Indonesian Journal of Oceanography
November 2026, Vol 8 No 4: 446 - 458
ISSN: 2714-8726

Konstanta Harmonik dan Tipe Pasang Surut Hanimaadhoo Saat Gerhana Bulan Total

Jaenudin[1*], Widodo Setiyo Pranowo[1,2], Yulianto[1], Nugraha Wigasmara[1], Panji Mahadirka[1], Thomas Djamaluddin[2]

[1]Program Studi Hidro-Oseanografi, Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut (STTAL)
Jl. Ganesha No.1, Kelapa Gading Barat, Jakarta Utara, DKI Jakarta 14240 Indonesia
[2]Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), DKI Jakarta, Indonesia
Email: *maha.praboe@gmail.com

Abstrak

Gerhana bulan total 7 September 2025 kerap dikaitkan masyarakat dengan pasang surut yang tidak lazim, namun dugaan tersebut jarang diuji secara kuantitatif. Penelitian ini bertujuan menetapkan konstanta harmonik, tipe pasang surut, dan elevasi muka air rencana di perairan Pulau Hanimaadhoo, Maladewa, serta menguji apakah gerhana disertai perubahan konstanta harmonik yang terukur. Data berupa rekaman *tide gauge* radar berinterval satu menit selama 48 hari (1 Agustus–17 September 2025) yang dianalisis dengan metode harmonik kuadrat terkecil. Kontribusi metodologis utama penelitian ini adalah eksperimen kendali sintetis (*synthetic control*), yaitu pengulangan seluruh analisis atas deret prediksi yang menurut konstruksinya tidak memuat pengaruh gerhana, dilengkapi analisis jendela bergerak dan analisis residu. Tipe pasang surut adalah campuran condong ke harian ganda (F = 0,83) dengan konstituen dominan M2 (22,8 cm), K1 (18,3 cm), dan S2 (10,2 cm). Kenaikan amplitudo 1,2–3,5 cm antara jendela sebelum dan saat gerhana 90–99 % tereproduksi oleh deret kendali sintetis, sehingga merupakan artefak konstituen yang belum terpisahkan. Anomali tersisa maksimum 0,40 cm, di bawah batas deteksi 0,72 cm, dan residu selama gerhana tidak menyimpang dari kondisi normal (p = 0,938). Gerhana bulan tidak mengubah konstanta harmonik secara terdeteksi; pendekatan kendali sintetis direkomendasikan bagi kajian atribusi peristiwa astronomis sejenis.

Kata kunci: Konstanta Harmonik, Gerhana Bulan Total, Kendali Sintetis, Bilangan *FormZahl*, Hanimaadhoo

Abstract

Tidal Harmonic Constants and Type at Hanimaadhoo During a Total Lunar Eclipse

The total lunar eclipse of 7 September 2025 is often associated with unusual tides, yet this belief is rarely tested quantitatively. This study determines the tidal harmonic constants, tidal type and design water levels at Hanimaadhoo Island, Maldives, and to test whether the eclipse was accompanied by a measurable change in those constants. One-minute radar tide-gauge records spanning 48 days (1 August–17 September 2025) were analysed by least-squares harmonic analysis. The main methodological contribution is a synthetic control experiment, in which the entire analysis is repeated on a predicted series that by construction contains no eclipse effect, supported by moving-window and residual analyses. The tide is mixed, mainly semidiurnal (F = 0.83), dominated by M2 (22.8 cm), K1 (18.3 cm) and S2 (10.2 cm). The apparent 1.2–3.5 cm amplitude increase between the pre-eclipse and eclipse windows was 90–99 % reproduced by the synthetic control, identifying it as an artefact of unresolved constituents. The largest remaining anomaly is 0.40 cm, below the 0.72 cm detection limit, and residuals during the eclipse were not anomalous (p = 0.938). The lunar eclipse did not detectably alter the tidal harmonic constants; the synthetic control approach is recommended for similar attribution studies.

Keywords: *Harmonic Constants, Total Lunar Eclipse, Synthetic Control, FormZahl Number, Hanimaadhoo*

PENDAHULUAN

Pasang surut merupakan fenomena oseanografi yang dibangkitkan oleh gaya tarik gravitasi benda langit, terutama bulan dan matahari, terhadap massa air laut (Poerbandono & Djunarsjah, 2005; Pugh & Woodworth, 2014). Karena potensial pembangkitnya merupakan fungsi deterministik dari kedudukan relatif bumi, bulan, dan matahari, potensial tersebut dapat diuraikan menjadi sehimpunan gelombang harmonik berfrekuensi tetap yang disebut konstituen pasang surut (Doodson, 1921). Amplitudo dan fasa setiap konstituen, yang secara bersama disebut konstanta harmonik, merupakan besaran pokok bagi peramalan pasang surut, penetapan muka surutan peta, perencanaan bangunan pantai, serta operasi hidrografi dan navigasi (Ongkosongo & Suyarso,

https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/ijoce
DOI: 10.14710/ijoce.v8i4.34596
Diterima/Received: 16-09-2026
Disetujui/Accepted: 03-11-2026

 ISSN: 2714-8726

1989; Triatmodjo, 1999). Konstanta ini pada dasarnya stabil, tetapi dapat berubah secara perlahan akibat proses non-astronomis seperti perubahan batimetri dan muka laut (Haigh *et al.*, 2020), sehingga setiap klaim perubahan konstanta harus diuji terhadap ragam alamiah dan keterbatasan metode analisisnya.

Gerhana bulan total terjadi ketika bulan sepenuhnya memasuki bayangan inti (umbra) bumi. Pada fase totalitas, permukaan bulan tampak merah tembaga karena cahaya matahari yang dibiaskan oleh atmosfer bumi hanya meneruskan komponen berpanjang gelombang merah, sehingga fenomena ini populer disebut *blood moon*. Peristiwa tersebut kerap dipersepsikan masyarakat sebagai penyebab pasang surut yang tidak lazim, bahkan sebagai pertanda banjir rob. Persepsi tersebut menuntut pembuktian kuantitatif, dan sejumlah penelitian terdahulu telah berupaya mengujinya.

Tanggapan muka air laut terhadap fenomena astronomis ekstrem telah ditelaah pada beberapa perairan Indonesia. Radjawane *et al.* (2016) menganalisis gerhana matahari total 9 Maret 2016 memakai rekaman pasang surut berinterval satu menit di Pulau Bangka, yang dilintasi jalur totalitas, dan Pulau Belitung sebagai pembanding; elevasi teramati di Bangka lebih tinggi daripada prediksi sembilan konstituen dan fasanya tampak bergeser, sedangkan di Belitung pola pasang surut tidak berubah. Puspitasari *et al.* (2022) membandingkan konstanta harmonik perairan Semarang antara selang sebelum dan selang yang memuat gerhana matahari cincin 26 Desember 2019 dengan metode Admiralty dan kuadrat terkecil, serta melaporkan perubahan pada sejumlah konstituen dan pada bilangan *FormZahl*. Harito *et al.* (2022) menghitung muka surutan peta perairan Kalabahi dari rekaman pada saat *supermoon* dan memperlihatkan bahwa pemilihan selang waktu pengamatan mengubah elevasi muka air rencana yang dihasilkan. Supriyono *et al.* (2022) menunjukkan bahwa pilihan metode analisis itu sendiri, Admiralty atau kuadrat terkecil, sudah menghasilkan konstanta yang berbeda di perairan Tarakan dan Balikpapan.

Keempat kajian tersebut bertumpu pada perbandingan langsung antara selang waktu sebelum dan selang waktu peristiwa, tanpa kendali yang memisahkan pengaruh peristiwa dari dua sumber perbedaan lain. Sumber pertama adalah kondisi meteorologi: tekanan udara melalui tanggapan barometer terbalik, tegangan angin, serta gelombang panjang pesisir menimbulkan residu non-pasut berorde sentimeter hingga desimeter yang tidak terwakili oleh model harmonik (Pugh & Woodworth, 2014), sedangkan perubahan batimetri dan muka laut rerata menggeser konstanta secara perlahan pada skala dasawarsa (Haigh *et al.*, 2020). Sumber kedua adalah artefak metodologis: jendela analisis yang pendek tidak memenuhi kriteria Rayleigh sehingga pasangan K1–P1 dan S2–K2 saling bocor dan amplitudo terhitung berayun mengikuti fase denyut pasangan tersebut (Godin, 1972; Pawlowicz *et al.*, 2002; Ray, 2017), sementara galat baku yang mengandaikan derau putih meremehkan ketidakpastian sebenarnya (Innocenti *et al.*, 2022). Akibatnya, selisih amplitudo beberapa sentimeter antara dua jendela dapat muncul sepenuhnya tanpa sebab fisis, dan tanpa kendali selisih semacam itu mudah disalahartikan sebagai pengaruh peristiwa astronomis.

Dari sudut pandang fisika, gerhana bulan tidak dapat mengubah gaya pembangkit pasang surut karena bayangan bumi tidak bermassa. Gerhana bulan justru hanya terjadi pada fase purnama ketika bulan dekat simpul orbitnya, sehingga selalu bersamaan dengan konfigurasi *syzygy* yang secara rutin menghasilkan pasang purnama (*spring tide*) dan telah terwakili oleh konstituen M2 dan S2 (Pugh & Woodworth, 2014). Oleh karena itu, pertanyaan penelitian adalah seberapa kecil batas atas pengaruh gerhana yang masih dapat dideteksi, dan apakah perubahan konstanta yang tampak antarjendela analisis bersifat fisis atau artefak metodologis.

Celah penelitian dengan demikian terletak pada ketiadaan rancangan uji atribusi. Penelitian terdahulu belum menyediakan pembanding tanpa-gerhana yang dibangun pada stempel waktu, panjang rekaman, dan pola celah data yang persis sama dengan pengamatan, sehingga belum dapat dipastikan apakah perubahan yang dilaporkan bersifat fisis; selain itu belum tersedia batas atas kuantitatif bagi besar pengaruh gerhana yang masih mungkin luput terdeteksi. Solusi yang ditawarkan penelitian ini adalah eksperimen kendali sintetis (*synthetic control*), yaitu pembangkitan deret muka laut tiruan dari konstanta rujukan pada stempel waktu yang identik dengan pengamatan sehingga menurut konstruksinya bebas pengaruh gerhana, lalu pembandingan perubahan antarjendela pada data pengamatan terhadap perubahan pada deret kendali tersebut (Abadie, 2021). Dengan rancangan ini artefak kebocoran konstituen dapat dikurangkan secara eksplisit, dan sisa anomali diuji terhadap galat baku derau berwarna sehingga yang dihasilkan adalah batas atas pengaruh gerhana yang terukur, bukan sekadar pernyataan ada atau tidak ada perbedaan.

Pasang surut merupakan gelombang panjang dengan periode beberapa jam hingga harian, sehingga data berinterval satu jam telah memadai untuk analisis harmonik (Kantha & Clayson, 2000; Pugh & Woodworth, 2014). Data berinterval satu menit yang kini tersedia secara global (Woodworth *et al.*, 2016; Zemunik *et al.*,

 ISSN: 2714-8726

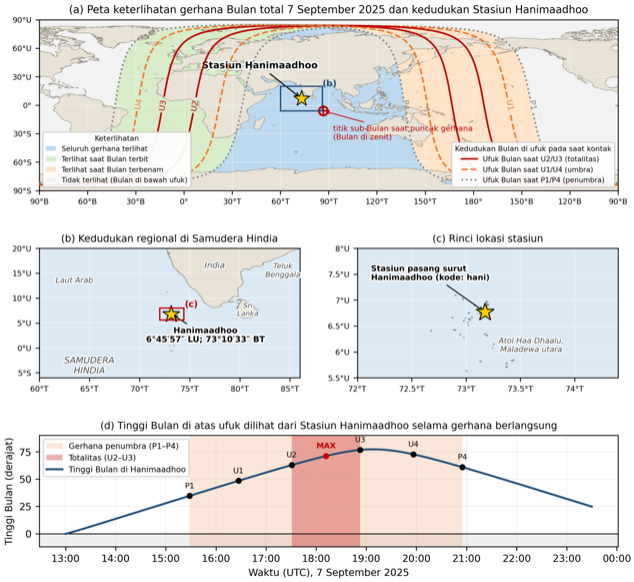
2021) dalam penelitian ini tidak dimaksudkan untuk mempertajam taksiran konstanta, melainkan untuk menelaah residu pada skala fase gerhana, yang totalitasnya hanya berlangsung 82 menit, serta untuk kendali mutu data. Stasiun Hanimaadhoo, Maladewa, dipilih karena tiga alasan. Pertama, stasiun ini hanya sekitar 17° dari titik sub-bulan pada puncak gerhana sehingga seluruh rangkaian gerhana teramati dengan bulan tinggi di atas ufuk. Kedua, stasiun terletak di atol samudera tanpa masukan sungai dan dengan paparan sempit, sehingga muka laut didominasi pasang surut astronomis dan sinyal kecil tidak tertutupi proses pesisir yang kompleks. Ketiga, stasiun jaringan GLOSS ini dilengkapi dua sensor radar independen yang memungkinkan kendali mutu silang.

Tujuan penelitian ini adalah: (1) menetapkan konstanta harmonik dan tipe pasang surut di perairan Pulau Hanimaadhoo berdasarkan bilangan *FormZahl*; (2) menghitung elevasi muka air rencana dari konstanta tersebut; (3) membandingkan amplitudo dan fasa konstituen utama antara selang waktu sebelum dan selang yang memuat gerhana bulan total 7 September 2025; serta (4) menguji secara statistik, dengan eksperimen kendali, apakah perbedaan yang teramati dapat diatribusikan kepada gerhana. Kebaruan penelitian ini terletak pada tiga hal. Pertama, penerapan kendali sintetis sebagai uji atribusi dalam analisis pasang surut, yang sejauh penelusuran penulis belum pernah digunakan pada kajian pasang surut saat gerhana. Kedua, penetapan batas atas kuantitatif pengaruh gerhana terhadap amplitudo konstituen utama, yang menggantikan pernyataan kualitatif berpengaruh atau tidak berpengaruh. Ketiga, penyediaan kode analisis harmonik terbuka yang telah diverifikasi, sehingga seluruh prosedur dapat diulang pada stasiun dan peristiwa astronomis lain.

MATERI DAN METODE

Lokasi dan Data

Lokasi penelitian adalah perairan Pulau Hanimaadhoo, Atol Haa Dhaalu, Maladewa bagian utara (6°45′57″ LU; 73°10′33″ BT; kode stasiun *hani*). Data sekunder diunduh dari IOC *Sea Level Station Monitoring Facility* (IOC/UNESCO, 2025) berupa elevasi muka laut berinterval satu menit dalam acuan waktu UTC. Sensor yang digunakan adalah dua sensor radar gelombang mikro nirkontak yang mengukur jarak vertikal ke muka air secara independen, yaitu kanal *sea elevation radar* dan *sea elevation radar2*. Waktu kontak gerhana (UTC) adalah P1 15:28:21, U1 16:27:02, U2 17:30:41, puncak 18:11:43, U3 18:52:47, U4 19:56:26, dan P4 20:55:00, dengan magnitudo umbra 1,3638 (Espenak & Meeus, 2009). Bulan berada pada ketinggian 34,6° di atas ufuk stasiun saat kontak P1, 71,1° pada puncak gerhana, dan 60,9° saat kontak P4 (Gambar 1).



Gambar 1. (a) Peta keterlihatan gerhana bulan total 7 September 2025 dan kedudukan Stasiun Hanimaadhoo; kurva P1–P4 menandai tempat bulan tepat di ufuk saat setiap fase kontak gerhana. (b) Kedudukan regional stasiun. (c) Rinci lokasi stasiun. (d) Tinggi bulan di atas ufuk stasiun selama gerhana. Sumber: waktu kontak dari Espenak & Meeus (2009); posisi benda langit dengan PyEphem (Rhodes, 2011); garis pantai dari Karin (2020); koordinat stasiun dari IOC/UNESCO (2025).

 ISSN: 2714-8726

Data tersedia dalam tiga segmen rekaman hasil unduhan berinterval satu menit dari sumber yang sama, yaitu 1 Agustus–1 September 2025, 17 Agustus–17 September 2025, dan 7–8 September 2025. Ketiga segmen tersebut bukan himpunan data analisis yang terpisah, melainkan potongan dari satu rekaman yang sama; pemeriksaan silang memperlihatkan selisih tepat nol pada seluruh 20.462 stempel waktu (*timestamp*) yang bertampalan antara segmen pertama dan kedua serta pada 1.291 stempel waktu yang bertampalan antara segmen kedua dan ketiga. Ketiganya digabungkan menjadi satu deret menerus sepanjang 48 hari (1 Agustus 00:00 hingga 17 September 23:59 UTC), karena panjang rekaman menentukan konstituen yang dapat dipisahkan. Deret gabungan memuat 63.747 data sahih dari 69.120 data (92,23 %).

Kanal *sea elevation radar* digunakan sebagai data utama, sedangkan kanal *sea elevation radar2* digunakan sebagai pembanding untuk kendali mutu. Koefisien korelasi kedua kanal adalah 0,9992 dengan beda rerata tetap sebesar 3,08 cm yang mencerminkan perbedaan titik nol sensor. Beda rerata yang tetap tersebut hanya memengaruhi muka air rerata dan tidak memengaruhi amplitudo maupun fasa konstituen, sehingga pemilihan kanal tidak memengaruhi simpulan penelitian.

Kendali Mutu Data

Pencilan dideteksi dengan filter Hampel, yaitu perbandingan setiap nilai terhadap median bergerak selebar 61 menit (30 menit sebelum dan sesudah setiap data) dengan ambang lima kali simpangan mutlak median terskala. Lebar 61 menit dipilih karena jauh lebih pendek daripada periode konstituen utama terpendek (M2, 12,42 jam), sehingga perubahan elevasi pasang surut di dalam jendela hampir linear dan tidak membiaskan median, tetapi cukup panjang untuk memuat 61 data sebagai dasar taksiran median yang tegar. Sebanyak 83 nilai (0,130 %) ditandai sebagai pencilan. Rekaman memuat 808 celah dengan celah terpanjang 431 menit. Metode kuadrat terkecil dapat mengolah deret dengan interval tidak seragam dan bercelah secara langsung (Godin, 1972; Foreman, 1977; Pawlowicz *et al.*, 2002), sehingga data yang hilang tidak diinterpolasi dan tidak ada nilai buatan yang dimasukkan ke dalam analisis. Keunggulan metode ini dibandingkan metode Admiralty telah ditunjukkan di perairan Indonesia oleh Supriyono *et al.* (2022).

Analisis Harmonik Kuadrat Terkecil

Elevasi muka laut dimodelkan sebagai jumlah muka air rerata dan N gelombang harmonik:

$$\eta(t) = S_0 + \sum_{\mathrm{i}=1}^{N} f_\mathrm{i}\, A_\mathrm{i} \cos[\omega_\mathrm{i}(t - t_0) + V_\mathrm{i} + u_\mathrm{i} - g_\mathrm{i}]$$

dengan $\eta(t)$ elevasi muka laut (m); S_0 muka air laut rerata (m); A_i amplitudo (m) dan g_i fasa Greenwich (°) konstituen ke-i; ω_i frekuensi sudut; V_i argumen astronomis; f_i dan u_i faktor nodal amplitudo dan koreksi nodal fasa; serta t_0 waktu tengah rekaman, tempat seluruh besaran nodal dievaluasi sebagaimana lazim untuk rekaman yang lebih pendek dari satu tahun (Pawlowicz *et al.*, 2002). Frekuensi dan argumen astronomis diturunkan dari bilangan Doodson (*Doodson numbers*; Doodson, 1921), sedangkan f_i dan u_i dihitung dengan formula lengkap Schureman (1958); konstituen perairan dangkal dan majemuk memperoleh koreksi nodal dari komponen penyusunnya (Foreman, 1977). Dengan $\cos[\omega_\mathrm{i}(t - t_0)]$ dan $\sin[\omega_\mathrm{i}(t - t_0)]$ sebagai peubah bebas, persamaan di atas menjadi linear terhadap parameter, sehingga koefisiennya diperoleh dengan penyelesaian kuadrat terkecil baku $\hat{\mathrm{x}} = (\mathrm{X}^\mathrm{T}\mathrm{X})^{-1}\mathrm{X}^\mathrm{T}\mathrm{y}$, dengan X matriks rancangan berukuran $n \times (2N + 1)$ dan y vektor pengamatan.

Dua konstituen berfrekuensi σ_1 dan σ_2 hanya dapat dipisahkan oleh rekaman sepanjang T bila memenuhi kriteria Rayleigh (Godin, 1972; Pawlowicz *et al.*, 2002):

$$|\sigma_1 - \sigma_2| \geq \frac{1}{T}$$

Pemisahan M2 dari S2 memerlukan rekaman 14,77 hari, K1 dari O1 13,66 hari, M2 dari N2 27,55 hari, sedangkan K1 dari P1 dan S2 dari K2 masing-masing 182,6 hari. Konstituen yang tidak terpisahkan tidak dimasukkan ke dalam matriks rancangan, karena akan membuat matriks nyaris singular dan menghasilkan taksiran yang tidak stabil secara numerik. Pasangan K1–P1 dan S2–K2 ditangani dengan inferensi berdasarkan nisbah amplitudo dan beda fasa kesetimbangan, yaitu $A_\mathrm{P1} = 0{,}33093\, A_\mathrm{K1}$ (beda fasa −7,07°) dan $A_\mathrm{K2} = 0{,}27215\, A_\mathrm{S2}$ (beda fasa −22,40°) (Pawlowicz *et al.*, 2002; Ray, 2017).

Galat baku amplitudo ditaksir dengan asumsi derau berwarna (*coloured noise*), yaitu derau yang energinya tidak merata terhadap frekuensi (Pawlowicz *et al.*, 2002; Innocenti *et al.*, 2022). Kerapatan spektral

 ISSN: 2714-8726

residu dihitung dengan periodogram berjendela Hann dan dirata-ratakan pada pita frekuensi di sekitar setiap konstituen, kemudian selang kepercayaan 95 % (SK95) diperoleh dari ragam taksiran amplitudo. Konstituen dinyatakan signifikan bila nisbah sinyal terhadap derau, SNR = $(A/\Delta A)^2$, lebih dari 1. Seluruh analisis dilaksanakan dengan kode Python yang disusun tim penulis (ttide_lsq.py) dan menghasilkan format keluaran setara T_TIDE (Pawlowicz *et al.*, 2002). Hasil kode dibandingkan dengan UTide (Codiga, 2011) atas data Hanimaadhoo; beda amplitudo dan fasa konstituen utama tidak melebihi 0,92 mm dan 0,50° (rincian verifikasi pada Materi Suplementer, Tabel S2). SK95 kode ini rata-rata 1,65 kali lebih lebar daripada UTide, sehingga pengujian bersifat konservatif: suatu perbedaan harus lebih besar untuk dinyatakan signifikan, dan peluang menyimpulkan adanya pengaruh gerhana secara keliru menjadi lebih kecil.

Tipe Pasang Surut dan Elevasi Muka Air Rencana

Tipe pasang surut ditetapkan dengan bilangan *FormZahl* (Courtier, 1938, dalam Defant, 1961):

$$F = \frac{A_{\mathrm{K1}} + A_{\mathrm{O1}}}{A_{\mathrm{M2}} + A_{\mathrm{S2}}}$$

dengan A_{K1} adalah amplitudo konstituen harian tunggal luni-solar, A_{O1} adalah amplitudo konstituen harian tunggal bulan utama, A_{M2} adalah amplitudo konstituen harian ganda bulan utama, dan A_{S2} adalah amplitudo konstituen harian ganda matahari utama. Tipe pasang surut adalah harian ganda bila $0 < F \leq 0{,}25$, campuran condong ke harian ganda bila $0{,}25 < F \leq 1{,}50$, campuran condong ke harian tunggal bila $1{,}50 < F \leq 3{,}00$, dan harian tunggal bila $F > 3{,}00$. Muka surutan (Z_0) dan elevasi muka air rencana dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Ongkosongo & Suyarso, 1989; Poerbandono & Djunarsjah, 2005):

$$Z_0 = A_{\mathrm{M2}} + A_{\mathrm{S2}} + A_{\mathrm{N2}} + A_{\mathrm{K2}} + A_{\mathrm{K1}} + A_{\mathrm{O1}} + A_{\mathrm{P1}} + A_{\mathrm{M4}} + A_{\mathrm{MS4}}$$

$$\mathrm{HHWL} = S_0 + Z_0$$

$$\mathrm{LLWL} = S_0 - Z_0$$

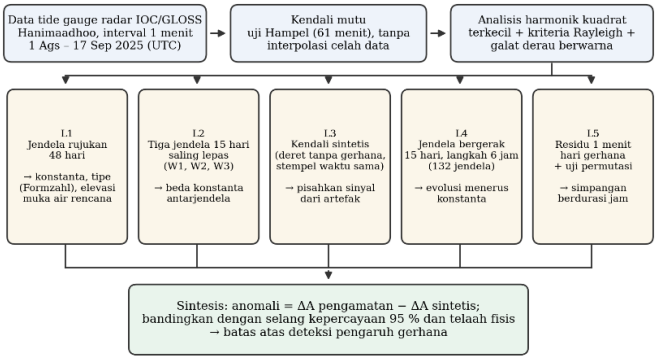
$$\mathrm{MHWL} = S_0 + (A_{\mathrm{M2}} + A_{\mathrm{S2}})$$

$$\mathrm{MLWL} = S_0 - (A_{\mathrm{M2}} + A_{\mathrm{S2}})$$

dengan HHWL muka air tinggi tertinggi, MHWL muka air tinggi rerata, MLWL muka air rendah rerata, dan LLWL muka air rendah terendah. MHWL dan MLWL diukur dari S_0 sehingga urutan $\mathrm{LLWL} \leq \mathrm{MLWL} \leq S_0 \leq \mathrm{MHWL} \leq \mathrm{HHWL}$ selalu terpenuhi.

Rancangan Analisis

Untuk memisahkan kemungkinan sinyal gerhana dari ragam alamiah dan artefak metodologis, analisis disusun dalam lima lapis (Gambar 2). Lapis L1 menggunakan jendela rujukan 48 hari, yaitu seluruh rekaman yang tersedia, karena jendela terpanjang memberikan taksiran konstanta terbaik dan telah memenuhi kriteria Rayleigh untuk pemisahan M2–N2. Lapis L2 menggunakan tiga jendela 15 hari yang saling lepas, yaitu W1 (3–18 Agustus), W2 (18 Agustus–2 September), dan W3 (2–17 September, memuat gerhana pada hari kelima). Panjang 15 hari dipilih sebagai panjang terpendek yang memenuhi kriteria Rayleigh untuk pasangan M2–S2 dan K1–O1, sehingga tiga jendela independen dapat dibentuk dari 48 hari rekaman tanpa tumpang tindih. Sebagai pembanding, dua jendela 30 hari yang memisahkan N2 juga dianalisis, yaitu D30-tanpa (1–31 Agustus) dan D30-gerhana (17 Agustus–17 September). Jendela sesudah gerhana yang berdiri sendiri tidak dapat dibentuk karena rekaman berakhir 10,2 hari setelah gerhana.



Gambar 2. Diagram alir penelitian: lima lapis analisis (L1–L5) dan sintesis hasilnya.

 ISSN: 2714-8726

Lapis L3 adalah eksperimen kendali sintetis yang menjadi tumpuan kesimpulan. Deret sintetis dibangkitkan dari konstanta rujukan 48 hari pada stempel waktu yang persis sama dengan data pengamatan, termasuk seluruh celah data, sehingga menurut konstruksinya tidak memuat pengaruh gerhana. Deret ini berfungsi sebagai pembanding kontrafaktual, sejalan dengan gagasan kendali sintetis dalam kajian atribusi (Abadie, 2021). Prosedur L2 diulang atas deret sintetis, lalu anomali yang berpotensi diatribusikan kepada gerhana dihitung sebagai:

$$\delta A_{\mathrm{i}} = \Delta A_{\mathrm{i}}^{\mathrm{obs}} - \Delta A_{\mathrm{i}}^{\mathrm{sin}}$$

dengan $\Delta A_{\mathrm{i}}^{\mathrm{obs}}$ dan $\Delta A_{\mathrm{i}}^{\mathrm{sin}}$ perubahan amplitudo dari W2 ke W3 pada data pengamatan dan pada deret sintetis. Anomali dinyatakan signifikan bila $|\delta A_{\mathrm{i}}|$ melampaui SK95 gabungannya; perlakuan yang sama diterapkan pada fasa.

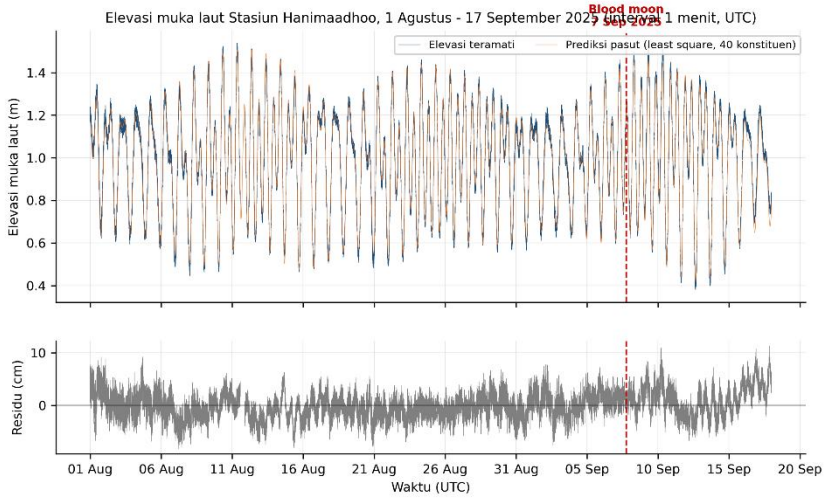
Lapis L4 adalah analisis harmonik jendela bergerak selebar 15 hari dengan langkah 6 jam (132 jendela) atas data pengamatan dan deret sintetis. Tujuannya adalah menelusuri evolusi menerus amplitudo dan fasa M2, S2, K1, dan O1, serta memeriksa apakah kurva pengamatan menyimpang dari kurva kendali tepat ketika jendela mulai memuat tanggal 7 September; lapis ini sekaligus mengimbangi ketiadaan jendela sesudah gerhana. Lapis L5 adalah analisis residu, yaitu selisih elevasi teramati terhadap prediksi dari konstanta rujukan, pada resolusi satu menit untuk hari gerhana. Keluarbiasaan residu selama gerhana diuji dengan uji permutasi: RMS residu dihitung pada seluruh jendela selebar durasi gerhana P1–P4 (5,44 jam) di sepanjang rekaman, lalu kedudukan jendela gerhana ditetapkan terhadap sebaran tersebut. Rentang pasang surut harian (selisih elevasi maksimum dan minimum setiap hari) juga dihitung sebagai pembanding.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil utama penelitian ini adalah tidak terdeteksinya pengaruh gerhana bulan total terhadap konstanta harmonik di perairan Hanimaadhoo. Perubahan amplitudo yang tampak antara jendela sebelum dan saat gerhana hampir seluruhnya tereproduksi oleh kendali sintetis, anomali yang tersisa berada di bawah batas deteksi, dan residu selama gerhana lebih kecil daripada kondisi rata-rata. Uraian berikut menyajikan dasar dari simpulan tersebut.

Karakteristik Rekaman dan Konstanta Harmonik

Elevasi teramati berkisar 0,379–1,538 m terhadap nol palem stasiun dengan rerata 0,9938 m (Gambar 3). Model harmonik menjelaskan 98,94 % ragam data dengan RMS residu 2,48 cm, yang menunjukkan bahwa muka laut di perairan ini didominasi pasang surut astronomis. Analisis atas jendela rujukan menghasilkan 40 konstituen dengan 23 di antaranya signifikan (Tabel 1; daftar lengkap pada Tabel S1). Urutan amplitudo konstituen utama adalah M2 (0,2282 m) > K1 (0,1825 m) > S2 (0,1021 m) > O1 (0,0910 m) > P1 (0,0604 m) > N2 (0,0327 m) > K2 (0,0278 m).

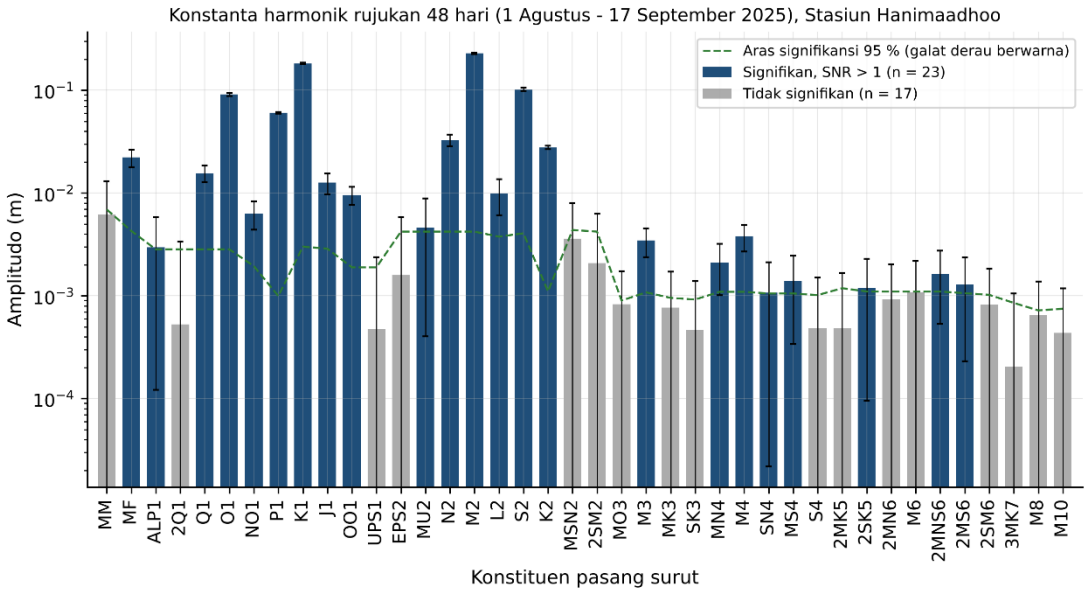


Gambar 3. Elevasi muka laut teramati dan prediksi harmonik di Stasiun Hanimaadhoo, 1 Agustus–17 September 2025 (atas), beserta residunya (bawah). Garis putus merah menandai puncak gerhana bulan total.

 ISSN: 2714-8726

Tabel 1. Konstanta harmonik konstituen utama jendela rujukan 48 hari (1 Agustus–17 September 2025). Seluruh konstituen pada tabel signifikan (SNR > 1). †Diperoleh melalui inferensi.

Konstituen	Period (jam)	A (m)	ΔA (m)	g (°)	Δg (°)	SNR
O1	25,819	0,0910	0,0028	350,77	1,78	$1{,}03 \times 10^3$
P1†	24,066	0,0604	0,0010	331,98	0,95	$3{,}68 \times 10^3$
K1	23,934	0,1825	0,0030	339,05	0,95	$3{,}68 \times 10^3$
N2	12,658	0,0327	0,0042	171,58	7,39	60,1
M2	12,421	0,2282	0,0042	198,14	1,06	$2{,}93 \times 10^3$
S2	12,000	0,1021	0,0041	248,92	2,28	632
K2†	11,967	0,0278	0,0011	226,52	2,28	632
M4	6,210	0,0038	0,0011	80,62	16,48	12,1
MS4	6,103	0,0014	0,0011	174,40	43,36	1,75



Gambar 4. Amplitudo konstituen harmonik jendela rujukan 48 hari. Batang biru: konstituen signifikan; batang kelabu: tidak signifikan; garis putus hijau: aras signifikansi 95 % hasil taksiran derau berwarna.

Gambar 4 memperlihatkan hubungan amplitudo konstituen dengan tingkat derau. Garis putus hijau menyatakan aras signifikansi 95 %, yaitu amplitudo yang setara dengan SK95 hasil taksiran derau pada pita frekuensi masing-masing; konstituen dengan amplitudo di atas garis tersebut dapat dibedakan dari derau (SNR > 1). Aras derau paling tinggi pada pita periode panjang (misalnya MM, SK95 0,69 cm) karena pita ini memuat ragam non-pasang surut seperti pengaruh tekanan udara dan angin, sehingga konstituen periode panjang yang kecil tidak signifikan. Sebaliknya, derau pada pita perairan dangkal (M4, MS4) rendah (sekitar 0,11 cm), sehingga konstituen berorde milimeter pun signifikan. Signifikansi dalam hal ini berarti amplitudo tersebut dapat dipercaya berbeda dari nol, bukan ukuran pentingnya konstituen secara fisis.

Tipe Pasang Surut dan Elevasi Muka Air Rencana

Bilangan *FormZahl* jendela rujukan adalah F = 0,8281, sehingga perairan Hanimaadhoo bertipe campuran condong ke harian ganda (*mixed, mainly semidiurnal*) dengan dua kali pasang dan dua kali surut setiap hari yang tinggi dan selang waktunya tidak sama. Penggolongan ini konsisten pada seluruh jendela, baik yang memuat maupun yang tidak memuat gerhana, dengan F antara 0,8034 dan 0,8761 (Tabel 2; Gambar S1). Elevasi muka air rencana jendela rujukan adalah S_0 = 0,9929 m, Z_0 = 0,7299 m, HHWL = 1,7228 m, MHWL = 1,3232 m, MLWL = 0,6626 m, dan LLWL = 0,2630 m terhadap nol palem stasiun. Selisih HHWL dan LLWL sebesar 1,460 m merupakan rentang maksimum teoretis, sedangkan rentang harian teramati terbesar adalah 1,059 m pada 10 Agustus 2025.

 ISSN: 2714-8726

Tabel 2. Amplitudo konstituen utama, bilangan *FormZahl*, dan elevasi muka air rencana (m, terhadap nol palem stasiun) pada setiap jendela analisis. Seluruh jendela bertipe campuran condong ke harian ganda.

Jendela	A_{M2}	A_{S2}	A_{K1}	A_{O1}	F	S_0	Z_0	HHWL	MHWL	MLWL	LLWL
Rujukan 48 hari	0,2282	0,1021	0,1825	0,0910	0,8281	0,9929	0,7299	1,7228	1,3232	0,6626	0,2630
W1 (3–18 Ags)	0,2325	0,1016	0,1884	0,0906	0,8351	0,9819	0,7115	1,6935	1,3161	0,6478	0,2704
W2 (18 Ags–2 Sep)	0,2208	0,1013	0,1710	0,0878	0,8034	0,9524	0,6718	1,6242	1,2745	0,6303	0,2806
W3 (2–17 Sep)*	0,2424	0,1065	0,2057	0,1000	0,8761	0,9697	0,7547	1,7244	1,3187	0,6207	0,2150
D30-tanpa	0,2298	0,0987	0,1817	0,0906	0,8288	0,9866	0,7234	1,7099	1,3151	0,6581	0,2632
D30-gerhana*	0,2277	0,1039	0,1864	0,0923	0,8405	0,9929	0,7418	1,7347	1,3245	0,6612	0,2510

*Memuat gerhana. D30-tanpa: 1–31 Agustus; D30-gerhana: 17 Agustus–17 September 2025.

Tabel 3. Perbandingan jendela W2 (sebelum gerhana) dan W3 (memuat gerhana) pada data pengamatan (obs) dan deret kendali sintetis tanpa gerhana (sin). δ adalah anomali; angka tebal menandai anomali yang melampaui SK95.

Kons.	A W2 (m)	A W3 (m)	ΔA^{obs} (cm)	ΔA^{sin} (cm)	δA (cm)	SK95 (cm)	Δg^{obs} (°)	Δg^{sin} (°)	δg (°)	SK95 (°)
M2	0,2208	0,2424	2,17	1,96	0,20	0,69	−14,02	−11,74	**−2,28**	1,70
S2	0,1013	0,1065	0,52	0,12	0,40	0,72	1,16	−0,23	1,39	3,93
K2	0,0276	0,0290	0,14	0,03	0,11	0,19	1,16	−0,23	1,39	3,93
K1	0,1710	0,2057	3,47	3,42	0,05	0,53	−0,83	1,70	**−2,53**	1,67
O1	0,0878	0,1000	1,23	1,45	−0,23	0,50	4,32	3,79	0,53	3,09
P1	0,0566	0,0681	1,15	1,13	0,02	0,18	−0,83	1,70	**−2,53**	1,67

Nilai elevasi tersebut bersifat sementara, karena penetapan muka surutan untuk pemetaan memerlukan rekaman satu daur regresi simpul bulan (18,6 tahun) atau paling tidak satu tahun agar Sa, Ssa, serta pasangan K1–P1 dan S2–K2 terpisah secara mandiri (Foreman, 1977; Pugh & Woodworth, 2014). Konstanta jangka panjang, misalnya dari basis data TICON (Piccioni *et al.*, 2019), tepat untuk tujuan tersebut. Namun, untuk menguji pengaruh gerhana, pembanding yang diperlukan adalah jendela dengan panjang dan stempel waktu yang sama, karena selisih konstanta jendela 15 hari terhadap nilai jangka panjang didominasi oleh konstituen yang tidak terpisahkan; artefak inilah yang dikendalikan oleh lapis L3.

Perbandingan Antarjendela dan Eksperimen Kendali Sintetis

Tabel 3 menunjukkan bahwa amplitudo M2, K1, dan O1 pada W3 (memuat gerhana) lebih besar 2,17 cm, 3,47 cm, dan 1,23 cm daripada W2 (sebelum gerhana), dan fasa M2 bergeser −14,02°. Bila diuji secara terpisah, perubahan tersebut melampaui SK95 masing-masing (z = 6,18; 12,74; dan 4,81) dan akan dinyatakan signifikan. Namun, deret sintetis yang tidak memuat gerhana mereproduksi 90 % kenaikan M2, 99 % kenaikan K1, dan 118 % kenaikan O1. Perubahan tersebut disebabkan oleh konstituen yang belum terpisahkan: jendela 15 hari tidak mampu memisahkan N2 dari M2, sehingga amplitudo M2 yang tertaksir merupakan resultan M2 dan N2 yang berdenyut dengan periode 27,55 hari; hal serupa terjadi pada K1 yang menyerap P1.

Setelah artefak dikoreksi, anomali amplitudo yang tersisa adalah 0,20 cm (M2), 0,40 cm (S2), 0,05 cm (K1), dan −0,23 cm (O1), seluruhnya di bawah SK95 masing-masing (0,18–0,72 cm). Dengan demikian, penelitian ini menetapkan batas atas 0,7 cm bagi pengaruh gerhana terhadap amplitudo konstituen utama di perairan Hanimaadhoo pada tingkat kepercayaan 95 % (Gambar S5). Anomali fasa terbesar adalah −2,28° (M2) dan −2,53° (K1), sedikit melampaui SK95 1,70° dan 1,67°. Anomali ini setara dengan pergeseran waktu 4,7 menit untuk M2 dan 10,1 menit untuk K1. Kedua anomali bertanda sama meskipun berada pada pita frekuensi yang berbeda, sehingga lebih mungkin mencerminkan penyebab sistematis bersama, seperti sisa kebocoran spektral dalam jendela pendek, daripada tanggapan fisis; selain itu, tidak terdapat mekanisme fisis yang memungkinkan bayangan bumi menggeser fasa pasang surut.

Analisis Harmonik Jendela Bergerak

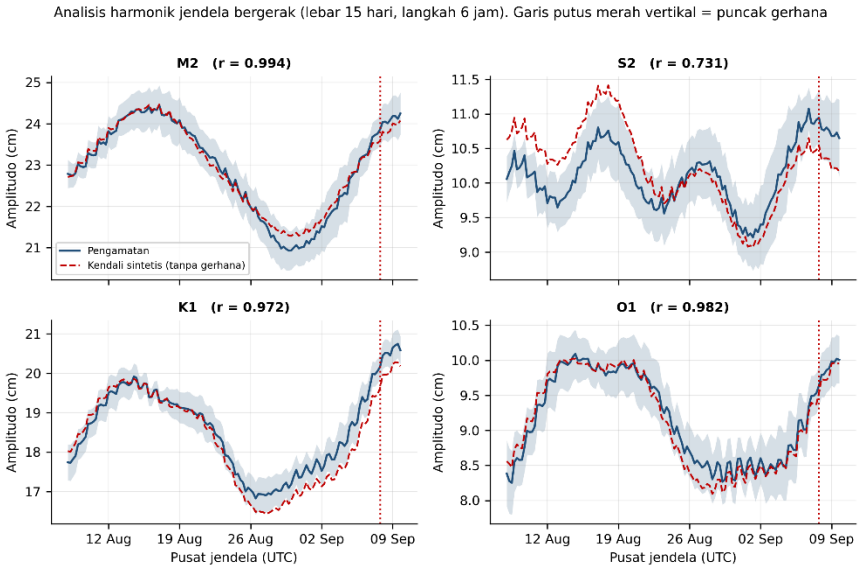
Amplitudo M2 hasil jendela bergerak berayun antara sekitar 21 dan 24,5 cm dan K1 antara 17 dan 21 cm, jauh melampaui SK95-nya (Gambar 5). Namun, kurva pengamatan dan kurva kendali sintetis hampir berimpit sepanjang rekaman dengan koefisien korelasi r = 0,994 (M2), 0,972 (K1), 0,982 (O1), dan 0,731 (S2). Periode ayunan M2 sekitar 27,5 hari, sama dengan periode denyut M2–N2, yang menguatkan penafsiran

 ISSN: 2714-8726

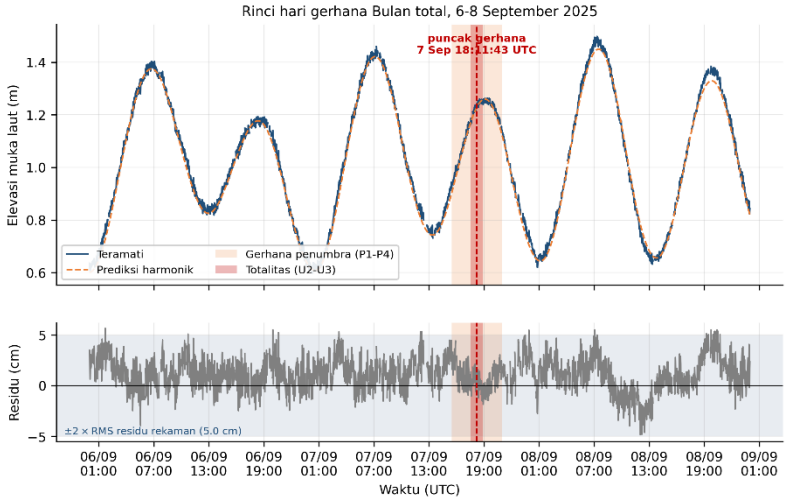
artefak. Tidak terlihat penyimpangan sistematis antara kedua kurva ketika jendela mulai memuat tanggal 7 September, padahal penyimpangan tersebut seharusnya muncul pada rentang itu apabila gerhana mengubah konstanta harmonik.

Analisis Residu pada Hari Gerhana

Analisis harmonik bekerja pada skala jendela sehingga tidak peka terhadap simpangan berdurasi beberapa jam; kekurangan ini dilengkapi oleh analisis residu (Tabel 4; Gambar 6). RMS residu selama gerhana penumbra P1–P4 adalah 1,360 cm, selama gerhana umbra U1–U4 1,009 cm, dan selama totalitas U2–U3 0,921 cm, seluruhnya lebih kecil daripada RMS residu seluruh rekaman (2,477 cm). Muka laut selama gerhana dengan demikian lebih sesuai dengan prediksi harmonik daripada kondisi rata-rata. Uji permutasi menempatkan jendela gerhana pada persentil 6,2 (p = 0,938), artinya 93,8 % jendela lain dalam rekaman memiliki RMS residu yang lebih besar (Gambar S2). Rerata residu hari gerhana sebesar 1,308 cm berada dalam ragam non-pasang surut yang lazim, yang diduga berasal dari tekanan udara dan angin.



Gambar 5. Amplitudo M2, S2, K1, dan O1 dari analisis harmonik jendela bergerak (lebar 15 hari, langkah 6 jam). Biru: pengamatan dengan SK95; merah putus-putus: kendali sintetis; garis titik vertikal: puncak gerhana.



Gambar 6. Elevasi teramati dan prediksi harmonik pada 6–8 September 2025 (atas) beserta residunya (bawah). Pita jingga: gerhana penumbra P1–P4; pita merah: totalitas U2–U3.

 ISSN: 2714-8726

Tabel 4. Statistik residu (elevasi teramati dikurangi prediksi harmonik rujukan) pada berbagai selang waktu.

Selang waktu	*n*	Rerata (cm)	RMS (cm)	Min. (cm)	Maks. (cm)
Seluruh rekaman (48 hari)	63.746	0,000	2,477	−8,26	11,32
Gerhana penumbra P1–P4	302	0,711	1,360	−1,84	4,40
Gerhana umbra U1–U4	199	0,290	1,009	−1,84	2,88
Totalitas U2–U3	72	0,405	0,921	−1,51	2,13
Hari gerhana (24 jam)	1.278	1,308	1,894	−2,11	5,47

Pada puncak gerhana, elongasi bulan adalah 179,73° (purnama) dan deklinasi bulan hanya −6,00°, sehingga gaya pembangkit harian (K1, O1) justru berada pada aras terlemahnya; keadaan ini telah terwakili dalam model harmonik. Jarak bumi–bulan 369.664 km mendekati nilai rerata sehingga tidak tergolong *supermoon*. Rentang pasang surut pada 7 September 2025 adalah 0,861 m (persentil 60,4), sedangkan rentang terbesar terjadi pada 10 Agustus 2025 (1,059 m) ketika *syzygy* bertepatan dengan perige bulan (Gambar S3).

Analisis harmonik atas rekaman 24 jam pada hari gerhana saja tidak direkomendasikan, karena rekaman tersebut hanya memisahkan enam konstituen (O1, M2, M4, M6, 3MK7, dan M10); pemaksaan 38 konstituen menghasilkan bilangan kondisi matriks rancangan $2{,}02 \times 10^{18}$ (dibandingkan 1,72 untuk enam konstituen) sehingga taksiran amplitudo tidak stabil secara numerik (Gambar S4). Peristiwa berdurasi jam lebih tepat ditelaah melalui analisis residu seperti pada lapis L5.

Tinjauan Fisis, Keterbatasan, dan Penerapan

Tidak terdeteksinya pengaruh gerhana ini sesuai dengan teori pasang surut. Korelasi antara gerhana bulan dan pasang purnama bersifat geometris: keduanya merupakan akibat konfigurasi *syzygy* yang telah tercakup oleh denyut M2–S2 berperiode 14,77 hari dalam model harmonik. Simpulan ini selaras dengan Puspitasari *et al.* (2022) dan Harito *et al.* (2022), yang perubahan teramatinya bersesuaian dengan konfigurasi *syzygy* dan perige. Anomali 0,40 cm dalam penelitian ini juga jauh lebih kecil daripada ketelitian model pasang surut global mutakhir yang berorde sentimeter (Ray & Luthcke, 2006; Hart-Davis *et al.*, 2021).

Keterbatasan penelitian ini meliputi konstanta P1 dan K2 yang diperoleh melalui inferensi, ketiadaan jendela sesudah gerhana yang mandiri, elevasi muka air rencana yang bersifat sementara, serta perlakuan nodal lima konstituen kecil (MF, J1, NO1, Q1, OO1) yang berbeda dari UTide. Penggunaan satu lokasi juga membatasi generalisasi: dasar fisis simpulan berlaku umum, tetapi batas atas 0,7 cm bersifat khas lokasi karena bergantung pada aras derau non-pasang surut. Di perairan paparan dangkal dengan ragam meteorologis dan aliran sungai yang besar, seperti banyak perairan Indonesia, batas deteksi akan lebih besar. Kerangka yang sama dapat diterapkan pada stasiun IOC di Indonesia dan pada peristiwa astronomis lain, seperti gerhana matahari dan pasang purnama perigean (*supermoon*).

KESIMPULAN

Pasang surut di perairan Pulau Hanimaadhoo bertipe campuran condong ke harian ganda dengan bilangan *FormZahl* $F = 0{,}8281$, dan didominasi oleh M2 ($A = 0{,}2282$ m; $g = 198{,}14°$), K1 (0,1825 m; 339,05°), S2 (0,1021 m; 248,92°), O1 (0,0910 m; 350,77°), P1 (0,0604 m; 331,98°), N2 (0,0327 m; 171,58°), dan K2 (0,0278 m; 226,52°); 23 dari 40 konstituen yang diurai signifikan terhadap derau. Elevasi muka air rencana sementara terhadap nol palem stasiun adalah $S_0 = 0{,}9929$ m, $Z_0 = 0{,}7299$ m, HHWL = 1,7228 m, MHWL = 1,3232 m, MLWL = 0,6626 m, dan LLWL = 0,2630 m.

Amplitudo M2, K1, dan O1 pada jendela yang memuat gerhana tampak 1,2–3,5 cm lebih besar daripada jendela sebelum gerhana, tetapi 90–99 % selisih tersebut tereproduksi oleh deret kendali sintetis yang dibangun tanpa pengaruh gerhana, sehingga selisih itu merupakan artefak konstituen yang belum terpisahkan dan bukan tanggapan fisis. Anomali yang tersisa paling besar 0,40 cm, masih di bawah batas deteksi 0,72 cm; tipe pasang surut tidak berubah pada seluruh jendela ($F = 0{,}80$–$0{,}88$); dan residu selama gerhana tidak menyimpang dari ragam hari biasa ($p = 0{,}938$). Gerhana bulan total 7 September 2025 karena itu tidak disertai perubahan konstanta harmonik yang terdeteksi di perairan Hanimaadhoo, dengan batas atas pengaruh sebesar 0,7 cm.

Kontribusi metodologis penelitian ini adalah eksperimen kendali sintetis yang mampu membedakan perubahan fisis dari artefak analisis harmonik jendela pendek. Secara praktis, peramalan pasang surut untuk hidrografi dan navigasi tidak memerlukan koreksi khusus saat gerhana bulan. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan rekaman sekurang-kurangnya satu tahun, menjadikan eksperimen kendali sebagai prosedur

 ISSN: 2714-8726

baku, dan memperluas analisis ke beberapa stasiun, termasuk di perairan Indonesia, disertai telaah pengaruh tekanan udara dan angin.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada IOC *Sea Level Station Monitoring Facility*, UNESCO, yang menyediakan data pasang surut secara terbuka, serta kepada pengelola stasiun pasang surut Hanimaadhoo, Maladewa. Pengolahan data dilaksanakan di Laboratorium Hidro-Oseanografi, Kampus STTAL, Jakarta. Diskusi melalui zoom difasilitasi oleh STTAL dan BRIN, dalam kerangka *project* mata kuliah Hitung Perataan yang diampu oleh Prof. Widodo S. Pranowo.

DAFTAR PUSTAKA

Abadie, A. 2021. Using synthetic controls: feasibility, data requirements, and methodological aspects. *Journal of Economic Literature*, 59(2): 391-425. https://doi.org/10.1257/jel.20191450

Akbar, A. M., Pranowo, W. S. & Bimantara, A. 2024. Analisis pasang surut di Teluk Davao Filipina menggunakan metode least square periode Oktober 2022. *Jurnal Chart Datum*, 10(2): 105-114. https://doi.org/10.37875/chartdatum.v10i2.359

Amores, A., Marcos, M., Pedreros, R., Le Cozannet, G., Lecacheux, S., Rohmer, J., Hinkel, J., Gussmann, G., van der Pol, T., Shareef, A. & Khaleel, Z. 2021. Coastal flooding in the Maldives induced by mean sea-level rise and wind-waves: from global to local coastal modelling. *Frontiers in Marine Science*, 8:665672. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.665672

Amores, A., Marcos, M., Le Cozannet, G. & Hinkel, J. 2022. Coastal flooding and mean sea-level rise allowances in atoll island. *Scientific Reports*, 12:1281. https://doi.org/10.1038/s41598-022-05329-1

Anwar, I. P., Tarya, A., Khadami, F., Ismanto, A., Handayani, A., Herho, S., Abdurrahman, U., Agastya, I. B. O., Putri, R. A. P. & Ningsih, N. S. 2026. Analisis penjalaran dan transformasi pasang surut dari Pelabuhan Semarang (PS) ke Timbulsloko Sinking Village (TSV), Demak. *Indonesian Journal of Oceanography*, 8(3): 346-356. https://doi.org/10.14710/ijoce.v8i3.31977

Azmi, U., Mardika, A. D., Aminudin, J. & Mahfud, C. L. 2025. Perbandingan metode Admiralty dan least-square untuk analisis pasang surut di Cilacap. *Jurnal Chart Datum*, 11(1): 19-30. https://doi.org/10.37875/chartdatum.v11i1.370

Banno, M. & Kuriyama, Y. 2020. Supermoon drives beach morphological changes in the swash zone. *Geophysical Research Letters*, 47(22): e2020GL089745. https://doi.org/10.1029/2020GL089745

Codiga, D. L. 2011. *Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions*. Technical Report 2011-01. Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Narragansett. https://www.po.gso.uri.edu/codiga/utide/2011Codiga-UTide-Report.pdf

Defant, A. 1961. *Physical Oceanography*, Vol. 2. Pergamon Press, Oxford.

Doodson, A. T. 1921. The harmonic development of the tide-generating potential. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 100(704):305-329. https://doi.org/10.1098/rspa.1921.0088

Espenak, F. & Meeus, J. 2009. *Five Millennium Canon of Lunar Eclipses: −1999 to +3000*. NASA Technical Publication TP-2009-214172. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt.

Foreman, M. G. G. 1977. *Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction*. Pacific Marine Science Report 77-10. Institute of Ocean Sciences, Sidney, British Columbia.

Godin, G. 1972. *The Analysis of Tides*. University of Toronto Press, Toronto.

Haigh, I. D., Pickering, M. D., Green, J. A. M., Arbic, B. K., Arns, A., Dangendorf, S., Hill, D. F., Horsburgh, K., Howard, T., Idier, D., Jay, D. A., Jänicke, L., Lee, S. B., Müller, M., Schindelegger, M., Talke, S. A., Wilmes, S.-B. & Woodworth, P. L. 2020. The tides they are a-changin': a comprehensive review of past and future nonastronomical changes in tides, their driving mechanisms, and future implications. *Reviews of Geophysics*, 58(1): e2018RG000636. https://doi.org/10.1029/2018RG000636

Haigh, I. D., Marcos, M., Talke, S. A., Woodworth, P. L., Hunter, J. R., Hague, B. S., Arns, A., Bradshaw, E. & Thompson, P. 2023. GESLA version 3: a major update to the global higher-frequency sea-level dataset. *Geoscience Data Journal*, 10(3): 293-314. https://doi.org/10.1002/gdj3.174

Harito, R. R., Fatoni, K. I. & Pranowo, W. S. 2020. Studi perhitungan muka surutan peta berdasarkan waktu terjadi supermoon di perairan Kalabahi Nusa Tenggara Timur. *Jurnal Chart Datum*, 6(1): 10-23. https://doi.org/10.37875/chartdatum.v6i1.170

 ISSN: 2714-8726

Hart-Davis, M. G., Piccioni, G., Dettmering, D., Schwatke, C., Passaro, M. & Seitz, F. 2021. EOT20: a global ocean tide model from multi-mission satellite altimetry. *Earth System Science Data*, 13(8):3869-3884. https://doi.org/10.5194/essd-13-3869-2021

Innocenti, S., Matte, P., Fortin, V. & Bernier, N. 2022. Analytical and residual bootstrap methods for parameter uncertainty assessment in tidal analysis with temporally correlated noise. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 39(10): 1457-1481. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0060.1

IOC/UNESCO, 2025. Sea Level Station Monitoring Facility: Hanimaadhoo (hani). Diakses pada 24 September 2025, dari https://www.ioc-sealevelmonitoring.org/

Kachelein, L., Cornuelle, B. D., Gille, S. T. & Mazloff, M. R. 2022. Harmonic analysis of non-phase-locked tides with red noise using the red_tide package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 39(7): 1031-1051. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0034.1

Kantha, L. H. & Clayson, C. A. 2000. *Numerical Models of Oceans and Oceanic Processes*. International Geophysics Series Vol. 66. Academic Press, San Diego.

Karin, T. 2020. global-land-mask: check whether a lat/lon point is on land or sea (versi 1.0.0). Diakses pada 24 September 2025, dari https://github.com/toddkarin/global-land-mask

Kudryavtsev, S. M. & Cionco, R. G. 2026. New and updated long-periodic terms in harmonic development of the Earth tide-generating potential. *Geodesy and Geodynamics*, 17(3): 308-313. https://doi.org/10.1016/j.geog.2025.07.004

Lyard, F. H., Allain, D. J., Cancet, M., Carrère, L. & Picot, N. 2021. FES2014 global ocean tide atlas: design and performance. *Ocean Science*, 17(3): 615-649. https://doi.org/10.5194/os-17-615-2021

Muis, S., Verlaan, M., Winsemius, H. C., Aerts, J. C. J. H. & Ward, P. J. 2016. A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels. *Nature Communications*, 7: 11969. https://doi.org/10.1038/ncomms11969

Ongkosongo, O. S. R. & Suyarso (Eds.), 1989. *Pasang Surut*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Oseanologi, LIPI, Jakarta.

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. https://doi.org/10.1029/2018JC014146

Pawlowicz, R., Beardsley, B. & Lentz, S. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(8): 929-937. https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4

Piccioni, G., Dettmering, D., Bosch, W. & Seitz, F. 2019. TICON: TIdal CONstants based on GESLA sea-level records from globally located tide gauges. *Geoscience Data Journal*, 6(2): 97-104. https://doi.org/10.1002/gdj3.72

Poerbandono & Djunarsjah, E., 2005. *Survei Hidrografi*. Refika Aditama, Bandung.

Pugh, D. & Woodworth, P. 2014. *Sea-Level Science: Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes*. Cambridge University Press, Cambridge. https://doi.org/10.1017/CBO9781139235778

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. https://doi.org/10.14710/ijoce.v4i1.12684

Radjawane, I. M., Simanjuntak, E. M., Adziima, A. F. & Sofian, I. 2016. Investigation the effect of total solar eclipse March 9, 2016 on tidal elevation study cases: Bangka and Belitung islands. *Journal of Physics: Conference Series*, 771: 012016. https://doi.org/10.1088/1742-6596/771/1/012016

Ray, R. D. 2017. On tidal inference in the diurnal band. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34(2):437-446. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0142.1

Ray, R. D. & Luthcke, S. B. 2006. Tide model errors and GRACE gravimetry: towards a more realistic assessment. *Geophysical Journal International*, 167(3):1055-1059. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03229.x

Rhodes, B. C. 2011. PyEphem: astronomical ephemeris for Python. *Astrophysics Source Code Library*, ascl:1112.014.

Schureman, P. 1958. *Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides*. Special Publication No. 98. U.S. Coast and Geodetic Survey, Washington, D.C. https://doi.org/10.25607/OBP-155

 ISSN: 2714-8726

Supriyono, S., Pranowo, W. S., Rawi, S. & Herunadi, B. 2015. Analisa dan perhitungan prediksi pasang surut menggunakan metode Admiralty dan metode least square (studi kasus perairan Tarakan dan Balikpapan). *Jurnal Chart Datum*, 1(1): 9-20. https://doi.org/10.37875/chartdatum.v1i1.7

Sutarto, S., Heriyanto, D., Pranowo, W. S., Yulianto, Y., Sukoco, N. B., Widodo, K. S. & Alam, T. M. 2024. Analisis harmonik konstanta pasang surut di perairan Teluk Banten menggunakan metode least square dan Admiralty. *Jurnal Hidropilar*, 10(2): 73-82. https://doi.org/10.37875/hidropilar.v10i2.360

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. https://doi.org/10.14710/ijoce.v6i2.19036

Triatmodjo, B. 1999. *Teknik Pantai*. Beta Offset, Yogyakarta.

Wadey, M., Brown, S., Nicholls, R. J. & Haigh, I. 2017. Coastal flooding in the Maldives: an assessment of historic events and their implications. *Natural Hazards*, 89(1): 131-159. https://doi.org/10.1007/s11069-017-2957-5

Woodworth, P. L., Hunter, J. R., Marcos, M., Caldwell, P., Menéndez, M. & Haigh, I. 2016. Towards a global higher-frequency sea level dataset. *Geoscience Data Journal*, 3(2): 50-59. https://doi.org/10.1002/gdj3.42

Zemunik, P., Šepić, J., Pellikka, H., Ćatipović, L. & Vilibić, I. 2021. Minute Sea-Level Analysis (MISELA): a high-frequency sea-level analysis global dataset. *Earth System Science Data*, 13(8): 4121-4132. https://doi.org/10.5194/essd-13-4121-2021