif moderat (+1,33) dengan penurunan curah hujan Teluk dan peningkatan salinitas ringan.

Secara keseluruhan, hasil menunjukkan bahwa

perubahan indeks ENSO dan IOD selama 2014–2024 berkorelasi kuat dengan variabilitas anomali SST, SSS, dan curah hujan di Teluk Jakarta. Fase El Niño dan IOD positif berasosiasi dengan anomali tahun kering yang dicirikan dengan penurunan SST, peningkatan SSS, dan turunnya intensitas curah hujan, sedangkan La Niña dan IOD negatif berasosiasi dengan anomali tahun basah yang dicirikan dengan peningkatan SST, penurunan SSS, dan meningkatnya intensitas curah hujan. Pada hasil ini dapat dilihat bahwa periode 2018–2019 menjadi representasi utama kondisi kering, sedangkan 2021–2022 mencerminkan fase basah ekstrem setelahnya.



Gambar 8. Variabilitas antar-tahunan parameter oseanografi di Teluk Jakarta periode tahun 2014-2024 dengan *time of interest* (ToI) pada tahun 2018 dan 2019 menggunakan *Southern Oscillation Index* (a), *Dipole Mode Index* (b), anomali SST (c), anomali SSS (d), dan anomali curah hujan DAS rata-rata (e), serta anomali curah hujan Teluk (f).

Figure 8. Interannual variability of oceanographic parameters in Jakarta Bay during the 2014–2024 period using the *Southern Oscillation Index* (a), *Dipole Mode Index* (b), SST anomalies (c), SSS anomalies (d), average rainfall DAS anomalies (e) and average rainfall bay anomalies (f)

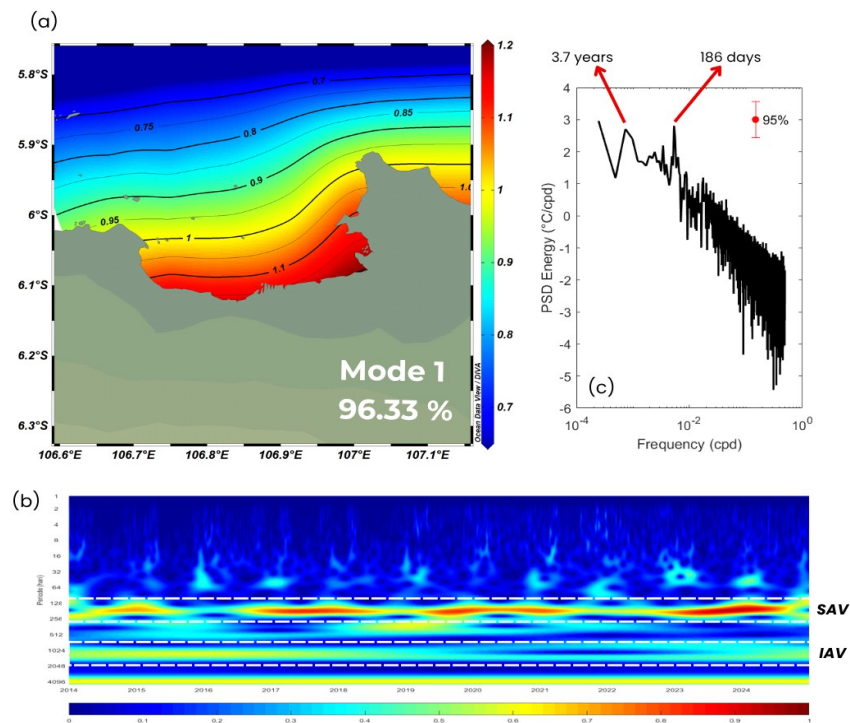
Variabilitas Spasial Temporal Parameter Oseanografi Permukaan Teluk Jakarta

Gambar 9 menyajikan dinamika variabilitas spasial dan temporal SST di Teluk Jakarta selama periode 2014–2024 (11 tahun) berdasarkan hasil analisis EOF, CWT, dan PSD. Pada mode pertama hasil analisis EOF (Gambar 8a), nilai *explained variance* sebesar 96,33%, yang menunjukkan bahwa pola ini merepresentasikan hampir seluruh variabilitas utama dari data SST dalam periode studi. Pola spasial memperlihatkan gradasi nilai koefisien EOF dari pesisir hingga ke arah laut lepas berkisar 0,6 – 1,2. Nilai tertinggi (1,2) ditemukan di sepanjang pesisir Teluk Jakarta dan menurun secara bertahap (hingga 0,6) ke arah utara perairan Laut Jawa. Hal ini tercermin dalam pola sebaran spasial, dimana osilasi positif berwarna merah tersebar pesisir Teluk Jakarta dan terus mengalami penurunan koefisien EOF ketika menjauhi pesisir, sedangkan osilasi negatif berwarna biru ditunjukkan di utara Teluk Jakarta tepatnya pada laut utara Jawa.

Variasi temporal yang ditunjukkan oleh komponen utama pertama (PC-1) pada Gambar 9b dan Gambar 9c mengindikasikan fluktuasi yang cukup kompleks dan dinamis dari waktu ke waktu. Berdasarkan hasil analisis spektral menggunakan metode PSD (Gambar 9c), terdapat dua puncak utama energi yang menonjol, yaitu pada periode semi-tahunan (186 hari), dan antar-tahunan (3,7 tahun). Keduanya mengindikasikan adanya kombinasi pengaruh variabilitas *semi-annual* dan fenomena *inter-annual* yang mempengaruhi variabilitas SST di wilayah

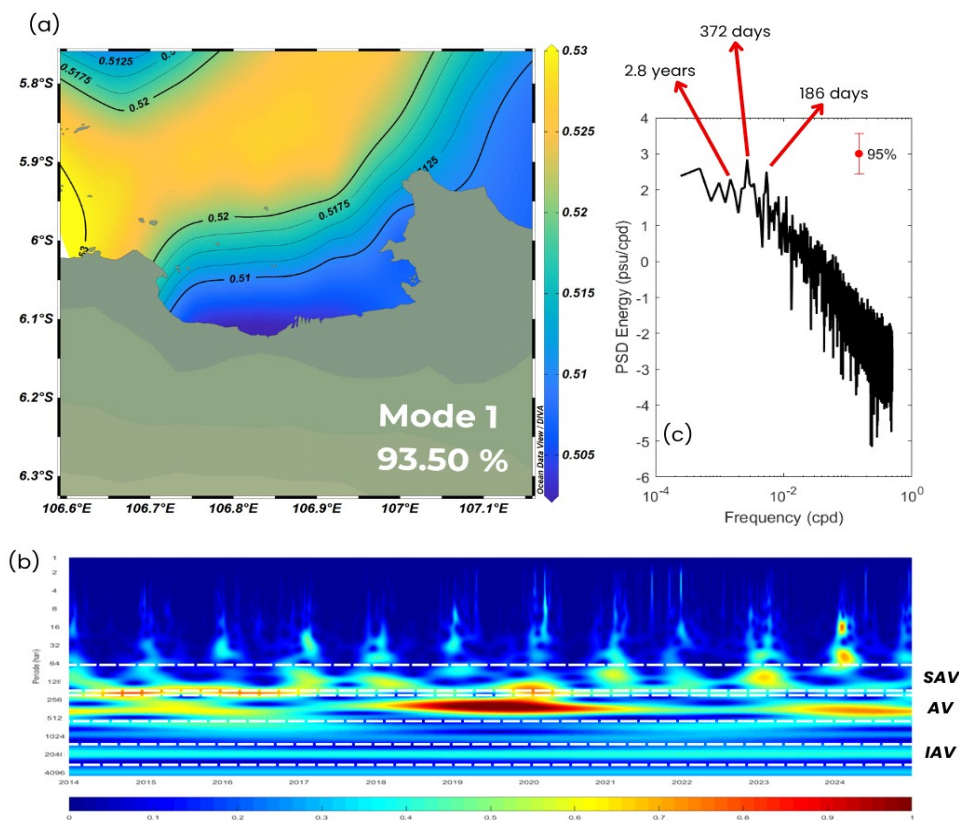
studi. Hal ini juga sejalan dengan pola pada hasil CWT (Gambar 9b), di mana intensitas amplitudo tinggi muncul di mana intensitas amplitudo tinggi muncul pada *semi-annual variability* (SAV; amplitudo 0,7 – 1), dan *inter-annual variability* (IAV; amplitudo 0,5 – 0,6). Puncak fluktuasi EOF teridentifikasi secara signifikan terjadi pada akhir tahun 2016 hingga pertengahan tahun 2018, akhir tahun 2019 hingga pertengahan tahun 2021, serta awal tahun 2023 hingga akhir tahun 2024 yang dapat diinterpretasikan sebagai periode dengan anomali SST yang paling dominan selama satu dekade terakhir.

Gambar 10 menyajikan dinamika variabilitas spasial dan temporal SSS di Teluk Jakarta selama periode periode 2014 – 2024 (11 tahun) berdasarkan hasil analisis EOF, CWT, dan PSD. Mode pertama dari analisis EOF (Gambar 10a) menjelaskan kontribusi variasi sebesar 93,50%, yang mengindikasikan bahwa mode ini secara dominan merepresentasikan keseluruhan pola utama perubahan SSS selama periode studi. Pola spasial SSS dari mode pertama menunjukkan gradasi nilai koefisien EOF yang jelas dari arah pesisir ke laut utara Jawa dengan rentang nilai berkisar antara 0,5 hingga 0,53. Nilai koefisien tertinggi (sekitar 0,52) ditemukan pada bagian barat laut menuju utara wilayah studi yang menjauhi pesisir, ditandai dengan warna kuning hingga orange. Sementara itu, nilai koefisien lebih rendah (mendekati 0,5) terdeteksi di sekitar pesisir utara Jawa, khususnya di kawasan Teluk Jakarta, yang tergambar dalam gradasi warna biru.



Gambar 9. Variabilitas SST di Teluk Jakarta periode tahun 2014-2024 berdasarkan pola spasial EOF (a), variasi temporal (analisis CWT) (b) dan perhitungan PSD (c).

Figure 9. Sea Surface Temperature (SST) variability in Jakarta Bay during the 2014–2024 period based on spatial patterns from EOF (a), temporal variations (CWT analysis) (b), and PSD calculation (c)



Gambar 10. Variabilitas SSS di Teluk Jakarta periode tahun 2014 – 2024 berdasarkan pola spasial EOF (a), variasi temporal (analisis CWT) (b) dan perhitungan PSD (c)

Figure 10. Sea Surface Salinity (SSS) variability in Jakarta Bay during the 2014–2024 period based on spatial patterns from EOF (a), temporal variations (CWT analysis) (b), and PSD calculation (c)

Variasi temporal yang ditunjukkan oleh komponen utama pertama (PC-1) pada Gambar 10b dan Gambar 10c mengindikasikan fluktuasi yang cukup dinamis dari waktu ke waktu. Berdasarkan hasil analisis spektral menggunakan metode PSD (Gambar 10c), terdapat tiga puncak utama energi yang menonjol, yaitu pada periode semi-tahunan (186 hari), tahunan (372 hari), dan antar-tahunan (sekitar 2,8 tahun). Ketiganya merepresentasikan adanya kombinasi variabilitas musiman hingga antar-tahunan yang mempengaruhi dinamika salinitas di wilayah studi. Hal ini diperkuat oleh pola yang terlihat pada hasil analisis CWT (Gambar 10b), di mana intensitas amplitudo tinggi muncul pada *semi-annual variability* (SAV; amplitudo 0,5 – 0,6), *annual variability* (AV; amplitudo 0,7 – 1), dan *inter-annual variability* (IAV; amplitudo 0,3 – 0,4). Puncak fluktuasi EOF teridentifikasi secara signifikan terjadi pada akhir tahun 2016 hingga awal tahun 2021, yang dapat diinterpretasikan sebagai periode dengan anomali SSS yang paling dominan selama satu dekade terakhir.

PEMBAHASAN

Dinamika lingkungan perairan Teluk Jakarta sangat terkait dengan variasi musim di Indonesia. Secara umum, musim di Indonesia dibagi menjadi 4 periode, yaitu periode

musim hujan, peralihan I, musim kemarau, dan peralihan II. Pembagian musim ini erat kaitannya dengan posisi geografis Indonesia yang terletak di sekitar ekuator serta berada dalam wilayah ekosistem tropis. Kondisi ini menyebabkan wilayah Indonesia sangat dipengaruhi oleh sistem angin muson Asia – Australia. Menurut Dida *et al.* (2016), angin muson di Indonesia bertiup secara bergantian sepanjang tahun, dimana angin muson timur (SEM) berlangsung dari April hingga September, sedangkan angin muson barat (NWM) terjadi dari Oktober hingga Maret. Variasi arah dan kekuatan angin muson tersebut berdampak pada dinamika parameter lingkungan seperti SST, SSS, dan intensitas curah hujan yang ditemukan memiliki variasi pada setiap musimnya.

Misalnya pada saat musim hujan (Desember, Januari, Februari), Teluk Jakarta mengalami kenaikan intensitas curah hujan yang diikuti dengan penurunan konsentrasi SSS dan nilai SST. Variasi pada musim hujan tersebut disebabkan oleh berhembusnya angin NWM. Menurut Pandia *et al.*, (2019), pada saat musim hujan, *Western North Pacific Monsoon Index* (WNPMI) menunjukkan nilai negatif, dimana angin bergerak dari barat – timur. Angin NWM membawa massa udara lembab sehingga mendorong pembentukan awan konvektif yang intens, menyebabkan tingginya curah hujan di kawasan pesisir

seperti Teluk Jakarta. Tingginya curah hujan juga meningkatkan limpasan air tawar dari DAS ke dalam teluk sehingga SSS menurun, terutama di perairan pesisir. Penurunan nilai SST juga selaras dengan garis edar matahari di langit, posisi matahari yang sedang berada di BBS cenderung mengurangi radiasi matahari di daerah ekuator (termasuk Teluk Jakarta) sehingga SST juga lebih dingin pada periode ini.

Memasuki musim peralihan I (Maret, April, Mei), terjadi transisi dari musim hujan menuju musim kemarau yang ditandai dengan mulai menurunnya intensitas curah hujan serta meningkatnya konsentrasi SSS dan nilai SST. Pada periode ini, intensitas curah hujan mulai menurun secara bertahap seiring dengan melemahnya sistem angin NWM yang sebelumnya mendominasi. Penurunan curah hujan ini menyebabkan berkurangnya limpasan air tawar dari DAS sehingga konsentrasi SSS mulai meningkat secara bertahap. Posisi matahari yang tepat berada di atas khatulistiwa (equinox fase pertama) pada periode ini juga tinggi di permukaan laut, sehingga terjadi kenaikan SST secara bertahap di lokasi studi.

Memasuki musim kemarau (Juni, Juli, Agustus), variasi musim ditandai dengan penurunan intensitas curah hujan dan nilai SST yang diikuti dengan peningkatan konsentrasi SSS. Variasi ini dipengaruhi oleh berhembusnya angin SEM, sebagaimana dijelaskan dalam Pandia *et al.* (2019), bahwa saat musim kemarau *Australian Monsoon Index* (AUSMI) menunjukkan nilai positif, di mana angin zonal bergerak dari timur ke barat. Angin SEM membawa massa udara kering sehingga menurunkan pembentukan awan konvektif, yang berdampak pada berkurangnya curah hujan di wilayah pesisir, termasuk Teluk Jakarta. Penurunan curah hujan yang signifikan, dengan nilai minimum sebesar 192 mm pada bulan Agustus, menyebabkan berkurangnya pasokan air tawar dari DAS Citarum dan Ciliwung – Cisadane ke Teluk. Hal ini mendorong peningkatan konsentrasi SSS secara progresif terutama di perairan pesisir. Penurunan nilai SST juga selaras dengan berkurangnya radiasi matahari, mengingat posisi matahari tepat berada di BBU, sehingga efek pemanasan di wilayah ekuator melemah dan memperkuat pendinginan permukaan laut.

Memasuki musim peralihan II (Oktober, November, Desember), terjadi transisi dari musim kemarau menuju musim hujan yang ditandai dengan peningkatan nilai SST dan konsentrasi SSS secara bertahap. Pola ini memiliki kemiripan dengan musim peralihan I, namun dengan intensitas yang lebih tinggi. Peningkatan SST dipicu oleh pergeseran posisi semu matahari yang kembali berada di ekuator (equinox fase kedua), sehingga intensitas radiasi matahari meningkat di wilayah ekuator. Walaupun curah hujan mulai meningkat kembali pada bulan November, SSS justru mencapai nilai puncak tahunan pada bulan tersebut. Kondisi ini diduga berkaitan dengan keterlambatan respons hidrologis dari DAS terhadap curah hujan (Hadikusumah, 2008), serta adanya potensi intrusi massa

air laut dengan salinitas tinggi akibat perubahan pola arus (Jeppesen, 2023). Hal ini menunjukkan bahwa dinamika lingkungan pesisir tidak hanya dipengaruhi oleh presipitasi lokal, namun juga oleh faktor-faktor oseanografis skala regional yang turut membentuk kondisi perairan Teluk Jakarta selama periode transisi ini.

Periode ledakan populasi ubur-ubur di Teluk Jakarta diduga memiliki keterkaitan erat dengan variasi musim. Hal ini terlihat dari kejadian ledakan populasi ubur-ubur di Teluk Jakarta yang sering dilaporkan terjadi pada musim kemarau hingga musim peralihan II. Pola ini menunjukkan bahwa kondisi lingkungan pada kedua musim tersebut berperan penting dalam mendukung perkembangan populasi ubur-ubur. Namun demikian, identifikasi faktor kondisi lingkungan yang mendorong ledakan populasi ubur-ubur, tidak hanya dilihat dari kondisi lingkungan saat terjadinya ledakan populasi. Kondisi lingkungan sebelum ledakan populasi terjadi juga berperan penting dalam menentukan ukuran populasi ubur-ubur. Hal ini dikarenakan ubur-ubur memiliki siklus hidup dengan tahapan metagenesis yang kompleks (Helm, 2018), dimana setiap tahapannya membutuhkan kondisi lingkungan yang khas. Secara umum siklus hidup ubur-ubur (*scyphozoa*) melewati beberapa tahapan metagenesis, yaitu telur, planula, polip, strobila, ephyra, dan kemudian medusa (Schiari et al., 2008; Helm, 2018; Kienberger et al., 2018).

Peristiwa ledakan populasi ubur-ubur yang terjadi secara masif pada bulan Oktober 2018 dan kembali terjadi pada tahun 2019 di Teluk Jakarta mengindikasikan adanya dinamika lingkungan yang mendukung perkembangan siklus hidup ubur-ubur pada kedua tahun tersebut. Perbandingan anomali kondisi lingkungan perairan Teluk Jakarta tahun 2018-2019 dengan data anomali sebelum dan sesudah periode ToI menunjukkan adanya kombinasi beberapa kondisi lingkungan yang diduga dapat menjadi pemicu ledakan populasi ubur-ubur yang masif pada periode tersebut. Misalnya dari aspek iklim, Indeks SOI tahun 2018 dan 2019 menunjukkan nilai relatif netral hingga sedikit positif, namun nilai Dipole Mode Index (DMI) berada pada kisaran positif yang cukup kuat hingga sangat kuat, terutama pada tahun 2019. Kondisi ini mengindikasikan bahwa selama periode tersebut fenomena IOD berperan lebih dominan mempengaruhi lingkungan perairan Indonesia dibanding fenomena ENSO, khususnya di wilayah barat Indonesia.

Berdasarkan nilai DMI, tahun 2018 dan 2019 merupakan fase perkembangan dan matang dari fenomena IOD positif yang kuat dan konsisten. Nilai DMI positif secara umum akan berdampak pada penurunan SST, peningkatan SSS, dan penurunan intensitas curah hujan (Kido & Tozuka, 2017; Sun et al., 2023; Iskandar et al., 2022). Ketiga dampak ini terjadi di Teluk Jakarta sebagaimana terlihat pada Gambar 9b–9e. Pada pertengahan hingga akhir tahun 2018 dan 2019, SST menunjukkan anomali negatif yang konsisten, sejalan dengan meningkatnya SSS dan menurunnya curah hujan. Penurunan SST pada periode

IOD positif di wilayah ini dipengaruhi oleh penguatan angin timuran dan berkurangnya tutupan awan, yang menyebabkan peningkatan kehilangan panas melalui evaporasi dan penurunan fluks panas bersih di permukaan laut.

Secara fisiologis, penurunan SST dapat memicu strobilasi pada ubur-ubur, yaitu proses pelepasan ephyra dari strobila (Hofman et al., 1978; Daryanabard dan Dawson 2008; Russell 1970; Lucas et al., 2012; Fuchs et al., 2014). Pada jenis *Rhopilema esculentum*, pelepasan mulai berlangsung pada suhu 19°C dan paling rendah pada suhu 14-16°C (Xin-lei et al., 2006). Pada jenis *Nemopilema nomurai* pun pelepasan ephyra berlangsung pada suhu rendah, yaitu 10-16°C (Feng et al., 2020). Ephyra sendiri merupakan larva muda yang akan berkembang menjadi ubur-ubur dewasa (medusa) (Adler dan Jarms 2009; Schiariti et al., 2014), sehingga keberhasilan pelepasan ephyra ini berperan besar dalam menentukan kelimpahan populasi ubur-ubur (Lucas et al., 2012). Semakin banyak ephyra yang berhasil dilepaskan, maka semakin banyak pula jumlah ubur-ubur yang terakumulasi di perairan, begitu pula sebaliknya.

Meskipun penurunan SST berperan mendorong strobilasi, namun SST yang rendah ini sebenarnya tidak menguntungkan pertumbuhan ephyra. Hal ini dikarenakan SST yang rendah dapat menurunkan laju makan ephyra (*feeding rate*) sehingga berdampak pada menurunnya pertumbuhan (Shin & Choi 2025). Meskipun demikian, tren penurunan SST (terutama di musim kemarau) tidak berlangsung terus-menerus. Menjelang akhir musim kemarau hingga memasuki musim Peralihan II, terjadi peningkatan kembali nilai SST. Menurut Shin & Choi (2025), kombinasi SST dan SSS yang meningkat dapat mendorong perkembangan ephyra menjadi medusa. Hal ini kemungkinan menjadi penyebab mengapa puncak ledakan populasi ubur-ubur di Teluk Jakarta dilaporkan sering menjelang akhir musim kemarau (Agustus) dan awal Musim Peralihan II (September dan Oktober). Pada periode tersebut kenaikan SST dan SSS mendukung perkembangan larva ephyra menjadi ubur-ubur medusa dewasa.

Parameter SSS juga menunjukkan anomali peningkatan yang signifikan pada tahun 2018-2019, khususnya selama musim kemarau hingga musim peralihan II (Gambar 9c). Peningkatan SSS ini kemungkinan dipengaruhi oleh dua faktor utama. Pertama, yaitu rendahnya limpasan air tawar dari DAS akibat kemarau yang berlangsung hampir sepanjang tahun. Hal ini terlihat dari data curah hujan pada tahun 2018-2019 yang menunjukkan defisit anomali curah hujan yang signifikan, baik di DAS maupun Teluk (Gambar 9e). Yang kedua, peningkatan SSS juga diperkuat oleh kemungkinan intrusi massa air laut dengan SSS tinggi dari Laut Jawa yang terdorong masuk ke Teluk Jakarta akibat perubahan pola arus selama dominasi IOD positif (Zhang, Du, et al., 2016).

Anomali peningkatan SSS pada tahun 2018 dan 2019 diduga juga menguntungkan perkembangan ubur-ubur di

periode tersebut. Salinitas mempengaruhi kestabilan osmotik ubur-ubur sehingga berpengaruh terhadap pertumbuhan dan transisi antar-fase kehidupan (Shin & Choi 2025). Menurut Shin dan Choi (2025), ephyra dari spesies *Sanderia malayensis* menunjukkan tingkat pertumbuhan dan kelangsungan hidup yang optimal pada kisaran salinitas 30–33 psu. Kisaran ini dianggap sebagai kondisi salinitas yang stabil secara osmotik dan sangat mendukung transisi fase ephyra menjadi medusa.

Menurut Conley dan Uye (2015), peningkatan SSS juga berperan meningkatkan kecepatan berenang dan tingkat keberhasilan planula untuk menempel pada substrat. Planula adalah bentuk ubur-ubur paling awal yang akan berkembang menjadi strobila. Semakin banyak planula yang berhasil menempel pada substrat, maka akan semakin banyak strobila yang berkembang. Semakin banyak strobila yang berkembang maka akan semakin banyak larva ubur-ubur (ephyra) yang dilepas ke perairan, terutama saat didukung oleh penurunan suhu perairan seperti saat DMI positif terjadi. Dengan demikian, sinergi antara SST yang rendah, SSS yang tinggi, dan defisit curah hujan yang berlangsung dalam waktu yang bertepatan dengan fase krusial dalam siklus hidup ubur-ubur diduga menjadi faktor utama yang mendorong ledakan populasi ubur-ubur secara masif pada tahun 2018 dan 2019.

Meski demikian, tidak semua tahun dengan fenomena IOD positif menunjukkan pola ledakan yang juga masif. Sebagai contoh, pada tahun 2023, meskipun nilai DMI kembali menunjukkan fase positif cukup kuat, namun tidak ditemukan laporan adanya ledakan populasi ubur-ubur yang masif. Hal ini dikarenakan, pada tahun 2023, meskipun DMI positif, anomali SST menunjukkan nilai positif (lebih hangat dari normal) yang justru dapat menghambat proses strobilasi (Russell, 1970; Shin & Choi, 2025). Hal ini berbeda dengan tahun 2018-2019 yang sama-sama memiliki nilai IOD positif tapi anomali SST terjadi bernilai negatif (lebih dingin dibanding normal). Ketidakkonsistenan ini diduga disebabkan adanya interaksi faktor lain yang menekan efek IOD positif di tahun 2023. Misalnya fenomena ENSO yang lebih kuat pada tahun 2023, dibanding tahun 2018-2019 yang relatif lebih netral (Gambar 9). Selain itu, mungkin juga disebabkan fase basah MJO atau pengaruh silang dari *El Niño Modoki*, yang dapat memperkuat pemanasan permukaan di perairan barat Indonesia (Sun et al., 2022; Ashok et al., 2007). Selain itu, SSS juga cenderung rendah akibat peningkatan curah hujan di wilayah DAS (Gambar 9d), yang memperbesar pasokan air tawar ke Teluk Jakarta dan mengganggu perkembangan ephyra menjadi medusa (Conley & Uye, 2015).

KESIMPULAN

Penelitian ini merekonstruksi kondisi lingkungan laut Teluk Jakarta selama periode musim ubur-ubur (ToI) tahun 2018 dan 2019, dengan membandingkan anomali parameter oseanografi terhadap periode sebelum dan sesudah ToI. Hasil rekonstruksi menunjukkan bahwa kedua kejadian

tersebut berlangsung di bawah pengaruh dominan *Indian Ocean Dipole* (IOD) positif kuat, dengan kondisi *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO) yang relatif netral hingga sedikit positif. Kombinasi anomali ini menyebabkan penurunan SST dan curah hujan, serta peningkatan SSS di Teluk Jakarta. Analisis klimatologi memperlihatkan bahwa puncak kemunculan ubur-ubur umumnya terjadi pada akhir musim kemarau hingga awal Musim Peralihan II (Agustus–Oktober). Pada periode tersebut, nilai SST dan SSS meningkat kembali seiring dengan melemahnya angin timuran dan berkurangnya limpasan air tawar ke laut. Kondisi tersebut diperkirakan berkontribusi terhadap peningkatan kelimpahan ubur-ubur, sejalan dengan temuan studi sebelumnya bahwa suhu yang lebih rendah mendukung proses strobilasi dan pelepasan ephyra, sedangkan salinitas tinggi mempercepat perkembangan ephyra menjadi ubur-ubur dewasa (medusa). Sementara itu, penurunan curah hujan turut memperkuat peningkatan salinitas, terutama di wilayah pesisir. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa dinamika populasi ubur-ubur di Teluk Jakarta tidak hanya ditentukan oleh siklus musiman lokal, tetapi juga oleh interaksi kompleks antara anomali lingkungan laut dan variabilitas iklim antartahunan seperti IOD dan ENSO. Oleh karena itu, hasil rekonstruksi ini dapat menjadi dasar untuk proyeksi kondisi lingkungan di masa mendatang, dengan menekankan pentingnya pemantauan terpadu parameter SST, SSS, dan curah hujan, serta indeks iklim global (DMI dan SOI) sebagai langkah awal dalam pengembangan sistem prediksi atau peringatan dini terhadap potensi ledakan populasi ubur-ubur di Teluk Jakarta.

PERSANTUNAN

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Impian Jaya Ancol, khususnya Tim Konservasi dan Kurator SeaWorld Ancol, atas dukungan fasilitas, data, serta kerja sama yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Apresiasi juga disampaikan kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam proses pengambilan data, diskusi ilmiah, dan penyempurnaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Adler L, Jarms G. (2009). New insights into reproductive traits of scyphozoans: special methods of propagation in *Sanderia malayensis* Goette, 1886 (Pelagiidae, Semaestomeae) enable establishing a new classification of asexual reproduction in the class Scyphozoa. *Mar Biol*, 156, 1411–1420. <https://doi.org/10.1007/s00227-009-1181-6>

Aldrian, E., & Djamil, Y. S. (2003). Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature. *International Journal of Climatology*. 23(12), 1432-1452. <https://doi.org/10.1002/joc.950>

Aldrian, E., & Djamil, Y. S. (2008). Spatio-temporal climatic change of rainfall characteristics in Indonesia.

International Journal of Climatology. 28(3), 317-327. <https://doi.org/10.1002/joc.1527>

Ashok, K., Guan, Z., & Yamagata, T. (2003). A look at the relationship between the ENSO and the Indian Ocean Dipole. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*. 81(1), 41–56. <https://doi.org/10.2151/jmsj.81.41>

Ashok, K., S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng, and T. Yamagata (2007). *El Nino Modoki* and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research*, 112 (1), 1-27, <https://doi.org/10.1029/2006JC003798>

Atmadipoera, AS., & Mubaraq, GL. (2016). Struktur dan variabilitas Arlindo di Laut Sulawesi. *Jurnal Kelautan Nasional*. 11(3), 159 - 174.

Atmadipoera, AS., & Hasanah, P. (2017). Karakteristik dan variabilitas Arlindo Flores dan koherensinya dengan arus pantai selatan Jawa. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 9(2), 537 - 556. <http://dx.doi.org/10.29244/jitkt.v9i2.19289>

Bendat JS, Piersol AG. (2010). Random Data Analysis and Measurement Procedure. John Wiley and Sons Inc. New York (US).

Chakraborty, S., Pan, S., Pal, S.C., Islam, A.R., Alam, E., & Islam, M.K. (2025). Evaluating the impact of rainfall patterns on sustainable agricultural crop production. *Discover Sustainability*. 6:516 <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01392-6>

Chang, C. P., Wang, Z., McBride, J., & Liu, C. H. (2005). Annual cycle of Southeast Asia—Maritime Continent rainfall and the asymmetric monsoon transition. *Journal of climate*, 18(2), 287-301. <https://doi.org/10.1175/JCLI-3257.1>

Condon, R. H., Graham, W. M., Duarte, C. M., Pitt, K. A., Lucas, C. H., Haddock, S. H. D., Sutherland, K. R., Robinson, K. L., Dawson, M. N., Decker, M. B., Mills, C. E., Purcell, J. E., Malej, A., Mianzan, H., Uye, S. I., Gelcich, S., & Madin, L. P. (2012a). Questioning the rise of gelatinous Zooplankton in the world's oceans. *BioScience*, 62(2), 160–169. <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.2.9>

Condon, R.H., Duarte, C.M., Pitt, K.A., Robinson, K.L., Lucas, C.H., Sutherland, K.R., Mianzan, H.W., Borgeberg, M., Purcell, J.E., Decker, M.B., Uye, S., Madin, L.P., Brodeur, R.D., Haddock, S.H., Malej, A., Parry, G.D., Eriksen, E., Quiñones, J., Acha, M.E., Harvey, M., Arthur, J.M., & Graham, W.M. (2012b). Recurrent jellyfish blooms are a consequence of global oscillations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 1000 - 1005.

Conley, K.R., & Uye, S. (2015). Effects of hyposalinity on survival and settlement of moon jellyfish (*aurelia aurita*) planulae. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 462, 14-19.

Daryanabard, R., & Dawson, M. N. (2008). Jellyfish blooms: *Crambionella orsini* (Scyphozoa: Rhizostomeae) in the gulf of Oman, Iran, 2002–2003. *Journal of the Marine*

- Biological Association of the United Kingdom, 88(3), 477-483.
- Dida, HP., Suparman, S., Widhiyanuriyawan, D.. 2016. Pemetaan potensi energi angin di perairan Indonesia berdasarkan data satelit QuickScat dan WindSa. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 7(2): 95-101.
- Dong, Z., Liu, D., & Keesing, J.K. (2010). Jellyfish blooms in China: Dominant species, causes and consequences. *Marine pollution bulletin*, 60 7, 954-63 .
- Fernández-Álias, A., Marcos, C., & Pérez-Ruzafa, A. (2024). The unpredictability of scyphozoan jellyfish blooms. *Frontiers in Marine Science*, 11, Article 1349956. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1349956>
- Firdaus, M.R. (2020). Aspek Biologi Ubur-Ubur Api, *Physalia physalis* (LINNAEUS, 1758). *Oseana*.
- Feng, S., Lin, J., Sun, S., Zhang, F., Li, C., & Xian, W. (2020). Combined effects of seasonal warming and hyposalinity on strobilation of *Nemopilema nomurai* polyps. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2019.112820>
- Fuchs, B., Wang, W., Graspeuntner, S., Li, Y., Insua, S., Herbst, E. M., ... & Khalturin, K. (2014). Regulation of polyp-to-jellyfish transition in *Aurelia aurita*. *Current Biology*, 24(3), 263-273.
- Graham, W. M., S. Gelcich, K. L. Robinson, C. M. Duarte, L. Brotz, J. E. Purcell, L. P. Madin, H. Mianzan, K. R. Sutherland, S. I. Uye, K. A. Pitt, C. H. Lucas, M. Bøgeberg, R. D. Brodeur & R. H. Condon, 2014. Linking human well-being and jellyfish: ecosystem services, impacts, and societal responses. *Frontiers in Ecology and the Environment*. <https://doi.org/10.1890/130298>.
- Hadikusumah, H. 2008. Variabilitas Suhu Dan Salinitas Di Perairan Cisadane. *Makara Journal of Science*, 12(2), 6.
- Hannachi, A., Jolliffe, I. T., & Stephenson, D. B. (2007). Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review. *International Journal of Climatology*, 27(9), 1119–1152. <https://doi.org/10.1002/joc.1499>
- Hays, G. C., Doyle, T. K., & Houghton, J. D. R. (2018). A paradigm shift in the trophic importance of jellyfish? *Trends in Ecology & Evolution*, 33(11), 874–884. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.09.001>
- Helm, R.R. (2018), Evolution and development of scyphozoan jellyfish. *Biol Rev*, 93: 1228-1250. <https://doi.org/10.1111/brv.12393>
- Hofmann, D. K., Neumann, R., & Henne, K. (1978). Strobilation, budding and initiation of scyphistoma morphogenesis in the rhizostome *Cassiopea andromeda* (Cnidaria: Scyphozoa). *Marine Biology*, 47, 161-176.
- Iskandar, I., Lestari, DO., Saputra, AD., Setiawan, RY., Wirasatriya, A., Susanto, RD., Mardiansyah, W., Irfan, M., Rozirwan., Setiawan, JD., Kunarso. 2022. Extreme indian ocean dipole in 2019 and its impact on Indonesia. *MDPI*. 14(22): 1-15. <https://doi.org/10.3390/su142215155>
- Jackson, J.B., Kirby, M.X., Berger, W.H., Bjorndal, K.A., Botsford, L.W., Bourque, B.J., Bradbury, R., Cooke, R.G., Erlandson, J.M., Estes, J.A., Hughes, T.P., Kidwell, S.M., Lange, C.B., Lenihan, H.S., Pandolfi, J.M., Peterson, C., Steneck, R.S., Tegner, M.J., & Warner, R.R. (2001). Historical Overfishing and the Recent Collapse of Coastal Ecosystems. *Science*, 293, 629 - 637.
- Jeppesen, E., Canedo-Arguelles, M., Entrekin, S., Sarma, S. S. S., & Padišák, J. (2023). Effects of induced changes in salinity on inland and coastal water ecosystems: editor summary. *Hydrobiologia*, 850(20), 4343-4349. <https://doi.org/10.1007/s10750-023-05352-x>.
- Kido, S., & Tozuka, T. (2017). Salinity variability associated with the positive Indian Ocean dipole and its impact on the upper ocean temperature. *Journal of Climate*, 30(19), 7885-7907. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0133.1>
- Kienberger K, Riera-Buch M, Schönmamm AM, Bartsch V, Halbauer R, et al. (2018) First description of the life cycle of the jellyfish *Rhizostoma luteum* (Scyphozoa: Rhizostomeae). *PLOS ONE* 13(8), e0202093. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202093>
- Kompas TV. (2018). Kawan ubur-ubur muncul di Pantai Ancol. Kompas TV. <https://www.kompas.tv/nasional/34038/kawan-ubur-ubur-muncul-di-pantai-ancol>
- Kompas.com. (2019). Ubur-ubur kembali bermunculan di permukaan Pantai Ancol. Kompas. Diambil dari <https://megapolitan.kompas.com/read/2019/10/07/20560111/ubur-ubur-kembali-bermunculan-di-permukaan-pantai-ancol>
- Lucas, C.H., Graham, W.M., & Widmer, C.L. (2012). Jellyfish life histories: role of polyps in forming and maintaining scyphomedusa populations. *Advances in marine biology*, 63, 133-96 .
- McBride, J. L., Haylock, M. R., & Nicholls, N. (2003). *Relationships between the Maritime Continent heat source and the El Niño–Southern Oscillation phenomenon*. *Journal of Climate*, 16(17), 2905–2914. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<2905:RBTMCH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<2905:RBTMCH>2.0.CO;2)
- McPhaden, M. J., Zebiak, S. E., & Glantz, M. H. (2006). *ENSO as an integrating concept in Earth science*. *Science*, 314(5806), 1740–1745. <https://doi.org/10.1126/science.1132588>
- Mills, C. E. (2001). Jellyfish blooms: Are populations increasing globally in response to changing ocean conditions? *Hydrobiologia*, 451(1), 55-68. <https://doi.org/10.1023/A:1011888006302>
- National Geographic Indonesia. (2018). Pertama kalinya, ratusan ubur-ubur muncul di perairan Pantai Ancol. National Geographic Grid. <https://nationalgeographic.grid.id/read/13955940/pertama-kalinya-ratusan-ubur-ubur-muncul-di-perairan-pantai-ancol?page=all>
- Pandia, FS., Sasmito, B., Sukmono, A.. 2019. Analisis

- pengaruh angin monsun terhadap perubahan curah hujan dengan penginderaan jauh (studi kasus: provinsi Jawa Tengah). *Jurnal Geodesi Undip*. 8(1): 278-287.
- Pauly, D., Graham, W., Libralato, S., Morissette, L., & Deng Palomares, M. L. 2009. Jellyfish in ecosystems, online databases, and ecosystem models. *Hydrobiologia*, 616(1), 67–85.
- Philander, S. G. H. (1990). *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. Academic Press.
- Pitt, K. A., & Lucas, C. H. (Eds.). (2014). *Jellyfish Blooms*. Springer Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7015-7>
- Purcell JE. (2005) Climate effects on formation of jellyfish and ctenophore blooms: a review. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*. 85(3):461-476. doi:10.1017/S0025315405011409
- Purcell, J.E., Uye, S., & Lo, W. (2007). Anthropogenic causes of jellyfish blooms and their direct consequences for humans: a review. *Marine Ecology Progress Series*, 350, 153-174.
- Richardson, A.J., Pauly, D., & Gibbons, M.J. (2012). Degraded ecosystems: Keep jellyfish numbers in check. *Nature*, 483, 158-158.
- Russell, F.S., 1970. The Medusae of the British Isles. II. Pelagic scyphozoa with a 655 supplement to the first volume on Hydromedusae, Cambridge University Press, 656 Cambridge.
- Schiariti, A., Kawahara, M., Uye, S., & Mianzan, H. W. (2008). Life cycle of the jellyfish *Lychnorhiza lucerna* (Scyphozoa: Rhizostomeae), *Marine Biology*, 156, 1-12.
- Saji, N. H., Goswami, B. N., Vinayachandran, P. N., & Yamagata, T. (1999). *A dipole mode in the tropical Indian Ocean*. *Nature*, 401(6751), 360–363. <https://doi.org/10.1038/43854>
- Schiariti A, Morandini AC, Jarms G, von Glehn PR, Franke S, Mianzan H (2014) Asexual reproduction strategies and blooming potential in Scyphozoa. *Mar Ecol Prog Ser* 510:241–253. <https://doi.org/10.3354/meps10798>
- Shin, K. H., & Choi, K. H. (2025). The Effects of Salinity on the Growth, Survival, and Feeding of *Sanderia malayensis* (Cnidaria: Scyphozoa) Ephyrae. *Diversity*, 17(4), 239.
- Sun, Q., Zhang, Y., Du, Y., Jiang, X.. 2022. Asymmetric response of sea surface salinity to extreme positive and negative indian ocean dipole in the southern tropical Indian ocean. *JGR Oceans*. 127(11): 1-15. doi: [10.1029/2022JC018986](https://doi.org/10.1029/2022JC018986).
- Taylor KE. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J Geophys Res*. 106(D7):7183–7192.
- Tempo (2018, Juni). Ubur-ubur di Pantai Ancol, LIPI: Sengatannya lemah. Tempo.co. <https://www.tempo.co/arsip/ubur-ubur-di-pantai-ancol-lipi-sengatannya-lemah—805449>
- Tempo.co. (2019). Awas, ledakan populasi ubur-ubur kembali terjadi di Pantai Ancol. Tempo. [<https://www.tempo.co/arsip/awas-ledakan-populasi-ubur-ubur-kembali-terjadi-di-pantai-ancol-699093>]
- Thomson, R. E., & Emery, W. J. (2014). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography* ed. 3, Waltham(US): Elsevier Science. doi:10.1016/C2010-066362-0.
- Webster, P. J., Moore, A. M., Loschnigg, J. P., & Leben, R. R. (1999). *Coupled ocean–atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997–98*. *Nature*, 401, 356–360. <https://doi.org/10.1038/43848>
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (3rd ed., Vol. 100). Amsterdam/Boston: Academic Press.
- Xin-lei, Z., Yong-xu, C., Yan-cui, C., & Yan, Z. (2006). The effect of temperature on strobilation and early stage growth of jellyfish, *Rhopilema esculenta*, *Journal of Shanghai Fisheries University*.
- Zhang Y., Du Y., & Qu T. (2016). A surface salinity dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Climate Dynamics*, 47 (2573-2585).