

Analisis Penjalaran dan Transformasi Pasang Surut dari Pelabuhan Semarang (PS) ke Timbulsloko *Sinking Village* (TSV), Demak

Iwan Pramesti Anwar^{1*}, Ayi Tarya¹, Faruq Khadami¹, Aris Ismanto², Alfita Handayani³, Sandy Herho⁴, Umar Abdurrahman⁵, Ida Bagus Oka Agastya⁶, Retno Argian Pangesti Putri⁶, Nining Sari Ningsih¹

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

Jl. Ganesha 10, Kota Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia

²Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Jacob Rais, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275 Indonesia

³Pusat Studi Agraria, Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesha 10, Kota Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia

⁴Department of Earth and Planetary Sciences, University of California
900 University Ave, Riverside, California 92521, United States

⁵Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Padjajaran
Jl. Raya Bandung Sumedang KM.21, Jawa Barat 40132, Indonesia

⁶U-Inspire Indonesia

Jakarta, Indonesia

Email: *iwanpanwar@itb.ac.id

Abstract

Timbulsloko *Sinking Village* (TSV), Demak, merupakan kawasan pesisir yang mengalami genangan permanen akibat rob dan penurunan muka tanah, sehingga variasi muka air di wilayah ini tidak selalu sama dengan sinyal pasang surut di perairan terbuka. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penjalaran dan transformasi pasang surut dari Stasiun Pasang Surut Pelabuhan Semarang (PS) menuju stasiun muka air TSV. Data yang digunakan mencakup periode 16 Desember 2025 hingga 8 Februari 2026. Analisis dilakukan melalui pemrosesan data raw, penyamaan interval waktu menjadi 15 menit, korelasi silang, analisis harmonik menggunakan S_TIDE, rekonstruksi muka air, serta analisis continuous wavelet transform, cross-wavelet transform, dan wavelet coherence. Hasil menunjukkan bahwa muka air di TSV tertinggal sekitar 0,75 jam atau 45 menit terhadap PS, dengan korelasi maksimum 0,897. Rekonstruksi S_TIDE menjelaskan 87,08% varians muka air di PS dan 79,87% di TSV. Sementara itu, komponen M2 menunjukkan lag 0,81 jam dengan rasio amplitudo TSV/PS sebesar 0,688. Hal tersebut mengindikasikan atenuasi komponen semidiurnal utama. Wavelet coherence memperlihatkan hubungan kuat antara kedua stasiun pada band semidiurnal dan diurnal, dengan mean coherence masing-masing 0,965 dan 0,991. Selain itu, komponen perairan dangkal MO3, M4, dan M8 memiliki amplitudo lebih tinggi di TSV dibanding di PS. Dengan demikian, komponen perairan dangkal menunjukkan adanya indikasi deformasi nonlinier di TSV. Hasil ini menunjukkan bahwa sinyal pasang surut di TSV tidak hanya mengalami keterlambatan, tetapi juga atenuasi dan transformasi harmonik akibat kondisi lokal kawasan sinking village.

Kata kunci : Pasang Surut, Timbulsloko *Sinking Village*, Pelabuhan Semarang, , *wavelet coherence*

Abstract

Analysis of Tidal Propagation and Transformation from PS Port (PS) to TSV (TSV), Demak

Timbulsloko *Sinking Village* (TSV), Demak, is a coastal area experiencing permanent inundation due to tidal flooding and land subsidence; therefore, water-level variations in this area do not always correspond directly to tidal signals in open waters. This study aims to analyze tidal propagation and transformation from the Port of Semarang Tidal Station (PS) to the TSV. The data range from 16 December 2025 to 8 February 2026. Then,

the analysis was conducted through raw data processing into a 15-minute interval, cross-correlation, harmonic analysis using S_TIDE , and water-level reconstruction, as well as continuous wavelet transform, cross-wavelet transform, and wavelet coherence analyses. The results show that the water level at TSV lags PS by approximately 0.75 hours or 45 minutes, with a maximum correlation of 0.897. Then, the S_TIDE reconstruction explains 87.08% of the water-level variance at PS and 79.87% at TSV. Meanwhile, the $M2$ constituent shows a lag of 0.81 hours with a TSV/PS amplitude ratio of 0.688. It indicates attenuation of the principal semidiurnal component. Wavelet coherence reveals a strong relationship between the two stations in the semidiurnal and diurnal bands, with mean coherence values of 0.965 and 0.991, respectively. In addition, the shallow-water constituents $MO3$, $M4$, and $M8$ have higher amplitudes at TSV than at PS. Thus, the shallow-water constituents indicate nonlinear deformation at TSV. These results demonstrate that the tidal signal at TSV is not only delayed but also attenuated and harmonically transformed due to the local conditions of the sinking village.

Keywords: tides, Timbulsloko Sinking Village, Port of Semarang, wavelet coherence

PENDAHULUAN

Wilayah pesisir Semarang – Demak merupakan bagian dari pesisir utara Jawa yang mengalami penurunan muka tanah signifikan. Abidin *et al.* (2013) melaporkan bahwa penurunan muka tanah di Semarang memiliki variasi spasial dan temporal, dengan laju yang dapat mencapai sekitar 14-19 cm/tahun pada beberapa lokasi. Susilo *et al.* (2023) juga menunjukkan bahwa kota-kota pesisir utara Jawa, termasuk Semarang dan Demak, mengalami subsidensi dengan laju yang jauh lebih besar daripada kenaikan muka laut global. Selain itu, variasi musiman dari anomali tinggi muka air di Laut Jawa juga berpengaruh terhadap kondisi rob di utara Jawa (Anwar *et al.*, 2024). Kondisi ini memperkuat pentingnya kajian muka air laut relatif, karena dampak rob di wilayah pesisir tidak hanya ditentukan oleh perubahan laut, tetapi juga oleh turunnya elevasi daratan.

Kecamatan Sayung, Demak, merupakan salah satu wilayah yang terdampak kuat oleh proses tersebut. Khairullah *et al.* (2024) menunjukkan bahwa banjir rob di Kecamatan Sayung berkaitan dengan kenaikan muka air laut dan penurunan muka tanah, dengan estimasi genangan mencapai lebih dari seribu hektar. Secara lokal, wilayah perairan laut Timbulsloko telah dikaji oleh Suci *et al.* (2023) sebagai kawasan bertopografi landai dan berelevasi rendah yang rentan terhadap rob, sehingga informasi pasang surut menjadi penting untuk penentuan elevasi infrastruktur seperti dermaga. Kajian lain di Timbulsloko *Sinking Village* (TSV) juga menunjukkan adanya kerentanan ekosistem mangrove terhadap variabilitas oseanografi dan kenaikan muka laut (Munana *et al.*, 2023). Dengan demikian, TSV dapat dipandang sebagai lokasi representatif untuk memahami respons pasang surut pada kawasan dengan wilayah banjir permanen (*sinking village*).

Sementara itu, perairan Pelabuhan Semarang (PS) telah banyak digunakan sebagai lokasi kajian pasang surut. Puspitasari *et al.* (2022) menganalisis pengaruh gerhana matahari cincin terhadap komponen pasang surut di PS, sementara Tiatama *et al.* (2024) mengkaji keterkaitan fenomena supermoon terhadap komponen pasang surut di lokasi yang sama. Hanun *et al.* (2024) juga menggunakan parameter pasang surut, gelombang, dan kenaikan muka laut untuk kajian elevasi dermaga di Pelabuhan Tanjung Emas. Kajian-kajian tersebut menunjukkan bahwa PS merupakan lokasi penting untuk memahami karakter pasang surut pesisir utara Jawa Tengah. Namun, kajian yang membandingkan langsung penalaran sinyal pasut dari PS sebagai wilayah laut menuju TSV masih terbatas.

Secara oseanografis, penalaran pasang surut dari perairan terbuka menuju perairan dangkal dapat menyebabkan perubahan fase, amplitudo, dan bentuk gelombang. Lukman *et al.* (2025) menekankan pentingnya fase dalam analisis *co-tidal chart* dan perambatan pasang surut, karena fase dapat menunjukkan karakter propagasi gelombang pasut. Pada skala lokal, perubahan fase tersebut dapat muncul sebagai keterlambatan waktu antara stasiun laut dan stasiun pesisir tergenang. Jika PS merepresentasikan stasiun yang lebih terbuka terhadap pengaruh laut, sedangkan TSV berada di kawasan genangan pesisir, maka keterlambatan sinyal di TSV *sinking village* dapat diinterpretasikan sebagai bukti penalaran dan modifikasi pasut oleh kondisi lokal.

Selain keterlambatan fase, transformasi pasang surut di kawasan dangkal juga dapat menghasilkan komponen perairan dangkal. Aubrey dan Speer (1985) serta Friedrichs dan Aubrey (1988) menjelaskan bahwa pasang surut yang menjalar ke sistem dangkal dan friksional dapat mengalami distorsi nonlinier, membangkitkan *overtide* dan *compound tide*, serta menghasilkan asimetri pasang surut. Dalam konteks TSV,

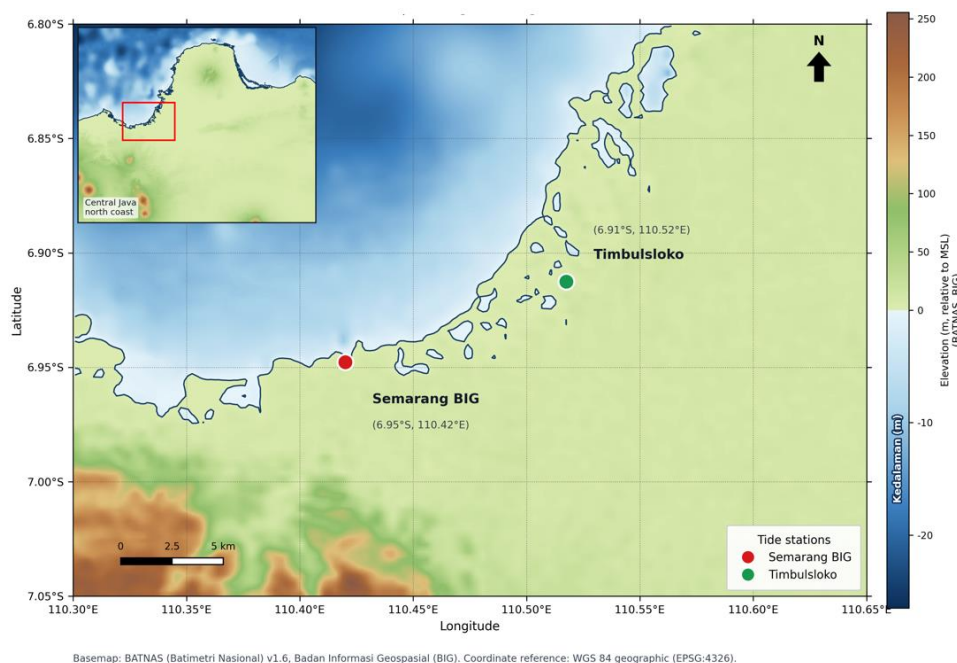
proses ini dapat diperkuat oleh kedalaman yang dangkal, hambatan dasar, konektivitas saluran, dan penyimpanan air di area genangan. Oleh karena itu, analisis komponen perairan dangkal seperti M4, MK3, MO3, 2MS6, dan M8 menjadi penting untuk menjelaskan bahwa sinyal pasut di TSV bukan hanya terlambat, tetapi juga terdeformasi.

Dengan demikian penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penjalaran dan transformasi pasang surut dari stasiun PS (laut terbuka) menuju stasiun TSV. Fokus utama penelitian meliputi keterlambatan fase, perubahan amplitudo, penguatan komponen perairan dangkal, rekonstruksi muka air dengan *S_TIDE* (Pan *et al.*, 2018; Jin *et al.*, 2018), serta koherensi waktu-frekuensi antara kedua stasiun dengan menggunakan *wavelet analyses* yang dikembangkan oleh Grinsted *et al.* (2004). Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman oseanografis mengenai bagaimana sinyal pasang surut laut berubah saat memasuki kawasan pesisir rendah yang mengalami genangan permanen, serta mendukung interpretasi dinamika rob di kawasan *sinking village*.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini dilakukan di wilayah pesisir utara Jawa Tengah, dengan fokus pada dua stasiun pengamatan muka air laut, yaitu Stasiun Pasang Surut Badan Informasi Geospasial (BIG) PS dan stasiun pengamatan muka air di TSV, Demak. Lokasi kedua stasiun ditunjukkan pada Gambar 1. Stasiun BIG PS berada pada koordinat 6.9477° LS dan 110.4200° BT, sedangkan stasiun TSV berada pada koordinat 6.9125° LS dan 110.5175° BT. Gambar 1 memperlihatkan bahwa Stasiun BIG PS berada lebih dekat dengan kawasan perairan laut/pelabuhan, sehingga digunakan sebagai representasi sinyal pasang surut yang lebih terbuka terhadap pengaruh laut. Sebaliknya, stasiun TSV berada di kawasan pesisir rendah yang mengalami genangan rob kronis dan sering disebut sebagai kawasan *sinking village*. Perbedaan karakter lokasi ini penting karena sinyal pasang surut yang teramati di TSV tidak hanya merepresentasikan pasut laut, tetapi juga telah mengalami modifikasi oleh kondisi lokal seperti kedangkalan, friksi dasar, genangan daratan, dan penyimpanan air pada kawasan pesisir rendah.

Secara spasial, kedua stasiun berjarak sekitar 11,45 km. Dengan konfigurasi ini, analisis dilakukan untuk melihat bagaimana sinyal pasang surut dari wilayah PS mengalami penjalaran, keterlambatan fase, perubahan amplitudo, serta deformasi harmonik ketika sampai di kawasan TSV. Peta menunjukkan lokasi Stasiun Pasang Surut BIG PS dan stasiun pengamatan muka air TSV. Basemap menggunakan data BATNAS (Batimetri Nasional).



Gambar 1. Peta daerah kajian dengan menunjukkan lokasi stasiun water level Semarang (-6,95° LS, 110,42° BT) dan Timbulsloko (-6,91° LS, 110,52° BT)

Periode data yang digunakan dalam penelitian ini adalah 16 Desember 2025 sampai 8 Februari 2026. Hal tersebut sejalan dengan periode pengamatan dan ketersediaan data. Seluruh data diolah dalam sistem waktu UTC untuk menjaga konsistensi waktu antarstasiun. Data PS dan TSV memiliki resolusi waktu dan kelengkapan data yang berbeda, pada stasiun PS raw data adalah per menit sedangkan pada stasiun TSV adalah per lima detik. Sehingga dilakukan penyamaan interval waktu sebelum analisis. Dalam tahap analisis harmonik dan wavelet, data disusun pada interval reguler 15 menit.

Pada periode target tersebut, data masukan S_TIDE terdiri dari 5280 waktu per 15-menit. Jumlah data observasi yang tersedia setelah penyamaan waktu adalah 4585 untuk PS dan 3128 untuk TSV. Perbedaan jumlah data ini menunjukkan adanya gap pengamatan, khususnya pada data TSV, sehingga tahap pembersihan dan rekonstruksi menjadi bagian penting dalam analisis.

Preprocessing Data

Tahap pembersihan data dilakukan sebelum analisis harmonik dan wavelet. Pertama, seluruh timestamp dikonversi ke format waktu UTC. Data duplikat pada timestamp yang sama dihapus dengan mempertahankan data terakhir. Selanjutnya, nilai muka air dikonversi ke satuan meter. Pada data TSV, nilai *water_level* dikonversi dari sentimeter ke meter berdasarkan karakteristik nilai median data. Data PS disusun dari komposit sensor radar dari stasiun Badan Informasi Geospasial, sedangkan data TSV menggunakan sensor radar hasil pengamatan lapangan. Setelah itu, data diperiksa untuk melihat kelengkapan temporal, gap waktu, dan nilai yang kosong. Data kemudian diresampling ke interval antara 1 menit menggunakan nilai median untuk mengurangi pengaruh pencilaan dan ketidakaturan interval pengamatan.

Untuk analisis penjaralan pasang surut awal, data 1-menit difilter menggunakan low-pass Butterworth. Selanjutnya, proses *filtering* dilakukan dengan metode *forward-backward filtering* agar tidak menimbulkan pergeseran fase buatan. Setelah proses filtering, data dirata-ratakan menjadi interval per 15 menit. Data 15-menit ini digunakan untuk membandingkan sinyal pasang PS dan TSV, termasuk estimasi keterlambatan menggunakan korelasi silang. Selanjutnya, untuk analisis harmonik S_TIDE (Pan *et al.*, 2018; Jin *et al.*, 2018), data 15-menit digunakan sebagai input utama. Gap pengamatan tidak diisi secara sembarang pada tahap observasi, tetapi dilakukan dalam proses rekonstruksi menggunakan pendekatan harmonik. Dengan demikian, rekonstruksi muka air dapat dihasilkan secara kontinu selama periode penelitian tanpa menghilangkan informasi tentang ketersediaan observasi asli.

Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu analisis harmonik menggunakan S_TIDE dan analisis waktu-frekuensi menggunakan wavelet transform. Selain itu, korelasi silang digunakan sebagai analisis pendahuluan untuk memperkirakan keterlambatan sinyal pasang surut antara PS dan TSV. Selanjutnya, korelasi silang dilakukan pada data low-pass 15-menit untuk mengetahui lag waktu dengan korelasi maksimum antara kedua stasiun. Dalam penelitian ini digunakan konvensi bahwa lag positif menunjukkan TSV tertinggal terhadap PS, sedangkan lag negatif menunjukkan TSV mendahului PS. Konvensi ini juga digunakan dalam interpretasi hasil fase harmonik dan wavelet agar semua hasil memiliki arah interpretasi yang konsisten.

Analisis harmonik dilakukan menggunakan toolbox S_TIDE, yaitu metode analisis pasang surut non-stasioner yang dapat digunakan untuk mengestimasi komponen harmonik dan merekonstruksi muka air pasang. Metode fitting yang digunakan adalah *ordinary least squares*. Komponen pasang yang dianalisis mencakup komponen semidiurnal utama M2, S2, N2, dan K2; komponen diurnal O1, K1, P1, dan Q1; serta komponen perairan dangkal M4, MS4, MN4, MK3, MO3, M6, 2MS6, dan M8.

Dari hasil S_TIDE, diperoleh amplitudo, fase, estimasi kesalahan, *signal-to-noise ratio* (SNR), serta rekonstruksi muka air untuk masing-masing stasiun. Perbandingan fase antara PS dan TSV digunakan untuk menghitung *phase lag* setiap komponen. Perbandingan amplitudo digunakan untuk mengetahui apakah suatu komponen mengalami atenuasi atau penguatan di TSV. Komponen perairan dangkal dianalisis secara khusus karena dapat menunjukkan adanya deformasi nonlinier akibat proses perairan dangkal, friksi, dan penyimpanan air di kawasan tergenang. Selanjutnya, hasil rekonstruksi muka air dari S_TIDE digunakan sebagai input untuk analisis wavelet. Penggunaan data rekonstruksi bertujuan agar analisis waktu-frekuensi dapat dilakukan secara kontinu sepanjang periode 16 Desember 2025 sampai 8 Februari 2026. Analisis wavelet

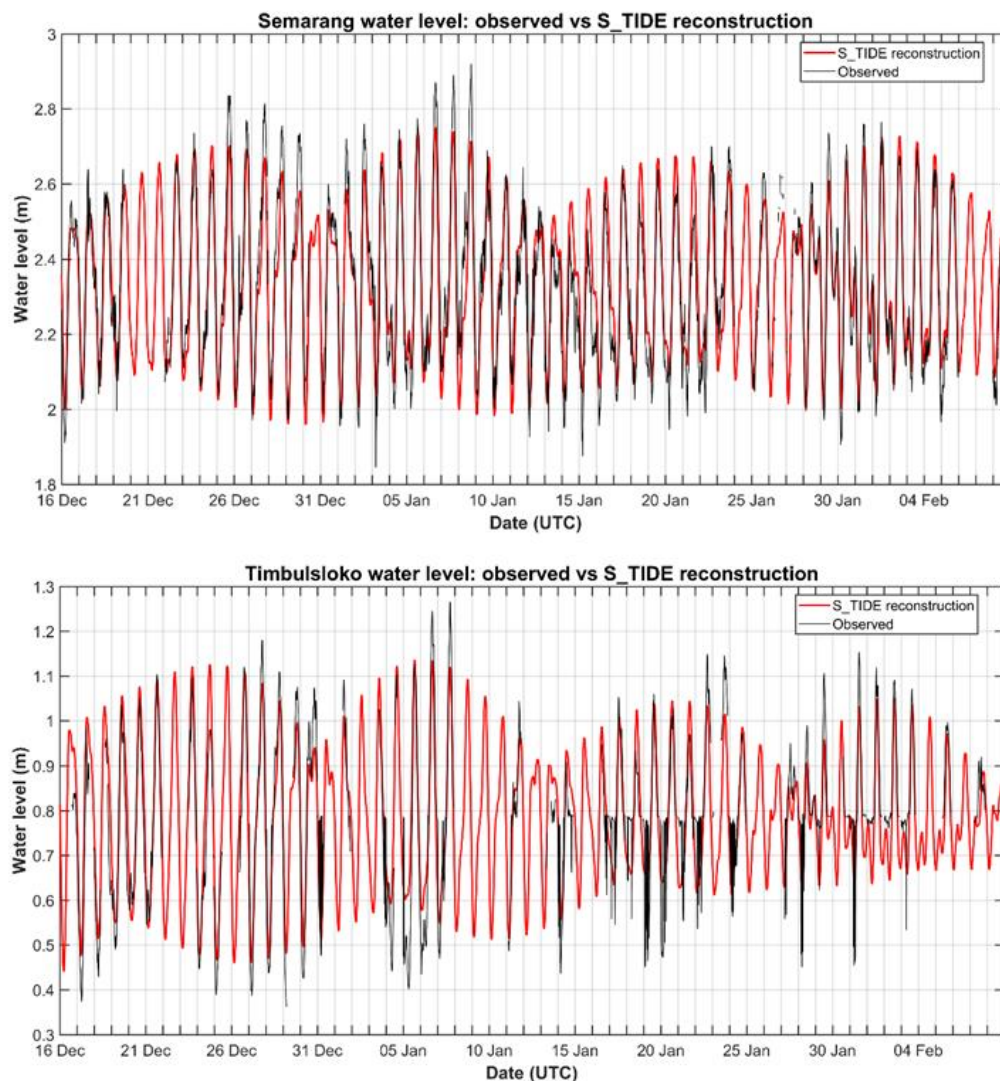
meliputi *continuous wavelet transform* (CWT) untuk masing-masing stasiun, *cross-wavelet transform* (XWT) untuk melihat energi bersama antara PS dan TSV, serta *wavelet coherence* (WTC) untuk mengetahui tingkat koherensi kedua sinyal dalam domain waktu-frekuensi.

Interpretasi wavelet difokuskan pada band semidiurnal 10-14 jam dan band diurnal 20-28 jam. Nilai koherensi yang tinggi pada band tersebut menunjukkan bahwa sinyal muka air di PS dan TSV memiliki keterkaitan kuat pada skala waktu pasut utama. Sementara itu, fase wavelet digunakan untuk mengevaluasi apakah keterlambatan sinyal di TSV konsisten secara temporal selama periode penelitian. Secara umum, rujukan metode utama yang digunakan dalam analisis ini adalah S_TIDE untuk analisis harmonik dan rekonstruksi pasut (Pan *et al.* , 2018; Jin *et al.* , 2018), serta wavelet coherence untuk analisis hubungan waktu-frekuensi antara dua deret waktu geofisika (Grinsted *et al.* , 2004).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Rekonstruksi Muka Air Menggunakan S_TIDE

Hasil rekonstruksi muka air menggunakan S_TIDE menunjukkan bahwa komponen harmonik pasang surut yang dipilih mampu merepresentasikan variabilitas muka air di kedua stasiun dengan cukup baik. Pada Stasiun BIG PS, rekonstruksi S_TIDE mampu menjelaskan 87,08% varians data observasi, sedangkan pada Stasiun TSV nilai varians yang dapat dijelaskan adalah 79,87%. Perbedaan ini menunjukkan bahwa sinyal muka air di PS relatif lebih mudah direpresentasikan oleh komponen harmonik astronomis, sementara sinyal di TSV lebih kompleks karena berada di kawasan pesisir rendah yang tergenang dan dipengaruhi proses lokal.



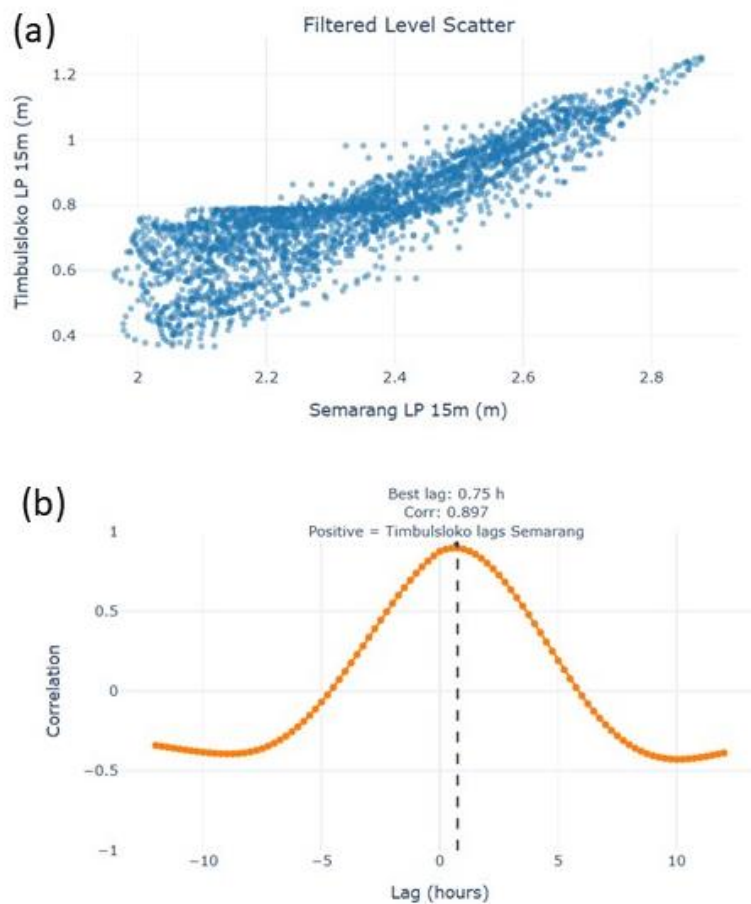
Gambar 2. Tinggi muka air rata-rata per 15 menit di PS dan TSV pada 16 Desember 2025 – 8 Februari 2026

Secara umum, hasil rekonstruksi mengikuti pola pasang surut utama pada kedua stasiun (Gambar 2). Namun, kemampuan rekonstruksi yang lebih rendah di TSV mengindikasikan adanya kontribusi proses non-astronomis atau lokal, seperti friksi dasar, penyimpanan air di area genangan, konektivitas saluran, serta kemungkinan pengaruh kondisi meteorologis lokal. Kondisi ini wajar pada kawasan pesisir dangkal dan tergenang, karena respons muka air tidak hanya dikontrol oleh pasang surut laut terbuka, tetapi juga oleh transformasi hidrodinamika lokal. Pendekatan S_TIDE relevan digunakan dalam kondisi ini karena mampu mengestimasi parameter harmonik dan melakukan rekonstruksi pada data pasang surut yang memiliki variasi temporal dan gap pengamatan (Pan *et al.*, 2018; Jin *et al.*, 2018).

Penjalaran Pasang Surut PS-TSV

Analisis korelasi silang pada sinyal low-pass 15-menit menunjukkan bahwa korelasi maksimum antara muka air PS dan TSV terjadi pada lag 0,75 jam dengan nilai korelasi 0,897. Dalam penelitian ini, lag positif didefinisikan sebagai kondisi ketika TSV tertinggal terhadap PS. Dengan demikian, hasil tersebut menunjukkan bahwa sinyal pasang surut di TSV mengalami keterlambatan sekitar 45 menit dibandingkan sinyal pasang surut di PS (Gambar 3).

Keterlambatan ini konsisten dengan konfigurasi spasial kedua stasiun. Stasiun PS berada pada lokasi yang lebih terbuka terhadap pengaruh laut, sedangkan stasiun TSV berada pada kawasan pesisir rendah yang mengalami genangan kronis. Saat gelombang pasang surut menjalar dari perairan yang lebih terbuka menuju kawasan dangkal dan tergenang, fase gelombang dapat mengalami perlambatan akibat friksi dasar, perubahan geometri aliran, dan penyimpanan air sementara di area genangan. Mekanisme seperti ini umum dijumpai pada sistem pesisir dangkal dan estuari, di mana penjalaran pasut tidak hanya menghasilkan pergeseran fase tetapi juga perubahan bentuk gelombang (Aubrey & Speer, 1985; Friedrichs & Aubrey, 1988).



Gambar 3. Sketer plot tinggi muka air rata-rata per 15 menit di PS dengan di TSV (a), serta lag korelasi antara PS dengan TSV (b) pada periode 16 Desember 2025 – 8 Februari 2026

Komponen Harmonik Utama

Hasil analisis harmonik S_TIDE menunjukkan bahwa komponen diurnal dan semidiurnal tetap menjadi penyusun utama sinyal pasang surut di kedua lokasi. Komponen M2 memiliki amplitudo 0,106 m di PS dan 0,073 m di TSV, dengan rasio amplitudo TSV terhadap PS sebesar 0,688. Nilai ini menunjukkan bahwa amplitudo M2 mengalami atenuasi sekitar 31,2% di TSV. Dari sisi fase, M2 menunjukkan lag 0,81 jam, sehingga komponen semidiurnal utama ini tertinggal di TSV sekitar 49 menit. Nilai SNR minimum M2 sebesar 577,35 menunjukkan bahwa estimasi komponen ini sangat kuat dan dapat dipercaya.

Komponen semidiurnal lain juga menunjukkan pola atenuasi di TSV. Komponen S2 memiliki rasio amplitudo 0,635, N2 sebesar 0,602, dan K2 sebesar 0,622. Secara umum, komponen semidiurnal menunjukkan bahwa energi pasut dari PS mengalami pelemahan ketika sampai di TSV. Pola ini mendukung interpretasi bahwa kawasan TSV berperan sebagai lingkungan pesisir dangkal yang lebih friksional dan lebih dissipatif dibandingkan perairan PS (Gambar 4.).

Pada komponen diurnal, K1 memiliki amplitudo 0,193 m di PS dan 0,173 m di TSV, dengan rasio amplitudo 0,900. Berbeda dengan M2, komponen K1 menunjukkan lag negatif sebesar -1,30 jam, yang berarti K1 di TSV cenderung mendahului PS berdasarkan konvensi fase yang digunakan. Perbedaan perilaku antara M2 dan K1 menunjukkan bahwa respons pasut di TSV tidak seragam untuk semua frekuensi. Hal ini dapat terjadi karena komponen diurnal dan semidiurnal memiliki panjang gelombang, interaksi lokal, dan sensitivitas friksi yang berbeda. Analisis fase pasut memang penting untuk memahami karakter penalaran pasut, karena perubahan fase dapat menggambarkan arah dan sifat propagasi gelombang pasang surut (Lukman *et al.*, 2025).

Komponen Perairan Dangkal dan Deformasi Nonlinier

Komponen perairan dangkal dianalisis untuk mengidentifikasi adanya transformasi nonlinier pada sinyal pasang surut. Hasil S_TIDE menunjukkan bahwa MK3 merupakan komponen perairan dangkal paling kuat berdasarkan SNR, dengan nilai SNR minimum 21,64 dan lag 3,28 jam. Amplitudo MK3 adalah 0,0154 m di PS dan 0,0140 m di TSV, sehingga pada periode analisis ini MK3 sedikit lebih kecil di TSV. Meskipun demikian, nilai SNR yang tinggi menunjukkan bahwa MK3 merupakan komponen nonlinear yang paling stabil dan paling dapat dipercaya dalam dataset ini.

Beberapa komponen perairan dangkal lainnya menunjukkan amplitudo yang lebih tinggi di TSV dibandingkan PS, yaitu MO3, M4, dan M8. Komponen MO3 meningkat dari 0,00464 m di PS menjadi 0,00534 m di TSV, dengan rasio amplitudo 1,153. Komponen M4 meningkat tipis dari 0,00458 m menjadi 0,00465 m, sedangkan M8 meningkat dari 0,00184 m menjadi 0,00196 m. Peningkatan komponen-komponen ini dapat diinterpretasikan sebagai indikasi adanya deformasi bentuk gelombang pasut di TSV. Namun, karena SNR MO3, M4, dan M8 relatif rendah, interpretasi terhadap komponen ini sebaiknya diposisikan sebagai indikasi tambahan, bukan bukti utama.

Secara fisik, munculnya dan menguatnya komponen perairan dangkal berkaitan dengan transfer energi dari komponen pasut utama menuju harmonik orde lebih tinggi akibat proses nonlinier. Pada perairan dangkal, friksi dasar, perubahan kedalaman, geometri aliran, dan penyimpanan air dapat mengubah bentuk gelombang pasut menjadi tidak sinusoidal. Proses tersebut dapat membangkitkan overtide dan compound tide, serta menghasilkan asimetri antara fase pasang dan surut (Aubrey & Speer, 1985; Friedrichs & Aubrey, 1988). Dalam konteks TSV, mekanisme ini sangat relevan karena stasiun berada pada kawasan sinking village yang tergenang, sehingga muka air yang tercatat merupakan hasil gabungan antara sinyal pasut laut dan respons lokal kawasan genangan.

Analisis Wavelet pada Hasil Rekonstruksi

Analisis continuous wavelet transform (CWT) terhadap hasil rekonstruksi S_TIDE menunjukkan bahwa energi dominan pada kedua stasiun berada pada pita diurnal dan semidiurnal. Pada PS, puncak energi semidiurnal berada pada periode 12,38 jam, sedangkan puncak energi diurnal berada pada periode 23,38 jam. Pola yang sama juga terlihat di TSV, dengan puncak semidiurnal pada 12,38 jam dan puncak diurnal pada 23,38 jam. Kesamaan periode dominan ini menunjukkan bahwa kedua stasiun dikontrol oleh sistem pasang surut yang sama, meskipun respons lokal di TSV mengalami modifikasi (Gambar 5.).

Hasil cross-wavelet transform (XWT) dan wavelet coherence (WTC) memperlihatkan hubungan yang sangat kuat antara PS dan TSV. Pada pita semidiurnal 10-14 jam, nilai mean WTC mencapai 0,965, dengan

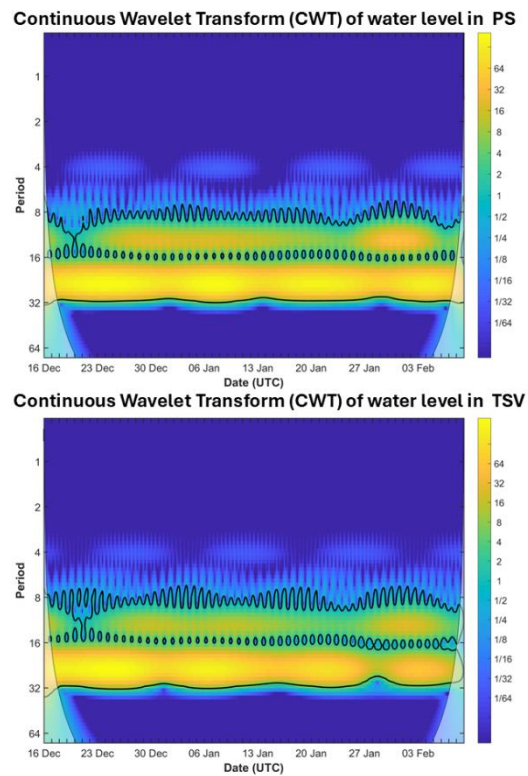
mean phase lag 0,759 jam. Nilai ini sangat dekat dengan hasil korelasi silang (0,75 jam) dan lag M2 dari S_TIDE (0,81 jam). Pada pita diurnal 20-28 jam, mean WTC bahkan lebih tinggi, yaitu 0,991, dengan mean phase lag 0,724 jam (Gambar 6.).

Koherensi yang tinggi menunjukkan bahwa hubungan PS-TSV tidak hanya tampak pada korelasi global, tetapi juga konsisten dalam domain waktu-frekuensi. Dengan kata lain, kedua stasiun memiliki keterkaitan kuat pada skala pasut utama sepanjang periode analisis. Wavelet coherence sangat berguna untuk kasus seperti ini karena mampu mengidentifikasi hubungan dua deret waktu yang berubah terhadap waktu dan frekuensi, termasuk perbedaan fase antarseri (Grinsted *et al.*, 2004).

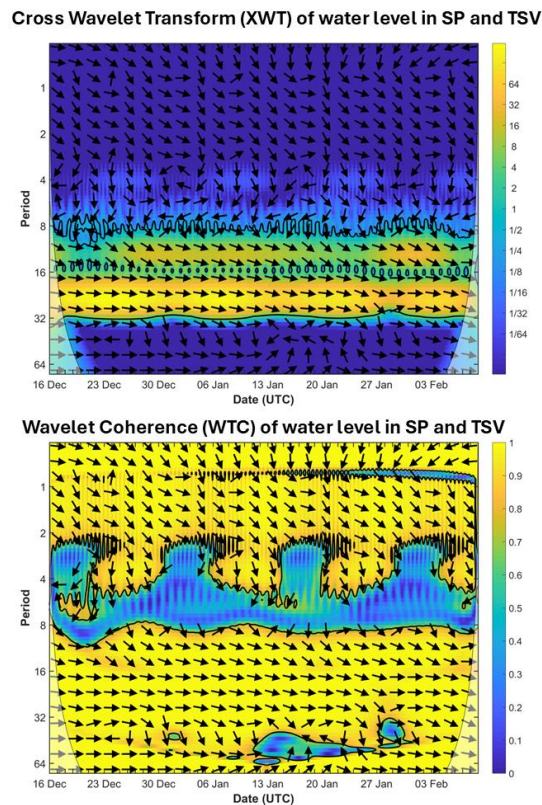


Phase-lag convention: positive values indicate Timbulsloko Sinking Village (TSV) lags Pelabuhan Semarang (PS).

Gambar 4. Hasil Analisis Harmonik Dengan S_Tide Untuk Komponen Utama Dan Komponen Perairan Dangkal Di PS Dan Di TVS Selama Periode 16 Desember 2025 – 8 Februari 2026



Gambar 5. CWT dari tinggi muka air hasil rekonsturksi di PS dan di TSV selama periode 16 Desember 2025 sampai 8 Februari 2026



Gambar 6. XWT dan WTC dari tinggi muka air di PS dengan di TSV periode 16 Desember 2025 sampai 8 Februari 2026

Sintesis Hasil

Secara keseluruhan, tiga pendekatan analisis memberikan hasil yang konsisten mengenai keterlambatan sinyal pasang surut di TSV. Korelasi silang menunjukkan lag 0,75 jam, komponen M2 dari S TIDE menunjukkan lag 0,81 jam, dan WTC pada pita semidiurnal menunjukkan lag 0,759 jam. Konsistensi ini menunjukkan bahwa keterlambatan sekitar 45-50 menit bukan merupakan artefak dari satu metode, tetapi merupakan karakter fisik dari penjalaran pasang surut dari PS menuju TSV. Selain mengalami keterlambatan, sinyal pasut di TSV juga mengalami perubahan amplitudo dan deformasi harmonik. Komponen semidiurnal utama, terutama M2, mengalami atenuasi yang cukup jelas. Di sisi lain, beberapa komponen perairan dangkal menunjukkan indikasi penguatan di TSV, meskipun sebagian memiliki SNR rendah. Kombinasi antara lag fase, atenuasi amplitudo, dan kemunculan komponen perairan dangkal menunjukkan bahwa TSV tidak hanya menerima sinyal pasut dari laut secara pasif. Sinyal tersebut telah dimodifikasi oleh kondisi lokal kawasan pesisir rendah, terutama kedangkalan, friksi, dan penyimpanan air pada area genangan.

Temuan ini sejalan dengan kondisi TSV sebagai kawasan pesisir yang rentan terhadap rob dan penurunan muka tanah. Kajian sebelumnya menunjukkan bahwa Sayung dan TSV merupakan wilayah yang dipengaruhi oleh banjir rob, elevasi rendah, serta perubahan lingkungan pesisir (Suci *et al.*, 2023; Khairullah *et al.*, 2024; Munana *et al.*, 2023). Oleh karena itu, pemahaman terhadap penjalaran dan transformasi pasang surut penting tidak hanya untuk analisis oseanografi, tetapi juga untuk memahami waktu kedatangan muka air tinggi, durasi genangan, dan potensi risiko rob pada kawasan *sinking village*.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa sinyal pasang surut dari Stasiun BIG PS (perairan terbuka) mengalami keterlambatan, atenuasi amplitudo, dan deformasi harmonik ketika menjalar menuju kawasan TSV (perairan tertutup). Hasil korelasi silang pada sinyal low-pass 15-menit menunjukkan bahwa muka air di TSV tertinggal sekitar 0,75 jam atau 45 menit terhadap PS, dengan nilai korelasi tinggi sebesar 0,897. Hasil ini konsisten dengan analisis harmonik S TIDE pada komponen M2, yang menunjukkan lag 0,81 jam, serta analisis wavelet coherence pada band semidiurnal yang menunjukkan lag 0,759 jam. Rekonstruksi muka air menggunakan S TIDE mampu menjelaskan 87,08% varians observasi di PS dan 79,87% di TSV. Nilai rekonstruksi yang lebih rendah di TSV mengindikasikan bahwa sinyal muka air di kawasan *sinking village* lebih kompleks dan dipengaruhi proses lokal selain pasang surut astronomis. Komponen M2 mengalami atenuasi dengan rasio amplitudo TSV/PS sebesar 0,688, yang menunjukkan pelemahan energi semidiurnal saat sinyal pasut menjalar ke kawasan *sinking village*. Komponen perairan dangkal menunjukkan adanya indikasi transformasi nonlinier di TSV. MK3 menjadi komponen shallow-water paling kuat berdasarkan SNR, sedangkan MO3, M4, dan M8 menunjukkan amplitudo yang lebih tinggi di TSV daripada PS, meskipun dengan tingkat kepercayaan (SNR) yang lebih rendah dari MK3. Hal ini mengindikasikan bahwa kawasan TSV tidak hanya menerima pasut dari laut secara pasif, tetapi juga memodifikasi bentuk gelombang akibat pendangkalan, friksi, dan penyimpanan air di area *sinking village*. Secara keseluruhan, hasil penelitian menegaskan bahwa TSV memiliki respons pasang surut yang tertunda/terlambat dan terdeformasi dibandingkan perairan terbuka (PS). Temuan ini penting untuk memahami dinamika banjir rob di kawasan *sinking village*, terutama terkait waktu kedatangan muka air tinggi, durasi genangan, dan karakter transformasi pasut lokal. Pendekatan gabungan S TIDE dan wavelet coherence terbukti efektif untuk mengidentifikasi hubungan fase, amplitudo, dan koherensi waktu-frekuensi antara stasiun laut dan stasiun pesisir tergenang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan (FITB), Institut Teknologi Bandung, atas pendanaan penelitian program PPMI FITB 2026 (Skema Penelitian Nomor 2235/IT1.B07.1/TA.00/2026). Kami juga menyampaikan apresiasi yang tulus kepada para penelaah anonim atas komentar konstruktif dan saran berharga mereka, yang sangat meningkatkan kualitas naskah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., Sidiq, T. P., & Fukuda, Y. 2013. Land Subsidence in Coastal City of Semarang (Indonesia): Characteristics, Impacts and Causes. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 4(3): 226–240.
- Adnan, B., Arhatin, R. E., Lumban-Gaol, J., & Susilo, S. B. 2025. Spatial Distribution of Tidal Flooding in the Coastal Areas of Demak Regency, Central Java. *BIO Web of Conferences: The 2nd International Seminar on Ocean Sciences and Sustainability (ISOSS 2024)*, 168: 05012.

- Anwar, I. P., Setiawan, A., Herho, S. H. S., Atmojo, A. T., & Khadami, F. 2024. Analisis Parameter Laut Atmosfer terhadap Anomali Tinggi Muka Air di Laut Jawa. *Indonesian Journal of Oceanography*, 6(4): 306–315.
- Aubrey, D. G., & Speer, P. E. 1985. A Study of Non-Linear Tidal Propagation in Shallow Inlet/Estuarine Systems Part I: Observations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21(2): 185–205.
- Bott, L. M., Schöne, T., Illigner, J., Haghighi, M. H., Gisevius, K., & Braun, B. 2021. Land Subsidence in Jakarta and Semarang Bay: The Relationship between Physical Processes, Risk Perception, and Household Adaptation. *Ocean & Coastal Management*, 211: 105775.
- Friedrichs, C. T., & Aubrey, D. G. 1988. Non-Linear Tidal Distortion in Shallow Well-Mixed Estuaries: A Synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 27(5): 521–545.
- Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. 2004. Application of the Cross Wavelet Transform and Wavelet Coherence to Geophysical Time Series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11: 561–566.
- Hanun, A. S., Ismunarti, D. H., & Helmi, M. 2024. Kajian Elevasi Lantai Dermaga Berdasarkan Integrasi Pengaruh Pasang Surut, Gelombang dan Kenaikan Muka Laut di Pelabuhan Tanjung Emas Kota Semarang. *Indonesian Journal of Oceanography*, 6(4): 368–374.
- Jin, G., Pan, H., Zhang, Q., Lv, X., Zhao, W., & Gao, Y. 2018. Determination of Harmonic Parameters with Temporal Variations: An Enhanced Harmonic Analysis Algorithm and Application to Internal Tidal Currents in the South China Sea. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 35(7): 1375–1398.
- Khairullah, K. K., Rifai, A., & Indrayanti, E. 2024. Studi Luasan Genangan Banjir Rob akibat Kenaikan Muka Air Laut dan Penurunan Muka Tanah di Kecamatan Sayung, Demak. *Indonesian Journal of Oceanography*, 6(4): 316–323.
- Lukman, A. A., Sugianto, D. N., Pranowo, W. S., Wirasatriya, A., & Hariyadi, H. 2025. Analisis Co-Tidal Chart dan Perambatan Pasang Surut di Perairan Indonesia Bagian Barat. *Indonesian Journal of Oceanography*, 7(2): 157–171.
- Munana, N., Pribadi, R., & Suryono, C. A. 2023. Vulnerability Assessment of Mangroves Using the Coastal Vulnerability Index in Timbulsloko Village, Sayung, Demak. *Jurnal Kelautan Tropis*, 26(3): 565–570.
- Nirwansyah, A. W., & Braun, B. 2019. Mapping Impact of Tidal Flooding on Solar Salt Farming in Northern Java Using a Hydrodynamic Model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(10): 451.
- Pan, H., Lv, X., Wang, Y., Matte, P., Chen, H., & Jin, G. 2018. Exploration of Tidal-Fluvial Interaction in the Columbia River Estuary Using S_TIDE. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(9): 6598–6619.
- Puspitasari, S. A., Atmodjo, W., Pranowo, W. S., Indrayanti, E., & Handoyo, G. 2022. Pengaruh Gerhana Matahari Cincin 26 Desember 2019 terhadap Pasang Surut, Studi Kasus: Semarang, Jawa Tengah. *Indonesian Journal of Oceanography*, 4(1): 1–11.
- Suci, D. R., Atmodjo, W., & Setiyono, H. 2023. Analisis Pasang Surut dalam Rangka Penentuan Tinggi Dermaga di Timbulsoko, Demak, Jawa Tengah. *Indonesian Journal of Oceanography*, 5(3): 131–137.
- Susilo, S., Salman, R., Hermawan, W., Widyaningrum, R., Wibowo, S. T., Lumban-Gaol, Y. A., Meilano, I., & Yun, S. H. 2023. GNSS Land Subsidence Observations along the Northern Coastline of Java, Indonesia. *Scientific Data*, 10: 421.
- Tiatama, S. H., Atmodjo, W., & Widiaratih, R. 2024. Analisis Keterkaitan Fenomena Supermoon terhadap Komponen Pasang Surut di Perairan Semarang, Jawa Tengah. *Indonesian Journal of Oceanography*, 6(2): 114–120.