

## **Analisis Data Pola Musim di Indonesia Menggunakan Data *Equivalent Water Height (EWH)* dari Satelit GRACE**

**Muhammad Taufiq<sup>1</sup>, Ira Mutiara Anjasmara<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh  
Nopember, Surabaya, Indonesia

Email: <sup>1</sup>mtaufiq273@gmail.com, <sup>2</sup>i.anjasmara@its.ac.id

### ***Abstract***

*Indonesia, as a tropical country, exhibits rainfall patterns that are strongly influenced by both global and regional atmospheric dynamics. The seasonal climate system in Indonesia, which consists of the wet season, dry season, and transitional periods, plays a crucial role in water resource management, agricultural activities, and disaster mitigation. To better understand these complex atmospheric and hydrological interactions, climatological parameters such as Equivalent Water Height (EWH) serve as important indicators of terrestrial water storage variability. The application of GRACE and GRACE-FO satellite missions provides a novel approach to monitoring hydrological dynamics through EWH, enabling large-scale and continuous observations of terrestrial water storage changes. The results of this study reveal a strong negative relationship between the Oceanic Niño Index (ONI) and EWH at zero time lag, indicating that El Niño events tend to reduce terrestrial water storage across Indonesia. This simultaneous response suggests that changes in atmospheric circulation during El Niño phases immediately affect hydrological conditions over land. In particular, the reduction in water storage is primarily associated with weakened moisture transport from both the Indian Ocean and the Pacific Ocean, which are the main sources of atmospheric water vapor influencing Indonesia's climate system. As a result, decreased moisture convergence leads to reduced precipitation and a rapid decline in terrestrial water reserves. Bias evaluation further indicates distinct spatial patterns across the Indonesian region. Negative bias predominantly occurs in Sumatra and Kalimantan, whereas positive bias is more commonly observed in Nusa Tenggara and Maluku. In addition, the RMSE analysis shows that EWH estimates are relatively more accurate in regions with homogeneous rainfall patterns, while their performance decreases in areas characterized by high rainfall variability. These findings highlight the importance of considering regional climatic characteristics when interpreting satellite-based hydrological observations and emphasize the role of large-scale atmospheric–oceanic interactions in shaping terrestrial water storage dynamics in Indonesia.*

**Keywords:** CPC, Equivalent Water Height, Seasonal Pattern.

### **Abstrak**

Indonesia sebagai negara dengan iklim tropis, memiliki pola curah hujan yang sangat dipengaruhi oleh dinamika atmosfer global dan lokal. Karakteristik zona musim di Indonesia, yang meliputi musim hujan, musim kemarau, dan musim transisi, memainkan peran penting dalam pengelolaan sumber daya air, pertanian, dan mitigasi bencana. Untuk memahami dinamika atmosfer dan hidrologi yang kompleks ini, parameter klimatologi seperti Equivalent Water Height (EWH) menjadi indikator kunci. Pemanfaatan satelit GRACE dan GRACE-FO memberikan alternatif baru dalam memantau dinamika hidrologi melalui parameter *Equivalent Water Height (EWH)*. Hasil penelitian menunjukkan hubungan negatif yang kuat antara ONI dengan EWH pada lag 0 dimana pada fase *El Nino* cenderung menurunkan cadangan air di daratan di Indonesia. Respon simultan berasal dari sulai uap air Samudera Hindia dan Samudera Pasifik yang sangat berpengaruh terhadap pola iklim di wilayah Indoneisa. Evaluasi bias menunjukkan dominasi bias negatif di Sumatera dan Kalimantan, Nusa Tenggara dan Maluku di dominasi bias positif. Analisis RMSE menunjukkan bahwa estimasi EWH relatif akurat dilakukan di wilayah dengan curah hujan homogen dan kurang baik dilakukan di wilayah dengan variabilitas curah hujan tinggi.

**Kata Kunci:** CPC, Equivalent Water Height, Pola Musim.

## 1. PENDAHULUAN

Dampak cuaca dan iklim sangat signifikan terhadap kehidupan manusia, binatang maupun tumbuhan. Sejarah manusia sangat dipengaruhi oleh studi cuaca dan prakiraan cuaca. Prakiraan cuaca merupakan instrumen vital yang mendukung berbagai aspek kehidupan manusia dan aktivitas sosial, mulai dari pengambilan keputusan individu hingga perencanaan industri skala besar (Chen dkk., 2023). Beberapa parameter cuaca dan iklim antara lain kondisi cuaca (hujan, guntur, kabut embun, dan sebagainya), suhu udara, tekanan udara, kelembaban udara, curah hujan dan angin (Gore & Gawali, 2023). Pengendali utama variasi cuaca dan iklim dipermukaan bumi adalah matahari. Matahari mengemisikan panas yang tidak merata dipermukaan bumi. Perbedaan panas dipermukaan bumi, mengakibatkan perbedaan tekanan udara dan menimbulkan pergerakan massa udara. Merujuk pada permukaan bumi dimana pada lintang rendah atau mendekati nol derajat (ekuator) disebut dengan iklim tropis, lintang menengah dengan istilah iklim sub tropis dan lintang tinggi mendekati kutub bumi disebut dengan iklim kutub. Menurut (Winarno dkk., 2019) iklim suatu tempat dipengaruhi oleh garis lintang, kemiringan lereng, ketinggian, dan jarak dari perairan, serta sifat arus laut. Kita dapat melihat permukaan bumi bahwa jenis iklim berbeda di setiap lintang. Perubahan iklim global dan variabilitas cuaca ekstrem semakin mempengaruhi berbagai sektor di Indonesia, termasuk sektor pertanian, kehutanan, dan atmosfer. Salah satu masalah yang dihadapi adalah tingginya prakiraan curah hujan, terutama di daerah yang memiliki variabilitas curah hujan yang tinggi. Prediksi curah hujan yang akurat sangatlah penting, terutama di wilayah tropis seperti Indonesia yang memiliki dua musim utama: musim hujan dan musim kemarau, serta pola musim yang beragam di berbagai wilayah. Estimasi curah hujan merupakan tantangan yang sangat sulit karena luasan curah hujan merupakan hasil dari interaksi nonlinear diantara banyak proses fisik dengan variabilitas yang sangat kompleks di berbagai skala baik spasial maupun temporal.

Data reanalisis memberikan informasi pelengkap yang berharga bagi data observasi di wilayah yang sebaran data observasi dengan spasial gridnya tidak merata dibandingkan dengan luasan wilayah Indonesia. Sistem observasi berbasis *grid* merupakan suatu pendekatan paling relevan karena dapat mengukur variabilitas baik secara spasial maupun temporal (Nogueira, 2020). Prakiraan curah hujan melalui satelit merupakan sumber informasi alternatif untuk wilayah Indonesia dengan cakupan area yang luas karena dipandang cukup efektif dan efisien. Dalam penelitian (Dickey dkk., 1999) melakukan studi komprehensif mengenai manfaat potensial di bidang hidrologi dan disiplin ilmu lain dari misi satelit gravimetri yang dirancang khusus untuk mengamati komponen variabel waktu dari medan gravitasi bumi, dan mengeksplorasi skenario misi yang memungkinkan. Penelitian tentang *Global Navigation Satellite System* (GNSS) merupakan pelengkap untuk pemantauan hidrologi dengan tingkat sensitivitas tinggi terhadap perubahan air di permukaan (Jiang dkk., 2021). Pada penelitian (Jiang dkk., 2020) beberapa manfaat penelitian menggunakan GNSS salah satunya melakukan deteksi cepat perubahan hidrologi berperan untuk mengidentifikasi anomali seperti kekeringan. Dalam Penelitian (Rahayu & Anjasmara, 2024) mengaitkan perubahan EWH terhadap faktor hidrometeorologi seperti curah hujan dengan memanfaatkan satelit *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Pada penelitian lain yang dilakukan oleh (Rahayu & Anjasmara, 2021) dan (Rodell, 2023) EWH juga dapat mengkaji peningkatan bencana hidrometeorologi seperti banjir, tanah longsor dan kekeringan dari dampak perubahan iklim. Dalam penelitian (Elsaka, 2021) variasi tinggi air tergantung pada letak geografis dan iklim sub wilayah. Menurut (Krasnoshchekov dkk., 2020) data EWH juga dapat dimanfaatkan untuk mengetahui dampak spasial kebakaran hutan. Data EWH dapat

memberikan informasi penting perubahan massa udara di permukaan bumi, yang dapat membantu dalam meningkatkan akurasi prakiraan pola musim. Estimasi kesalahan dengan akurasi sebesar 2 cm yang konsisten di seluruh lokasi (Tapley dkk., 2004).

Berbagai studi telah dilakukan dengan memanfaatkan data EWH seperti yang dilakukan oleh (Jia dkk., 2020) data GRACE dapat digunakan untuk memprediksi curah hujan yang minim data observasi dengan memanfaatkan sinyal perubahan massa air dengan pola curah hujan untuk meningkatkan estimasi curah hujan spasial. Menurut (Abdelmohsen dkk., 2020) data GRACE memberikan gambaran besar tentang hubungan hidrologi antara danau dan ekuifer. serta dinamika siklus hidrologi untuk pengelolaan sumber daya air dan siklus hidrogeologi. Dalam penelitian (Singh dkk., 2021) menunjukkan bahwa data GRACE efektif untuk mitigasi dampak kekeringan melalui analisis spasial dan temporal.

Misi satelit Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) yang berlangsung dari Maret 2002 hingga Juni 2017 adalah misi penginderaan jarak jauh pertama yang menawarkan variasi temporal Terrestrial Water Storage (TWS), yakni total massa air yang terdapat dalam kolom tanah (contohnya, salju, air permukaan, kelembapan tanah, dan air tanah), dengan resolusi spasial beberapa ratus kilometer (Frappart & Ramillien, 2018). GRACE merupakan misi satelit kembar yang menggunakan teknologi canggih untuk memetakan perbedaan medan gravitasi global dengan secara tepat melacak variasi jarak antar-satelit antara dua satelit melalui sistem pengukuran jarak K-band (KBR). Pengukuran gravitasi waktu variabel GRACE telah banyak dimanfaatkan dalam penelitian variasi massa pada berbagai elemen sistem iklim, seperti perubahan penyimpanan air terestrial (TWS) dari skala regional hingga global, deteksi banjir dan kekeringan, penurunan air tanah, perubahan penyimpanan air di salju dan waduk permukaan, lapisan es di kutub, serta perubahan massa es gletser gunung, perubahan permukaan laut global, dan lainnya (Tapley dkk., 2019). Pada mulanya, GRACE menerapkan metode baku dalam data gayaberas untuk mendeteksi perubahan massa dengan memanfaatkan solusi *spherical harmonic* (SH) (Humphrey dkk., 2023). Dalam penelitian (Anjasmara & Kuhn, 2010) Pada misi satelit GRACE dalam pengamatan medan gravitasi bumi yang dinyatakan dalam tinggi air setara (EWH).

Model cuaca sudah banyak dimanfaatkan untuk melakukan prediksi cuaca dan iklim, namun tingkat akurasi prediksi masih belum memuaskan di beberapa wilayah. Sehingga untuk meningkatkan akurasi prediksi dipandang perlu untuk menggunakan metode baru seperti satelit gravitasi dengan memanfaatkan keluaran data Equivalent Water Height (EWH). Dengan memanfaatkan data Equivalent Water Height (EWH) dari satelit GRACE untuk mengukur tingkat akurasi terhadap data pola musim di wilayah Indonesia. Penggunaan data EWH dapat membantu memperbaiki prakiraan jangka menengah dan panjang yang lebih akurat, terutama di wilayah yang minim data observasi.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

### 2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan mengambil lokasi penelitian pada Zona Musim (ZOM) di Indonesia. Lokasi tersebut dipilih karena karakteristik di wilayah tersebut bervariasi dimana Indonesia diapit oleh 2 (dua benua besar yaitu Benua Asia dan Benua Australia dan dua Samudera yaitu Samudera Pasifik dan Samudera Hindia serta angin monsoon yang berasal dari daerah belahan bumi utara dan belahan bumi Selatan yang sangat berpengaruh terhadap tipe musim hujan di Indonesia. Lokasi penelitian memiliki karakteristik yang bervariasi, klasifikasi curah hujan di Indonesia terbagi menjadi beberapa tipe curah hujan antara lain curah hujan dengan tipe monsunial, tipe ekuatorial

dan tipe curah hujan dengan sifat lokal. Tipe Monsunal yaitu ketika puncak musim hujan berlangsung saat monsun Asia. Tipe Ekuatorial terjadi dua kali puncak musim hujan dan secara umum terjadi di bulan Maret dan Oktober. Sedangkan tipe lokal merupakan tipe yang berkebalikan dengan tipe monsun.

Dari tiga tipe musim dibagi menjadi beberapa sub-tipe musim sebagai berikut:

1. Tipe ZOM Monsunal, dibagi menjadi dua sub-tipe:
  - a. Tipe ZOM Monsunal-1, yaitu Pola musim monsun yang hanya memiliki satu musim hujan sepanjang tahun.
  - b. Tipe ZOM Monsunal-2, Pola monsun dengan dua musim, yaitu musim kemarau dan musim hujan.
2. Tipe ZOM Ekuatorial, terbagi menjadi tiga sub-tipe antara lain:
  - a. Tipe ZOM Ekuatorial-1, zona dengan pola ekuatorial dan hanya mempunyai satu musim hujan sepanjang tahun.
  - b. Tipe ZOM Ekuatorial-2, Pola ekuatorial dengan dua musim yaitu musim hujan dan musim kemarau.
  - c. Tipe ZOM Ekuatorial-4, zona ekuatorial yang mempunyai empat musim yaitu dua musim hujan dan dua musim kemarau.
3. Tipe ZOM Lokal dibedakan menjadi empat sub-tipe yaitu:
  - a. Tipe ZOM Lokal-1, zona dengan pola lokal yang hanya mempunyai satu musim dengan periode musim hujan sepanjang tahun.
  - b. Tipe ZOM Lokal-2, pola musim lokal dengan dua musim yakni satu musim hujan dan satu musim kemarau.
  - c. Tipe ZOM Lokal-4, zona musim lokal dengan empat musim yaitu dua periode musim kemarau dan dua periode musim hujan.
  - d. Tipe ZOM Lokal-5, pola lokal dengan periode satu musim kemarau sepanjang tahun.

## 2.2 Prosedur Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi :

1. Data peta dasar dengan format *shapefile* (.shp).
2. Data validasi berupa data reanalisis CPC
3. Data GRACE dan GRACE-FO JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height Coastal Resolution Improvement (CRI) Filtered Release 06.3 Version 04 dengan format .nc (NetCDF). Produk JPL Mascon dipilih untuk mengandalkan solusi *spherical harmonic*. Metode ini secara signifikan mengurangi kesalahan dan melakukan koreksi isostatik glasial yang disempurnakan dan memiliki konsistensi yang lebih baik antara pengamatan GRACE dan GRACE-FO. Sehingga memastikan stabilitas temporal dan akurasi yang lebih baik untuk EWH jangka panjang. CRI sangat baik digunakan untuk wilayah yang didominasi kepulauan untuk meminimalisasi penyebab distorsi sinyal hidrologi terestrial yang terjadi pada GRACE. Filterasi CRI secara eksplisit memperhitungkan geometri garis pantai dan batas spasial untuk memisahkan variasi darat dan laut di area daratan yang sempit dan disepanjang zona pesisir. Data diunduh melalui website <https://search.earthdata.nasa.gov/search?portal=podaac-cloud> (Diakses tanggal 13 November 2024). Terdapat kekosongan data jangka panjang selama 11 bulan yaitu dari bulan Juli 2017 sampai dengan Mei 2018. Selain itu data GRACE juga mengalami kekosongan jangka pendek selama 21 bulan pada periode 2010 sampai dengan 2023 (Januari, Juni, dan Desember 2011; Mei dan Oktober 2012; Maret, Agustus, dan September 2013; Februari, Juli, dan Desember 2014; Juni, Oktober, dan November 2015; April, September, dan Oktober 2016; Februari 2017; dan Agustus dan

September 2018). Data yang mengalami kekosongan, baik dari *short-term* maupun *long-term gap* disebabkan oleh usia pakai baterai dan pemadaman fitur lain pada instrumen satelit GRACE. Teknik pengisian kekosongan data GRACE dilakukan menggunakan metode rekonstruksi data dengan melakukan interpolasi data.

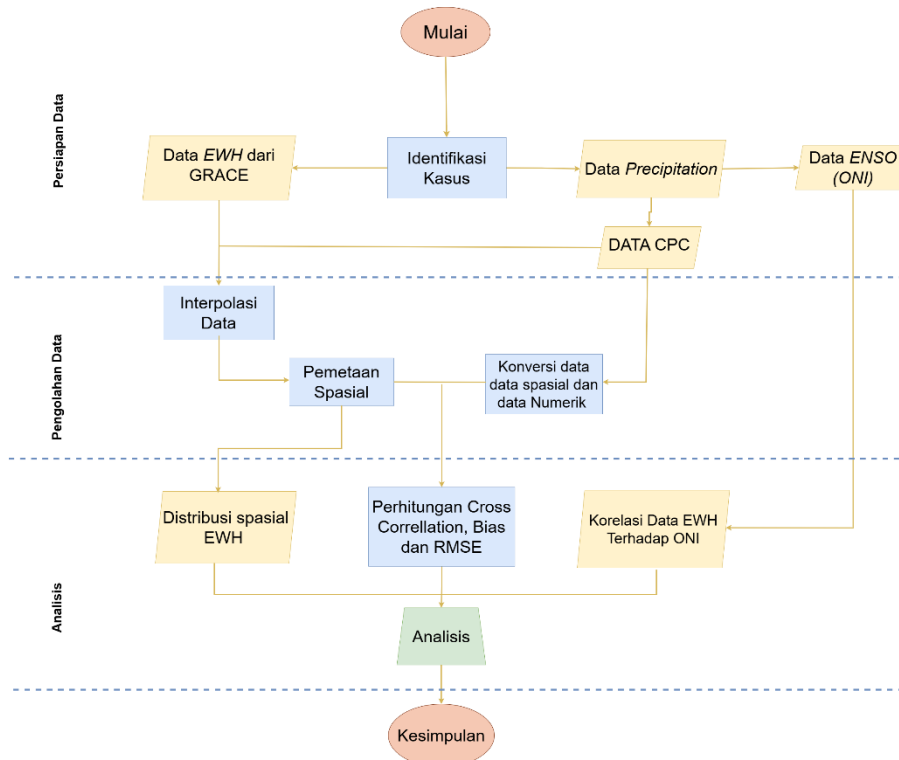
4. Data CPC merupakan salah satu sumber data presipitasi yang memiliki resolusi spasial dan temporal yang tinggi, sehingga sangat bermanfaat untuk analisis pola musim maupun cuaca di wilayah tropis. Resolusi spasial horizontal data ini adalah  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  yang berarti setiap grid mewakili area permukaan bumi dengan luasan setengah derajat lintang dan bujur. Grid tersebut dipilih cukup mewakili dan menggambarkan sebaran curah hujan di wilayah penelitian dengan dinamika atmosfer yang kompleks dan bervariasi. Data CPC merupakan pengukuran total curah hujan bulanan untuk menggambarkan pola presipitasi dan anomali dari waktu ke waktu.
5. Data ENSO yang digunakan pada penelitian ini merupakan salah satu komponen vital untuk memahami dinamika iklim global, terutama berkaitan dengan variabilitas perbedaan suhu permukaan laut di wilayah Nino3.4. Secara umum area ini dimanfaatkan untuk mengidentifikasi kejadian *El Nino* dan *La Nina*. Data penyimpangan suhu di wilayah ini menggambarkan kondisi aktual terhadap kondisi normal jangka panjang, sehingga sangat bermanfaat untuk memahami bagaimana perubahan suhu muka laut dapat berpengaruh terhadap kondisi atmosfer. Data ONI disajikan dalam resolusi temporal bulanan memungkinkan analisis perubahan suhu laut secara rinci dari waktu ke waktu. Data ini dipilih untuk melihat variasi musiman, tahunan maupun fenomena iklim jangka panjang lainnya. Periode data yang digunakan dalam penelitian ini mencakup rentang waktu dari 1 Januari 2010 hingga 31 Desember 2023. Periode yang cukup panjang untuk mengamati siklus ENSO secara berulang dan memberikan alasan yang kuat untuk melakukan analisis tren iklim serta hubungannya dengan berbagai fenomena atmosfer lain.

### 2.3 Tahapan Penelitian

Secara umum tahapan penelitian ini dapat dijabarkan pada alur penelitian dibawah ini:

1. Identifikasi Masalah  
Pada tahap ini dilakukan proses menganalisis permasalahan, urgensi dan latar belakang yang terkait dengan topik penelitian. Topik utama yang diangkat dalam penelitian ini ialah akurasi prakiraan musim hujan menggunakan data EWH terhadap CPC untuk melakukan prediksi curah hujan bulanan di Indonesia.
2. Studi Pustaka  
Tahapan ini dilakukan untuk menguasai materi dan pemahaman terkait topik penelitian yang diangkat.
3. Pengumpulan Data  
Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data batas Provinsi di Indonesia dalam format shapefile, data EWH sebagai variabel predictor dan data Presipitasi dari model cuaca CPC dalam format .nc (NetCDF).
4. Pengolahan Data dan Analisa Data  
Pada tahapan ini pengolahan data EWH sebagai variabel prediktor untuk mengetahui hubungan terhadap pola musim di Indonesia. Tahapan pengolahan data penelitian ini adalah sebagai berikut :
  - a) Melakukan ekstraksi data EWH dari satelit GRACE untuk melakukan pengolahan data. Data dengan grid awal  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  dimanfaatkan untuk menganalisis dengan membandingkan data tersebut terhadap data model reanalisis CPC.

- b) Pengolahan data EWH dan data reanalisis CPC. Pada penelitian ini data yang telah diperoleh diolah menggunakan perangkat lunak GrADS, Perangkat lunak pengolah data spasial dan Rstudio.
- c) Menguji keandalan model prediksi dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak RStudio untuk menghitung formula yang telah ditentukan berdasarkan kajian Pustaka adalah korelasi antara data EWH dengan data reanalisis, hubungan antara EWH dengan indeks ONI, bias, RMSE.
- d) Analisa pola musim di Indonesia dengan menggunakan zona musim dengan nilai tertinggi dan terendah dengan mengidentifikasi terhadap data curah hujan rata-rata bulanan dan data ONI kemudian dilakukan validasi terhadap data CPC.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Perhitungan statistik sangat umum digunakan untuk menginformasikan gambaran atau tentang suatu fenomena untuk menyelesaikan masalah. Dalam penelitian ini beberapa indikator statistik telah dipilih untuk menyelesaikan masalah yang berguna membantu menarik kesimpulan. Beberapa formulasi dipilih untuk mengevaluasi dan menganalisa efektivitas variabel prediktor terhadap variabel validator.

Untuk menganalisis perbedaan, Korelasi silang ( $r$ ), bias dan RMSE dihitung menggunakan rumus-rumus berikut:

$$r = \frac{\sum_i [(x(i) - mx) * (y(i - d) - my)]}{\sqrt{\sum_i (x(i) - mx)^2} \cdot \sqrt{\sum_i (y(i - d) - my)^2}} \quad (1)$$

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{oi} - X_{Ri}) \quad (2)$$

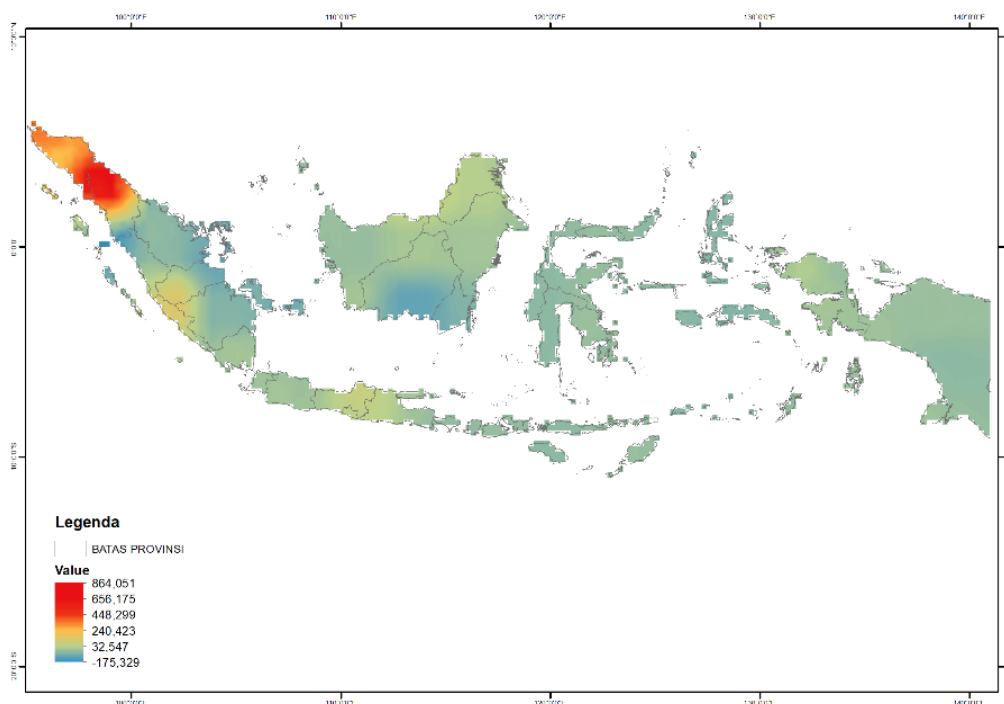
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{oi} - X_{Ri})^2} \quad (3)$$

Dari persamaan diatas dapat dijelaskan  $X_{oi}$  menunjukkan nila observasi,  $X_{Ri}$  menunjukkan nilai referensi,  $X_{oi}$  dan  $X_{Ri}$  menunjukkan nilai rata-rata populasi dari nilai sampel yang diamati dan objek referensi masing-masing, dan nilai  $N$  menunjukkan jumlah data sampel.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan data EWH sebagai variabel prediktor dalam pemodelan yang diperoleh dari *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) dan data *Climate Prediction Center* (CPC) sebagai variabel respon. Langkah selanjutnya dilakukan validasi hasil pemodelan berdasarkan dataset. Berikut hasil pengolahan datanya:

#### 3.1 Peta Sebaran EWH



Gambar 1. Hasil Pemodelan Equivalent Water Height

Pada gambar 1 Hasil pemodelan EWH menunjukkan hasil yang bervariasi dan signifikan diseluruh Provinsi di wilayah Indonesia. Gambar 1. Menunjukkan gradasi warna merah (nilai EWH dengan kategori tinggi), hiau (menengah), biru (rendah) mengindikasikan kondisi kondisi sebaran EWH secara spasial. Provinsi Aceh dan Provinsi Sumatera Utara terlihat sebagai wilayah dengan Cadangan air spasial tertinggi hingga mencapai sekitar 864cm. ditandai dengan warna merah yang mencolok. Hal ini menandakan tingginya curah hujan tahunan diwilayah tersebut merupakan wilayah tipe ZOM ekuatorial-1 dan ekuatorial-2 dengan sifat musim hujan terjadi hujan sepanjang tahun. Provinsi Sumatera Barat Menunjukkan nilai menengah hingga tinggi (Kuning-orange) mengindikasikan bahwa sifat curah hujan kedua wilayah ini cukup stabil dengan tipe ZOM ekuatorial-1 didukung oleh topografi pegunungan yang berperan menyimpan cadangan air alami. Variasi tutupan lahan dari hutan, lahan pertanian, hingga wilayah perkotaan memicu nilai EWH sedikit lebih rendah, akan tetapi kapasitas air yang tersimpan relatif baik. Hal ini dapat dijelaskan oleh curah hujan yang sangat tinggi,

keberadaan hutan hujan tropis yang luas, dan struktur geologi pegunungan Bukit Barisan yang efektif menyimpan udara. Kondisi ini menjadikan wilayah Aceh yang kaya sumber udara, baik permukaan maupun bawah tanah. Sumatra Utara dan Sumatra Barat menampilkan nilai menengah-tinggi (oranye hingga kuning). Kedua provinsi ini juga memiliki curah hujan yang stabil sepanjang tahun serta daerah pegunungan yang berperan sebagai penyimpan udara alami. Keberagaman tutupan lahan—mulai dari hutan, pertanian, hingga perkotaan—menyebabkan nilai EWH di kedua wilayah ini sedikit lebih rendah dibandingkan Aceh, namun masih menunjukkan kapasitas udara yang relatif baik. Riau, Jambi, dan Sumatra Selatan terlihat berada dalam kategori menengah. Wilayah ini mempengaruhi keberadaan lahan gambut yang menyimpan udara tetapi rentan kehilangan massa udara saat terjadi degradasi atau gangguan ekosistem. Nilai EWH yang tidak terlalu tinggi dapat menjadi indikasi tekanan terhadap lingkungan akibat deforestasi dan alih fungsi lahan. Lampung menampilkan nilai menengah-rendah. Selain berupa dataran rendah dan pesisir, wilayah ini menghadapi tekanan besar dari intensifikasi pertanian dan kepadatan penduduk yang tinggi, sehingga mempengaruhi cadangan massa udara.

Pulau Jawa menunjukkan hasil nilai EWH rendah hingga menengah (biru-hijau). Secara umum pulau Jawa memiliki tipe ZOM monsunial-2 yakni musim hujan dan musim kemarau. Provinsi Jawa Barat dan Jawa Tengah dan Jawa Timur bagian barat menginterpretasikan sedikit warna hijau terutama di wilayah pegunungan yang merupakan area resapan air. Jawa menampilkan nilai EWH yang dominan rendah hingga menengah (biru-hijau). Kepadatan penduduk yang sangat tinggi, perluasan kawasan perkotaan, dan eksploitasi air tanah yang masif menyebabkan cadangan massa air menurun. Jawa Barat dan Jawa Tengah menampilkan sedikit kawasan berwarna hijau, terutama di wilayah pegunungan seperti Priangan dan Dieng, yang masih menjadi pusat resapan udara. Namun secara umum nilai EWH tidak terlalu tinggi. Jawa Timur tampak lebih rendah lagi, menunjukkan tekanan hidrologis lebih serius. Banyak daerah mengalami penurunan muka air tanah akibat penggunaan berlebih, diikuti perubahan penggunaan lahan yang mengurangi kapasitas resapan air.

Secara umum wilayah Kalimantan didominasi warna hijau atau kategori menengah terutama Provinsi Kalimantan Barat dan Kalimantan Tengah menunjukkan nilai yang relatif baik. Kedua provinsi memiliki tipe ZOM ekuatorial-2 mengindikasikan tipe hujan ekuatorial dengan dua musim hujan yang jelas antara musim hujan dan musim kemarau.

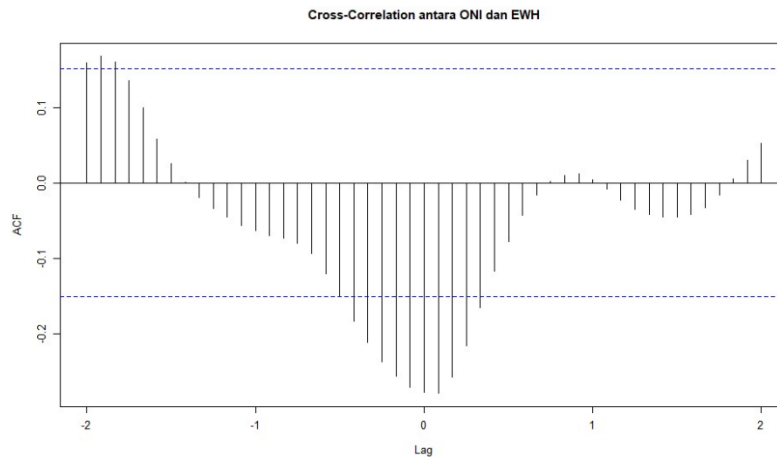
Pulau Sulawesi memperlihatkan pola EWH yang cukup beragam. Sulawesi Tengah pada kategori menengah. Wilayah ini merupakan tipe ekuatorial-2 dan topografi di wilayah tersebut merupakan daerah pegunungan dan hutan yang cukup berkontribusi menyimpan cadangan air. Sulawesi Selatan, Utara, dan Tenggara cenderung pada kategori menengah hingga rendah dengan tipe ZOM ekuatorial-2, monsunial-2 dan lokal-2.

Nusa Tenggara Barat dan Nusa Tenggara Timur menunjukkan nilai EWH terendah di dominasi warna biru di lokasi penelitian dengan tipe ZOM tipe monsunial-2. Karakter kedua propinsi merupakan iklim kering dengan ketersediaan cadangan air cukup kecil dengan topografi yang relatif gersang dan minimnya penyimpanan massa air. Karakter iklim kering dan curah hujan rendah menyebabkan terbatasnya ketersediaan udara. Selain itu, kondisi topografi yang relatif gersang dan minimnya hutan pegunungan membuat penyimpanan massa udara menjadi rendah.

Maluku dan Papua menunjukkan kategori rendah hingga menengah (biru-hijau). Maluku didominasi kategori rendah secara topografi merupakan kumpulan pulau kecil yang memiliki kapasitas penyimpanan massa air yang terbatas. Papua Barat menunjukkan nilai EWH yang lebih tinggi dibandingkan dengan provinsi lain di wilayah tersebut. Tipe ZOM di wilayah ini sangat beragam dengan tipe ekuatorial-1, ekuatorial-2, lokal-1 dan lokal-2.



### 3.2 Grafik *Cross- Corellation*

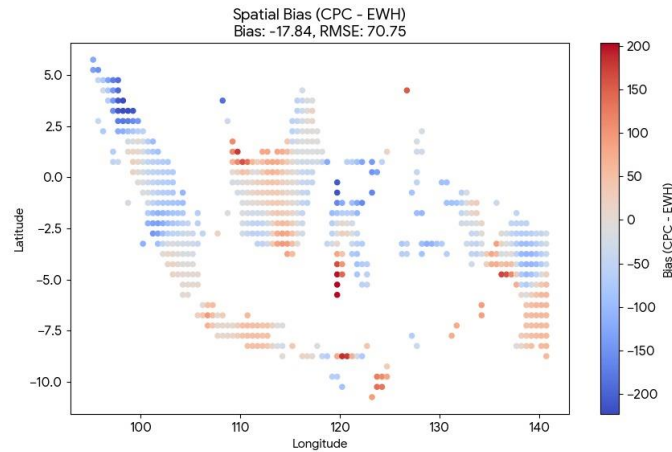


Gambar 2. Cross Coreollation antara ONI dengan EWH

Pada gambar 2 grafik *cross corellation* (CCF) menunjukkan hubungan dinamis antara ONI dan EWH memberikan interpretasi yang penting tentang iklim global berbasis laut dengan ragam cadangan massa air di daratan. Pada grafik dipahami bagaimana perubahan ONI yang mencerminkan kondisi ENSO (*El Nino-Southern Oscillation*) baik pada fase *El Nino*, fase netral maupun fase *La Nina* berpengaruh terhadap perubahan ketersediaan air seperti pada gambar 2. Pada grafik CCF menunjukkan nilai korelasi kuat disekitar lag 0, yaitu ketika tidak ada pergeseran waktu antara ONI dengan EWH. Korelasi negatif menunjukkan bahwa ketika nilai ONI meningkat yang berarti kondisi *El Nino* sedang terjadi maka nilai EWH cenderung menurun pada periode yang hampir bersamaan. Hubungan ini sangat konsisten dengan karakteristik iklim di Indonesia dimana pada fase *EL Nino* di wilayah Indonesia cenderung mengalami penurunan intensitas curah hujan, tingkat kekeringan meningkat sehingga berkontribusi pada ketersediaan air permukaan. Hal ini menandakan bahwa EWH merupakan indikator yang sangat sensitif terhadap perubahan massa air permukaan. Selain gambar 2 juga menunjukkan lag negatif menunjukkan korelasi negatif yang tetap signifikan meskipun mulai lemah artinya bahwa perubahan ONI terjadi lebih dulu dibandingkan dengan perubahan EWH. Pola ini mengindikasikan bahwa ONI tidak hanya berdampak langsung terhadap perubahan EWH pada waktu yang simultan, tetapi juga memiliki pengaruh setelah waktu tertentu. Nilai korelasi positif terjadi ketika perubahan EWH terjadi lebih dulu dibandingkan dengan ONI. Nilai korelasi pada lag positif cukup kecil dan tidak signifikan dapat disimpulkan bahwa perubahan cadangan air di daratan tidak berpengaruh terhadap ONI. Secara keseluruhan grafik CCF memberikan pemahaman hubungan antara ONI dan EWH sangat kuat dan signifikan dengan arah korelasi negatif. Respons yang terjadi hampir tanpa jeda waktu (lag 0) juga menunjukkan bahwa kapasitas penyimpanan udara di daratan Indonesia relatif terutamasangat sensitif dan cepat tanggap terhadap gangguan iklim skala besar. Korelasi yang tidak signifikan pada lag positif (EWH mendahului ONI) memberikan bukti kuat bahwa perubahan kondisi udara di daratan Indonesia tidak memberikan umpan balik yang berarti terhadap dinamika ENSO. Secara fisik, ENSO merupakan fenomena yang dikendalikan oleh interaksi laut-atmosfer berskala global, terutama oleh anomali panas laut di Samudra Pasifik ekuator, sehingga proses-proses hidrologi regional tidak memiliki energi atau skala yang cukup besar untuk mempengaruhi sistem ini. Meskipun perubahan EWH dapat mempengaruhi fluks energi lokal melalui evapotranspirasi atau perubahan kelembaban

permukaan, dampaknya bersifat lokal hingga regional dan tidak cukup kuat untuk mengubah sirkulasi atmosfer global atau distribusi panas laut di Pasifik. Oleh karena itu, sinyal hidrologi daratan Indonesia tidak muncul sebagai pendahulu (prekursor) dalam perkembangan ENSO, yang tercermin dari lemahnya korelasi pada lag positif.

### 3.3 Peta Sebaran Bias



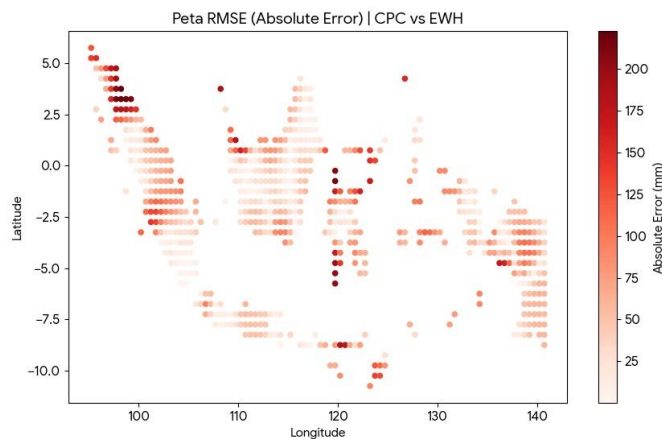
Gambar 3. Peta spasial Bias antara CPC dengan EWH

Gambar 3 memberikan gambaran tentang sebaran bias secara spasial yang di estimasi oleh CPC terhadap EWH dengan nilai bias rata-rata -17,84, artinya bahwa secara umum nilai EWH lebih tinggi dibandingkan nilai CPC. Nilai RMSE mencapai 70,75 menunjukkan terjadinya penyimpangan spasial yang cukup besar antara kedua variabel. Keduanya memiliki konsep yang berbeda Dimana CPC sebagai estimasi curah hujan, sedangkan EWH sebagai estimasi perubahan massa air total. Sumatera menunjukkan pola dominan berwarna biru terutama bagian tengah, timur dan utara. Warna biru mengindikasikan bahwa nilai EWH lebih besar daripada nilai CPC atau bias negatif. Pola bias Kalimantan bervariasi namun secara umum menunjukkan pola bias negatif. Di wilayah pesisir timur dan tenggara berwarna oranye dan merah menunjukkan nilai curah hujan CPC lebih tinggi dibandingkan dengan EWH. Bias negatif yang dominan di wilayah Sumatera dan Kalimantan menunjukkan bahwa nilai EWH cenderung lebih tinggi dibandingkan estimasi curah hujan CPC. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh perbedaan mendasar antara kedua parameter yang dibandingkan. EWH merepresentasikan massa udara total yang tersimpan di daratan, mencakup udara tanah, kelembapan tanah di dalam, permukaan udara, dan kontribusi udara dari akumulasi periode sebelumnya. Sebaliknya, CPC hanya merekam presipitasi yang jatuh di permukaan, sedangkan Wilayah Sumatera dan Kalimantan memiliki curah hujan tinggi, tutupan hutan luas, serta akuifer dan lahan gambut yang mampu menyimpan air dalam jumlah besar dan dalam waktu yang relatif lama. Kondisi ini menyebabkan respon EWH bersifat terintegrasi dan tertunda, sehingga massa udara yang terdeteksi oleh EWH tetap tinggi. Pulau Jawa menunjukkan bias positif dengan jelas artinya bahwa nilai CPC cenderung lebih tinggi daripada perubahan massa air total dari EWH. Pola bias di Nusa Tenggara dan Maluku menunjukkan dominasi bias positif. Wilayah ini cenderung semi kering sehingga ketika ujan turun hasil pengukuran CPC merekam curah hujan dengan sangat baik namun tidak tersimpan dalam jumlah besar karena kondisi tanah yang dangkal dan Tingkat evaporasi yang cukup tinggi. Selain faktor iklim, kondisi fisik lingkungan di Nusa Tenggara dan Maluku juga berperan penting. Banyak wilayah yang memiliki tanah

berpasir, berbatu. Korelasi positif yang terdeteksi secara statistik lebih mewakili respons jangka pendek sistem hidrologi terhadap kejadian hujan, bukan peningkatan cadangan udara yang berkelanjutan. Dengan kata lain, hujan memang terjadi dan diukur, tetapi efisiensi penyimpanan udara sangat rendah karena kehilangan udara melalui evapotranspirasi dan limpasan berlangsung hampir seketika. Hal ini menegaskan bahwa di wilayah semi-kering seperti Nusa Tenggara dan Maluku, EWH lebih dikontrol oleh keseimbangan cepat antara input presipitasi dan kehilangan udara, bukan oleh akumulasi massa udara jangka panjang. Oleh karena itu, peningkatan curah hujan tidak selalu identik dengan peningkatan ketersediaan udara di daratan, suatu keharusan penting bagi pengelolaan sumber daya udara dan mitigasi kekeringan di kawasan tersebut. Sedangkan di Papua pola bias sangat bervariasi yaitu gabungan antara positif dan negatif. Bias negatif lebih dominan di wilayah barat dan di sisi lain beberapa wilayah di pesisir menunjukkan bias positif.

### 3.4 Peta sebaran RMSE

curah hujan CPC merepresentasikan input atmosfer langsung ke sistem hidrologi, sedangkan EWH mencerminkan hasil terintegrasi dari berbagai komponen penyimpanan udara, termasuk kelembaban tanah, udara permukaan, dan udara tanah, dengan karakteristik respon yang lebih lambat. Oleh karena itu, perbedaan antara kedua data ini tidak semata-mata mencerminkan kesalahan pengukuran, melainkan juga mencerminkan kompleksitas interaksi proses hidrologi dan atmosfer di wilayah Indonesia. Selain itu, perbedaan resolusi spasial dan sensitivitas kedua produk data berpotensi menghasilkan variasi RMSE yang cukup besar, khususnya di wilayah kepulauan dengan topografi kompleks.



Gambar 5. Peta spasial RMSE antara EWH dengan CPC

Peta yang ditampilkan gambar 5 merupakan visualisasi spasial dari nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) antara presipitasi CPC dengan data EWH. Indikator RMSE digunakan untuk menilai sejauh mana nilai estimasi variabel prediktor terhadap variabel target. RMSE antara kedua dataset dapat memvisualisasikan seberapa efektif data EWH dalam mempresentasikan variasi massa air total pada skala geografis. Pada gambar 5 pada peta skala warna menunjukkan dari warna merah muda (nilai error rendah) hingga merah tua pekat (nilai error tinggi). Distribusi warna bervariasi secara tidak merata di seluruh wilayah penelitian yang menunjukkan bahwa tingkat akurasi prakiraan tergantung pada tipe ZOM, topografi serta dinamika atmosfer regional. Beberapa pola terlihat lebih menonjol dan dapat diidentifikasi dengan cukup jelas. Sumatera bagian utara hingga

tengah menunjukkan konsentrasi titik berwarna merah tua hal ini menunjukkan di wilayah tersebut memiliki nilai kesalahan absolut yang relatif tinggi. Kondisi ini menjelaskan bahwa nilai massa air total EWH tidak terlalu sensitif terhadap variabilitas presipitasi. Wilayah Kalimantan bagian barat dan tengah menunjukkan nilai error menengah hingga tinggi mengindikasikan nilai EWH di wilayah ini mengalami beberapa keterbatasan. Wilayah lain dengan nilai error rendah terlihat di Nusa Tenggara, sebagian Jawa Timur, dan sebagian wilayah selatan Kalimantan dengan warna merah muda hingga oranye muda menunjukkan bahwa estimasi EWH cenderung lebih mendekati nilai presipitasi CPC. Sedangkan di wilayah timur seperti Sulawesi, Maluku dan Papua Barat memperlihatkan pola yang bervariasi menunjukkan EWH relatif mampu menangkap sebagian karakter presipitasi tetapi masih terdapat beberapa area dengan kesalahan signifikan. Secara keseluruhan pola sebaran peta RMSE menunjukkan akurasi presipitasi bergantung pada topografi dan tipe ZOM. Pola hujan homogen memberikan nilai error lebih rendah, sedangkan wilayah dengan dinamika atmosfer kompleks dan curah hujan tinggi menunjukkan error yang lebih besar. Data EWH dari GRACE memiliki resolusi spasial yang relatif kasar, yaitu pada skala beberapa ratus kilometer, sehingga sinyal massa udara yang terdeteksi merupakan hasil perataan garis pantai yang kompleks, topografi pegunungan yang tajam, serta perbedaan daratan dan laut yang ekstrem dalam jarak yang relatif pendek. Curah hujan di Indonesia sering kali bersifat sangat lokal dan dipengaruhi oleh proses orografis, konvergensi angin laut dan darat, serta sistem konvektif berskala kecil. Hujan lebat dapat terjadi secara intensif di wilayah pegunungan atau pesisir tertentu, namun tidak merata dalam satu jaringan GRACE. Akibatnya, kejadian hujan lokal yang disebabkan oleh produk presipitasi seperti CPC tidak selalu tercermin secara proporsional dalam sinyal EWH. Ketidaksesuaian skala spasial ini menyebabkan peningkatan RMSE, terutama di wilayah kepulauan, daerah pesisir, dan zona transisi antara dataran rendah dan pegunungan. sinyal GRACE cenderung lebih sensitif terhadap perubahan massa udara berukuran besar dan terintegrasi dalam waktu menengah hingga panjang, sementara hujan harian atau bulanan yang bersifat lokal dapat teredam. Oleh karena itu, variabilitas RMSE tidak sepenuhnya mencerminkan kesalahan data, melainkan lebih menunjukkan ketidakcocokan resolusi dan skala proses fisik antara pengamatan gravitasi satelit dan dinamika hujan tropis Indonesia.

#### **4. KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa nilai EWH signifikan di wilayah Aceh dan Sumatera Utara dengan tipe ZOM ekuatorial-1 dan ekuatorial-2. Hubungan antara kedua variabel menunjukkan hubungan negatif yang kuat antara ONI dengan EWH pada lag 0 menandakan bahwa pada fase *El Nino* cenderung menurunkan cadangan air di daratan. Nilai EWH cenderung lebih tinggi lebih tinggi dibandingkan dengan CPC di wilayah Sumatera dan Kalimantan, sedangkan bias positif dominan di wilayah Nusa Tenggara dan Maluku. RMSE mengungkapkan bahwa nilai EWH relatif lebih rendah di wilayah pola hujan homogen dan musiman dan meningkat secara signifikan di wilayah dengan variabilitas presipitasi tinggi seperti Sumatera dan Kalimantan. EWH dapat dimanfaatkan sebagai indikator alternatif dalam memprediksi pola musim di Indonesia.

#### **UCAPAN TERIMA KASIH**

Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika atas dukungan pendanaan yang telah diberikan.

## REFERENCES

- Abdelmohsen, K., Sultan, M., Save, H., Abotalib, A. Z., & Yan, E. (2020). What can the GRACE seasonal cycle tell us about lake-aquifer interactions?. *Earth-Science Reviews*, 211, 103392.
- Anjasmara, IM, & Kuhn, M. (2010). Menganalisis variasi tinggi air ekuivalen tenggang selama lima tahun menggunakan analisis komponen utama. Dalam *Gravity, Geoid and Earth Observation: IAG Commission 2: Gravity Field*, Chania, Crete, Greece, 23-27 Juni 2008 (hlm. 547-555). Springer Berlin Heidelberg.
- Chen, L., Han, B., Wang, X., Zhao, J., Yang, W., & Yang, Z. (2023). Machine learning methods in weather and climate applications: A survey. *Applied Sciences*, 13(21), 12019.
- Dickey, J.O., C.R. Bentley, R. Bilham, J.A. Carton, R.J. Eanes, T.A. Herring, W.M. Kaula, G.S.E. Lagerloef, S. Rojstaczer, W.H.F. Smith, H.M. van den Dool, J.M. Wahr, and M.T. Zuber. (1999). *Satellite Gravity and the Geosphere*. Washington, D.C: National Academy Press.
- Elsaka, B. (2021). Evaluation of Terrestrial Total Water Height Variations over the Nile River Basin Based on Two Full-Years of GRACE-FO Gravity Field Monthly Solutions. *Int. Res. J. Adv. Eng. Sci*, 6, 90-95.
- Frappart, F., & Ramillien, G. (2018). Monitoring groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission: A review. *Remote Sensing*, 10(6), 829.
- Gore, R. D., & Gawali, B. W. (2023, August). Analysis of weather parameters using machine learning. In *First International Conference on Advances in Computer Vision and Artificial Intelligence Technologies (ACVAIT 2022)* (pp. 569-589). Atlantis Press.
- Humphrey, V., Rodell, M., & Eicker, A. (2023). Using satellite-based terrestrial water storage data: a review. *Surveys in Geophysics*, 44(5), 1489-1517.
- Jia, Y., Lei, H., Yang, H., & Hu, Q. (2020). Terrestrial water storage change retrieved by GRACE and its implication in the Tibetan Plateau Estimating areal precipitation in Ungauged Region. *Remote Sensing*, 12(19), 3129.
- Jiang, Z., Hsu, Y. J., Yuan, L., Cheng, S., Li, Q., & Li, M. (2021). Estimation of daily hydrological mass changes using continuous GNSS measurements in mainland China. *Journal of Hydrology*, 598, 126349.
- Jiang, Z., Hsu, Y. J., Yuan, L., & Huang, D. (2021). Monitoring time-varying terrestrial water storage changes using daily GNSS measurements in Yunnan, southwest China. *Remote Sensing of Environment*, 254, 112249.
- Krasnoshchekov, K., Dergunov, A., & Ponomarev, E. (2020). Remote sensing data for assessing the equivalent water height (EWH) variety versus the level of forest disturbance in Central Siberia. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 223, p. 03007). EDP Sciences.
- Nogueira, M. (2020). Inter-comparison of ERA-5, ERA-interim and GPCP rainfall over the last 40 years: Process-based analysis of systematic and random differences. *Journal of Hydrology*, 583, 124632.
- Rahayu, S. Y., & Anjasmara, I. M. (2024). Variability of Equivalent Water Height (EWH) in Indonesia during 14 years of grace gravity satellite mission. *Geodesy and Cartography*, 50(1), 60-66.
- Rahayu, S. Y., & Anjasmara, I. M. (2021, June). Effects of Extreme Climate Change in 2016 and Its Correlation with EWH Variability in Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 799, No. 1, p. 012035). IOP Publishing.
- Rodell, M., & Reager, J. T. (2023). Water cycle science enabled by the GRACE and GRACE-FO satellite missions. *Nature Water*, 1(1), 47-59.

- Singh, A., Reager, J. T., & Behrangi, A. (2021). Estimation of hydrological drought recovery based on precipitation and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) water storage deficit. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(2), 511-526.
- Tapley, B. D., Watkins, M. M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., & Velicogna, I. (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature climate change*, 9(5), 358-369.
- Tapley, Byron D., et al.(2004).The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results." *Geophysical research letters* 31.9.
- Winarno, G. D., Harianto, S. P., & Santoso, R. (2019). *Klimatologi Pertanian*. Pusaka Media.