

Evaluasi Penggunaan Data GRACE untuk Mengestimasi Perubahan Simpanan Air Tanah di Pulau Jawa

Evaluation of GRACE Data Usage for Estimating Groundwater Storage Changes on Java Island

Lambok M. Hutasoit¹, Arifin^{1,2*}, Agus M. Ramdhan^{1,3}, dan Rusmawan Suwarman^{3,4}

¹Prodi Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha No. 10, Bandung, Indonesia.

²Departemen Geografi, University College London, United Kingdom.

³Prodi Teknik Air Tanah, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha No. 10, Bandung, Indonesia.

⁴Kelompok Keahlian Sains Atmosfer, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha No. 10, Bandung, Indonesia.

e-mail: arifin.arifin.22@ucl.ac.uk

Naskah diterima 2 Februari 2025, selesai direvisi 1 April 2025 dan disetujui 30 April 2025

ABSTRAK

Air tanah berperan penting sebagai sumber air tawar yang memiliki ketahanan terhadap perubahan iklim dibandingkan air permukaan. Untuk mengetahui apakah pemanfaatan air tanah dilakukan secara berkelanjutan, diperlukan data observasi perubahan simpanan air tanah (ΔGWS) dalam durasi waktu yang panjang. Namun, data pemantauan air tanah umumnya masih terbatas. *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) merupakan salah satu instrumen yang dapat digunakan untuk mengestimasi ΔGWS secara global. Adapun studi ini bertujuan untuk mengevaluasi penggunaan data simpanan air total (ΔTWS) dari GRACE dalam mengestimasi ΔGWS di Pulau Jawa selama periode April 2002 hingga September 2023. Nilai ΔGWS diperoleh sebagai komponen residu dengan mengurangi perubahan kelembapan tanah (ΔSMS) dan simpanan air permukaan (ΔSWS) dari ΔTWS . Hasil analisis menunjukkan variabilitas ΔTWS dengan anomali positif mengindikasikan peningkatan simpanan air dan anomali negatif yang menandakan penurunan simpanan air. ΔTWS rata-rata gabungan berfluktuasi antara -12,4 hingga 12,8 cm dengan tren tahunan sebesar 0,3 cm/tahun. Dari lima kombinasi perhitungan, proporsi ΔGWS yang logis berkisar antara 58 hingga 76%, dengan nilai ΔGWS rata-rata gabungan antara -9,7 hingga 11,1 cm dan tren sebesar 0,2 cm/tahun. Analisis statistik menunjukkan korelasi yang relatif lemah antara ΔTWS , ΔGWS , indeks *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO) dan *Indian Ocean Dipole* (IOD), serta curah hujan. Sebagai contoh, ΔGWS pada area Jakarta memiliki korelasi yang relatif rendah dengan data muka air tanah, dimana hal ini mengindikasikan perbedaan antara dinamika simpanan air tanah secara regional yang dideteksi oleh GRACE dan respons akuifer secara lokal yang mungkin dipengaruhi oleh heterogenitas akuifer dan pengambilan air tanah. Studi ini menekankan pentingnya jaringan pemantauan air tanah yang ekstensif di Indonesia, termasuk di Pulau Jawa, untuk mendukung kebijakan berbasis data dan mencegah pengambilan air tanah secara berlebihan.

Kata kunci: simpanan airtanah, akuifer, perubahan iklim, pemantauan air tanah

ABSTRACT

Groundwater plays an important role as a freshwater source and offers greater resilience to climate change compared to surface water. To determine whether groundwater use is being carried out sustainably, long-term observational data on groundwater storage changes (ΔGWS) are required. However, groundwater monitoring data remain generally limited. The *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) is one of the tools used to estimate global ΔGWS . This study aims to evaluate the use of total water storage (ΔTWS) data from GRACE to estimate ΔGWS on Java Island from April 2002 to September 2023. ΔGWS is obtained as a residual component by subtracting soil moisture changes (ΔSMS) and surface water storage (ΔSWS) from ΔTWS . The results show variability in ΔTWS , with positive

anomalies indicating increased water storage and negative anomalies reflecting declines. The ensemble mean ΔTWS fluctuated between -12.4 cm and 12.8 cm with an annual trend of 0.3 cm/year. Among the five calculation combinations tested, the proportion of plausible ΔGWS values ranged from 58 to 76%, with ensemble mean ΔGWS values ranging from -9.7 cm to 11.1 cm and an annual trend of 0.2 cm/year. Statistical analysis reveals relatively weak correlations between ΔTWS , ΔGWS , the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and Indian Ocean Dipole (IOD) indices, as well as precipitation. As an example, ΔGWS exhibited low correlations with groundwater level data in Jakarta, suggesting differences between the regional groundwater storage dynamics captured by GRACE and localized aquifer responses. These differences may be attributed to aquifer heterogeneity and groundwater abstraction. This study highlights the urgent need to establish an extensive groundwater monitoring network across Indonesia, including Java Island, to support data-driven policy development and prevent groundwater overabstraction.

Keywords: groundwater storage, aquifer, climate change, groundwater monitoring

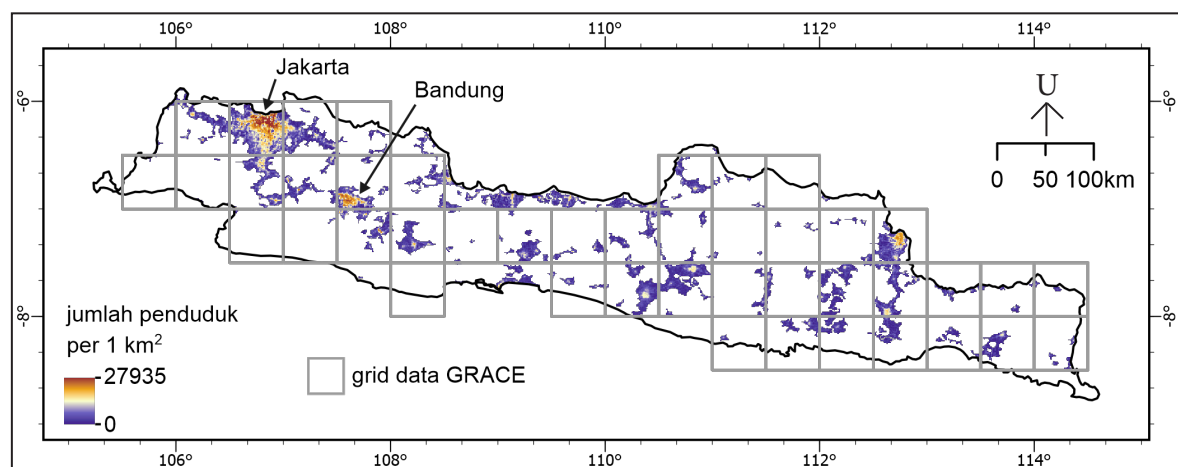
PENDAHULUAN

Air tanah merupakan sumber air tawar yang sangat penting dan memiliki ketahanan terhadap perubahan iklim (Cuthbert drr., 2019; Taylor drr., 2013). Secara global, air tanah diperkirakan menyuplai sekitar sepertiga kebutuhan irigasi dan air minum (Müller Schmied drr., 2021). Meskipun demikian, pengambilan air tanah secara berlebihan pada beberapa wilayah di dunia telah menyebabkan penurunan muka air tanah yang signifikan (Bierkens dan Wada, 2019; Jasechko drr., 2024).

Pemahaman terkait respons simpanan air tanah terhadap variabilitas dan perubahan iklim diperlukan untuk mengevaluasi ketahanan sumber daya air tanah dalam memenuhi kebutuhan air yang semakin meningkat. Namun, pemahaman ini masih sangat terbatas di Indonesia, termasuk di Pulau Jawa karena jaringan pemantauan air tanah yang masih minim. Pulau Jawa memiliki

kepadatan penduduk terbesar di Indonesia, mencapai 27.935 orang per km² (Gambar 1). Kebutuhan air tawar di Pulau Jawa diperkirakan akan terus meningkat seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk, dimana hal ini dapat menyebabkan peningkatan pengambilan air tanah untuk kebutuhan domestik, industri, maupun pertanian melalui pengeboran sumur air tanah (Grönwall dan Danert, 2020). Oleh karena itu, perubahan simpanan air tanah (ΔGWS) secara spasial dan temporal perlu dievaluasi untuk mendukung pemanfaatan air tanah yang berkelanjutan (Cuthbert drr., 2023).

Meskipun memiliki keterbatasan dalam hal skala, kemajuan teknologi penginderaan jauh berbasis satelit dapat dimanfaatkan untuk pemantauan ΔGWS menggunakan data satelit *Gravity Recovery and Climate Experiment/-Follow On* (GRACE/-FO). GRACE telah diaplikasikan untuk menganalisis perubahan



Gambar 1. Peta yang menunjukkan estimasi jumlah penduduk di Pulau Jawa per 1 km² tahun 2025 (Bondarenko drr., 2025) dan grid data GRACE yang digunakan.

Δ GWS, baik pada skala global (Ndehedehe drr., 2023; Shamsudduha dan Taylor, 2020; Thomas drr., 2017) maupun skala yang lebih regional atau lokal (Asoka drr., 2017; Rodell drr., 2009; Zhang drr., 2024). GRACE mendeteksi variasi medan gravitasi Bumi yang merepresentasikan perubahan simpanan air total atau Δ TWS (Landerer dan Swenson, 2012). Δ TWS mencakup perubahan kelembapan tanah, air permukaan, salju, air tanah, dan kandungan air vegetasi. Data satelit GRACE memungkinkan estimasi perubahan simpanan air tanah (Δ GWS) sebagai komponen residu.

Variabilitas iklim secara umum berpengaruh terhadap Δ TWS (Scanlon drr., 2022). *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO) merupakan salah satu kondisi iklim yang memengaruhi pola curah hujan dan tingkat evapotranspirasi (Gu dan Adler, 2019; Xu drr., 2004). ENSO dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu *El Niño* (fase hangat) dan *La Niña* (fase dingin). *El Niño* umumnya memicu kondisi lebih kering dari normal di wilayah Asia Tenggara, sementara *La Niña* menghasilkan efek sebaliknya (Generoso drr., 2020; Wang drr., 2014).

Studi ini menganalisis apakah data satelit GRACE dapat menghasilkan variabilitas simpanan air tanah (Δ GWS) yang secara fisik atau hidrologi logis untuk Pulau Jawa. Studi ini juga mengevaluasi hubungan antara Δ TWS, Δ GWS, curah hujan, indeks ENSO dan *Indian Ocean Dipole* (IOD). Tujuannya adalah untuk mengevaluasi batas kemampuan GRACE dalam konteks pemantauan air tanah, terutama di wilayah dengan kepadatan penduduk dan pemanfaatan air tanah yang relatif tinggi seperti Jakarta.

METODE PENELITIAN

Data perubahan simpanan air total (Δ TWS) bulanan dari tahun 2002 hingga 2023 diperoleh dari satelit GRACE. Δ TWS tersebut terdiri dari empat kelompok, yaitu COST-G, GSFC, JPL, dan CSR. Data GRACE COST-G diperoleh dari GFZ Data Services (Boergens drr., 2020; Dahle

drr., 2025). GRACE GSFC dan JPL (Landerer drr., 2020; Loomis drr., 2019; Watkins drr., 2015; Wiese drr., 2016; Wiese drr., 2023) disediakan oleh NASA. Adapun GRACE CSR (Save, 2020; Save drr., 2016) diperoleh dari Center for Space Research (CSR) University of Texas at Austin. GRACE JPL, CSR, dan GSFC yang digunakan mengaplikasikan blok konsentrasi massa (*mascon*) sedangkan GRACE COST-G berbasis solusi harmonik *spherical*. Berdasarkan data GRACE COST-G, data Δ TWS pada studi ini secara konsisten merupakan perubahan simpanan air total relatif terhadap nilai rata-rata periode April 2002 hingga Desember 2020.

GRACE COST-G yang tersedia memiliki resolusi 1°. Meskipun data GRACE *mascon* tersedia dengan resolusi spasial yang cukup tinggi (0,25° GRACE CSR; 0,5° GRACE JPL dan GSFC), resolusi spasial yang sebenarnya tetap jauh lebih kasar karena keterbatasan mendasar pada sensor GRACE, karakteristik *noise*, serta teknik *smoothing* yang diterapkan selama pemrosesan data GRACE (Vishwakarma drr., 2021). Untuk mengompensasi pelemahan sinyal pada skala yang lebih kecil, GRACE JPL menyediakan faktor penguat (*gain factor*) yang diperoleh berdasarkan *Community Land Model* (CLM) untuk menyesuaikan nilai Δ TWS dan memperkuat sinyal yang berkurang pada resolusi yang lebih besar. Namun, faktor penguat ini hanya valid digunakan pada area daratan *non-glaciated* dan harus diterapkan secara manual pada data JPL (Wiese drr., 2016). Sebaliknya, data GRACE CSR, GSFC, serta COST-G telah melalui pra-pemrosesan sehingga pengguna tidak perlu menerapkan faktor penguat seperti pada GRACE JPL (Loomis drr., 2019; Save drr., 2016).

Studi ini menggunakan data perubahan kelembapan tanah (Δ SMS) dan air permukaan (Δ SWs) yang tersedia pada portal <https://gravis.gfz.de/tws> (Dahle drr., 2025). Konsisten dengan data Δ TWS, kedua data ini juga memiliki nilai yang relatif terhadap rata-rata periode April 2002 hingga Desember 2020. Perubahan simpa-

nan air tanah (ΔGWS) dihitung menggunakan persamaan (1):

$$\Delta GWS = \Delta TWS - (\Delta SMS + \Delta SWS) \dots\dots\dots (1)$$

Dengan mengurangi nilai ΔSMS dan ΔSWS dari ΔTWS , ΔGWS mengisolasi simpanan air tanah sebagai komponen residu neraca air. Adapun komponen simpanan salju bernilai nol, sedangkan simpanan air vegetasi dapat diabaikan (Arifin drr., 2025).

Studi ini menggunakan metode regresi Theil-Sen (Sen, 1968) untuk menghitung nilai tren ΔTWS dan ΔGWS tahunan. Tren tersebut dihitung dengan terlebih dahulu mengagregasikan perubahan simpanan bulanan menjadi rata-rata tahunan untuk meminimalkan efek musiman. Kemudian, uji Mann-Kendall digunakan untuk mengevaluasi signifikansi statistik tren yang diperoleh (Mann, 1945).

Studi ini juga menggunakan data presipitasi bulanan global Climatic Research Unit (CRU) versi 4.09 (Harris drr., 2020), dua indikator ENSO (*Multivariate ENSO Index* (MEI) dan *Oceanic Niño Index* (ONI)), serta satu indikator IOD (*Dipole Mode Index* (DMI)). Nilai MEI yang lebih besar dari 0,5 menunjukkan kondisi *El Niño*, sedangkan nilai yang lebih kecil dari -0,5 menunjukkan kondisi *La Niña* (Kiem dan Franks, 2001). Sementara itu, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) mendefinisikan peristiwa *El Niño* atau *La Niña* sebagai kondisi ketika nilai ONI melampaui $\pm 0,5^\circ\text{C}$ selama sedikitnya lima bulan berturut-turut. Adapun DMI merupakan indikator standar untuk mengukur IOD yang dihitung sebagai selisih anomali temperatur permukaan laut (SST) Samudra Hindia bagian barat dan tenggara (Saji drr., 1999). IOD memiliki dua fase: fase positif ditandai dengan SST yang lebih hangat di Samudra Hindia bagian barat dan lebih dingin di bagian timur; fase negatif menunjukkan pola sebaliknya. Indeks ENSO dan IOD yang digunakan dalam studi ini diperoleh dari portal NOAA Physical Sciences Laboratory (PSL), yaitu <https://psl.noaa.gov/>.

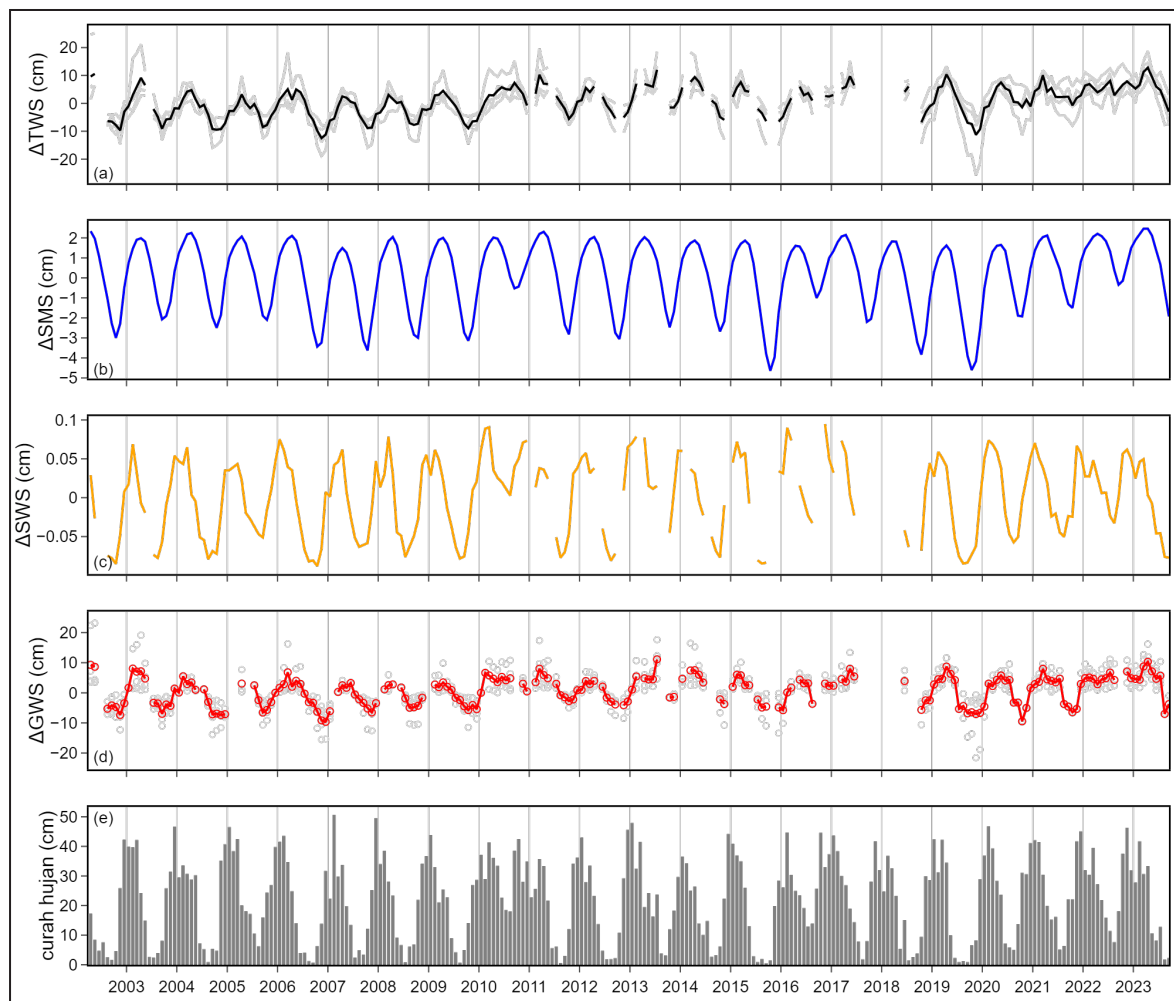
HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai rata-rata simpanan air total (ΔTWS) untuk Pulau Jawa menunjukkan variasi temporal yang substansial pada periode April 2002 hingga September 2023 (Gambar 2). Fluktuasi ini ditandai oleh anomali positif yang mengindikasikan peningkatan simpanan air dan anomali negatif yang menandakan periode penurunan simpanan air. Nilai rata-rata gabungan ΔTWS (*ensemble mean*) dari empat data GRACE (COST-G, GSFC, JPL, dan CSR) berkisar antara -12,4 hingga 12,8 cm. Adapun perubahan komponen kelembapan tanah (ΔSMS) berkisar antara -4,6 hingga 2,5 cm, lebih dominan dibandingkan perubahan air permukaan yang hanya berkisar -0,1 hingga 0,1 cm (Gambar 2).

Analisis tren tahunan ΔTWS menunjukkan variasi antar data GRACE (Gambar 3), dengan tren ΔTWS rata-rata gabungan sebesar 0,3 cm/tahun ($p < 0,05$). Pada resolusi grid $0,5^\circ$ (Gambar 3a, b, dan c), tren tahunan ΔTWS bervariasi antara -0,6 (GSFC) hingga 2,3 (JPL) cm/tahun. Pada resolusi spasial yang lebih halus (CSR: $0,25^\circ$), tren tahunan ΔTWS berkisar antara 0,1 hingga 0,6 cm/tahun. Gambar 3 mengindikasikan anomali positif ΔTWS paling signifikan pada data GRACE JPL, sedangkan anomali negatif paling signifikan pada data GRACE GSFC.

Sebagai parameter residu (Persamaan 1), nilai ΔGWS sangat dipengaruhi oleh nilai ΔTWS , ΔSMS , dan ΔSWS . Perbedaan yang substansial antara ketiga komponen tersebut dapat menimbulkan masalah aritmetika sebagaimana dilaporkan oleh Shamsudduha dan Taylor (2020). Model ΔSMS dan ΔSWS memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan secara akurat perubahan simpanan air pada masing-masing komponen sehingga dapat menyimpang dari batasan nilai ΔTWS (Scanlon drr., 2018). Diskrepansi antar komponen simpanan air akan memengaruhi komputasi ΔGWS dari ΔTWS .

Studi ini mengaplikasikan kriteria dari Arifin drr. (2025) untuk mengevaluasi apakah nilai ΔGWS yang diperoleh logis atau tidak. Sebagai contoh (Tabel 1), pada musim hujan, ΔTWS

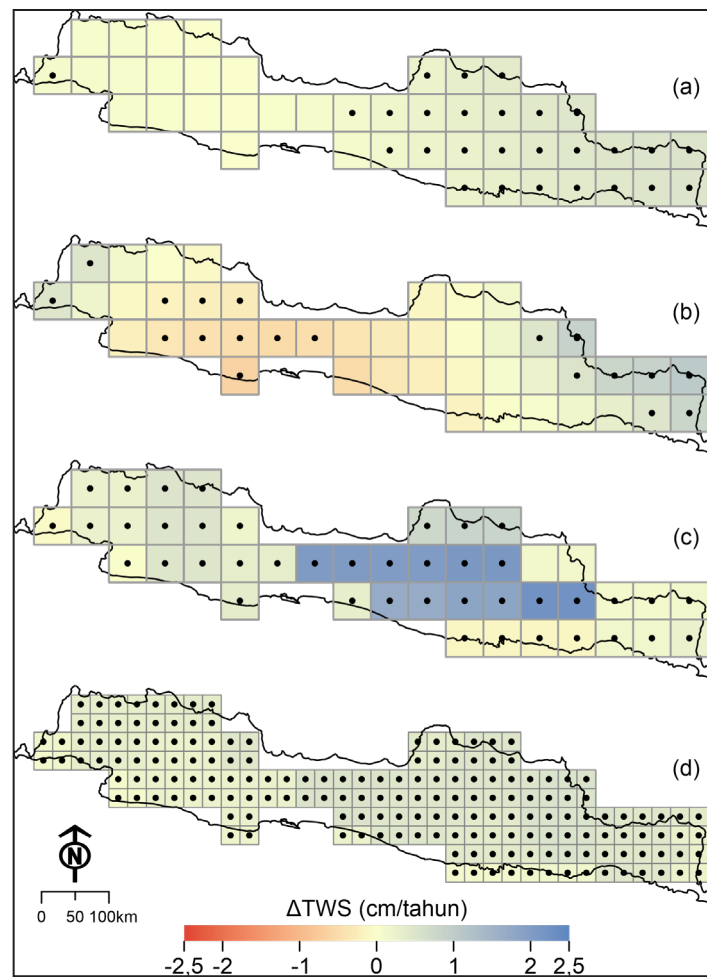


Gambar 2. (a) Plot rata-rata gabungan (*ensemble mean*) ΔTWS (garis hitam), (b) ΔSMS (garis biru), dan (c) ΔSWS (garis oranye). Plot (d) menampilkan ΔGWS rata-rata yang logis (garis dan lingkaran merah) dari total lima kombinasi perhitungan (lingkaran abu-abu). Plot (e) menunjukkan curah hujan rata-rata bulanan. Garis abu-abu pada plot (a) menunjukkan ΔTWS dari masing-masing data GRACE.

pada Maret 2005 adalah 0,19 cm, sedangkan ΔSMS 1,86 cm dan ΔSWS 0,04 cm. Ketiga nilai tersebut menghasilkan ΔGWS sebesar -1,71 cm yang mengindikasikan defisit simpanan air tanah, dimana hal ini tidak logis terjadi pada musim hujan. Sebaliknya, pada Agustus 2006 ketika presipitasi hanya bernilai satu cm, ΔTWS bernilai -0,82 cm, ΔSMS -1,35 cm, dan ΔSWS -0,08 cm. Meskipun terjadi defisit air secara keseluruhan, ΔGWS bernilai positif sebesar 0,61 cm, dimana hal ini tidak logis. Contoh pada Tabel 1 menunjukkan ketidakpastian dalam estimasi ΔGWS , terutama ketika menggunakan kombinasi dari data tertentu. Estimasi ΔGWS yang tidak logis mencerminkan inkonsistensi

antara data ΔTWS dari GRACE serta komponen ΔSMS dan ΔSWS dari model yang digunakan.

Studi ini menganalisis lima kombinasi perhitungan ΔGWS berdasarkan lima data ΔTWS (COST-G, GSFC, JPL, CSR, dan rata-rata gabungan), satu data ΔSMS , dan satu data ΔSWS . Hasil analisis menunjukkan proporsi estimasi ΔGWS berbasis GRACE yang logis untuk masing-masing kombinasi berkisar antara 58 hingga 76% (rata-rata = 69%), dimana nilai ΔGWS yang tidak logis tidak bersifat musiman, melainkan dapat terjadi pada bulan Januari hingga Desember yang tersebar sepanjang periode analisis (April 2002 hingga September 2023). Dengan menggabungkan nilai ΔGWS yang logis dari masing-masing



Gambar 3. Perbandingan tren ΔTWS tahunan dari data GRACE: (a) COST-G, (b) GSFC, (c) JPL, dan (d) CSR. Titik hitam menunjukkan tren dengan nilai $p < 0,05$ yang menandakan signifikansi statistik.

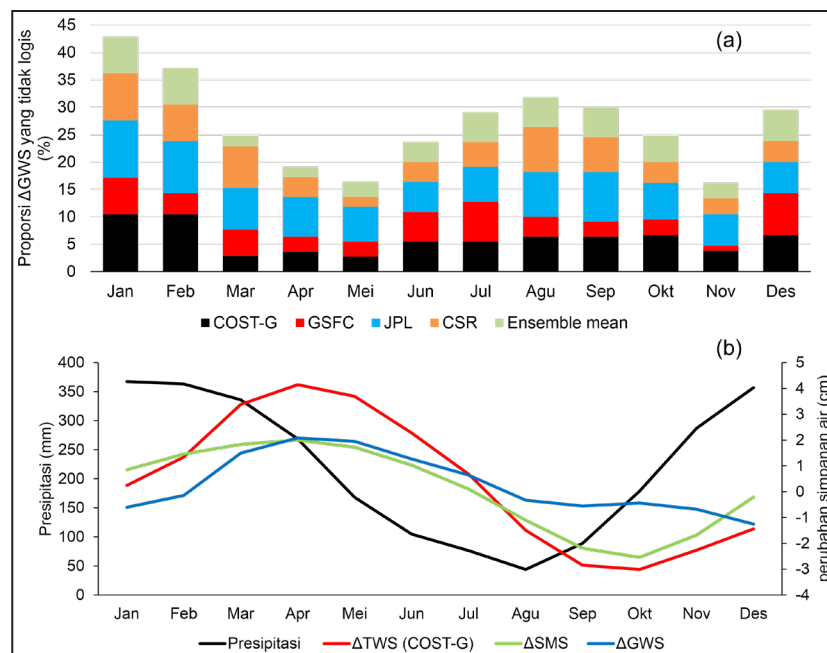
Tabel 1. Contoh estimasi ΔGWS yang tidak logis berdasarkan perbandingan antara ΔTWS , ΔSMS , dan ΔSWS

Periode	Curah hujan bulanan (cm)	ΔTWS (cm)	ΔSMS (cm)	ΔSWS (cm)	ΔGWS (cm)
Maret 2005	42	0,19	1,86	0,04	-1,71
Agustus 2006	1	-0,82	-1,35	-0,08	0,61
Oktober 2013	12	-0,27	-2,47	-0,05	2,24
Januari 2023	28	0,14	1,89	0,02	-1,77

kombinasi, diperoleh persentase ΔGWS total yang logis sebesar 92% (Gambar 2d) dengan nilai ΔGWS yang berkisar antara -9,7 hingga 11,1 cm dan tren tahunan sebesar 0,2 cm/tahun ($p < 0,05$). Nilai ΔGWS rata-rata yang secara fisik logis memiliki korelasi yang sangat tinggi dengan ΔTWS ($r = 0,92$).

Di antara lima kombinasi yang digunakan dalam studi ini, rata-rata 31% ΔGWS per kombinasi

tidak logis. Secara umum, ΔGWS yang tidak logis ditemukan paling dominan pada Bulan Januari dengan persentase total mencapai 43% (Gambar 4a). Contoh kombinasi nilai rata-rata ΔTWS dari GRACE COST-G dengan ΔSMS pada Gambar 4b menunjukkan bahwa nilai ΔSMS lebih positif dari ΔTWS pada musim hujan. Hal ini mengakibatkan ΔGWS bernilai negatif dan tidak logis. Nilai ΔGWS yang tidak



Gambar 4. (a) Proporsi ΔGWS yang tidak logis per bulan dari lima kombinasi berdasarkan lima data ΔTWS dari GRACE. (b) Contoh plot nilai rata-rata presipitasi, ΔTWS dari COST-G, ΔSMS , dan ΔGWS .

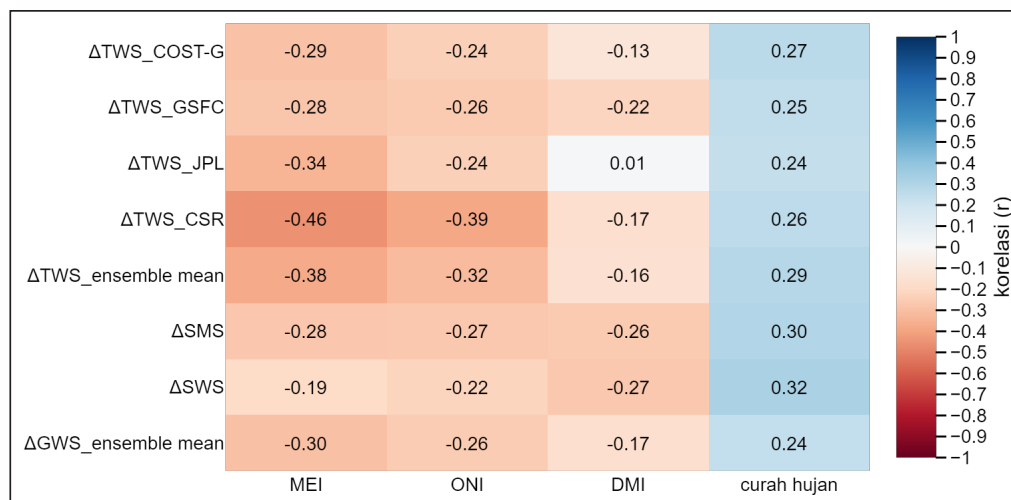
logis ini tidak hanya merupakan anomali aritmetika, tetapi indikasi kualitas data yang buruk atau tidak konsisten, terutama ketika nilai ΔSMS dan ΔSWS menyimpang melebihi ΔTWS dari GRACE (Scanlon dr., 2018).

Data yang digunakan dalam perhitungan ΔGWS sebagai parameter residu memiliki keterbatasan bawaan dan ketidakpastian. ΔTWS dari GRACE terpengaruh oleh atenuasi sinyal dan kebocoran spasial melalui proses penyaringan (Vishwakarma dr., 2016; Vishwakarma dr., 2018). Kemudian, komponen simpanan air individu seperti kelembapan tanah dan air permukaan pada dasarnya memiliki ketidakpastian, terutama di wilayah yang minim data (Scanlon dr., 2018). Ketidakpastian antara ΔTWS dan komponen ΔSMS serta ΔSWS hasil model secara langsung memengaruhi estimasi ΔGWS yang dapat menghasilkan nilai yang logis atau tidak realistis secara fisik, sebagaimana dilaporkan sebelumnya oleh Shamsudduha dan Taylor (2020). Studi ini menekankan pentingnya untuk menyaring nilai ΔGWS yang tidak logis karena dapat menghasilkan kesalahan interpretasi terkait kondisi air tanah. Selain itu, nilai ΔTWS

pada daerah pesisir dengan luas area di bawah resolusi minimum data GRACE rentan dipengaruhi oleh kebocoran sinyal dari laut akibat proses penyaringan (Vishwakarma dr., 2016; Vishwakarma dr., 2018).

Korelasi antara nilai rata-rata gabungan (*ensemble mean*) ΔTWS , ΔSMS , ΔSWS , dan ΔGWS dengan dua indeks ENSO (MEI dan ONI) dan satu indeks IOD (DMI) serta curah hujan di Pulau Jawa dihitung untuk mengevaluasi sensitivitas perubahan simpanan air terhadap kondisi iklim. Gambar 5 menunjukkan bahwa ΔTWS dari seluruh produk GRACE memiliki korelasi yang relatif rendah dengan indeks ENSO maupun IOD, dengan nilai r berkisar antara -0,28 hingga -0,46 untuk MEI; -0,24 hingga -0,39 untuk ONI; dan 0,01 hingga -0,27 untuk DMI. Adapun rata-rata gabungan ΔTWS menghasilkan korelasi -0,38 (MEI), -0,32 (ONI), dan -0,16 (DMI). Nilai korelasi tersebut menunjukkan bahwa variabilitas ΔTWS lebih dipengaruhi oleh ENSO dibandingkan IOD.

ΔSMS dan ΔSWS menunjukkan sensitivitas terhadap ENSO yang lebih lemah daripada ΔTWS , dengan nilai korelasi berkisar antara



Gambar 5. Korelasi antara nilai rata-rata Δ TWS, Δ SMS, Δ SWS, dan Δ GWS dengan indeks ENSO (MEI dan ONI) dan IOD (DMI) serta curah hujan.

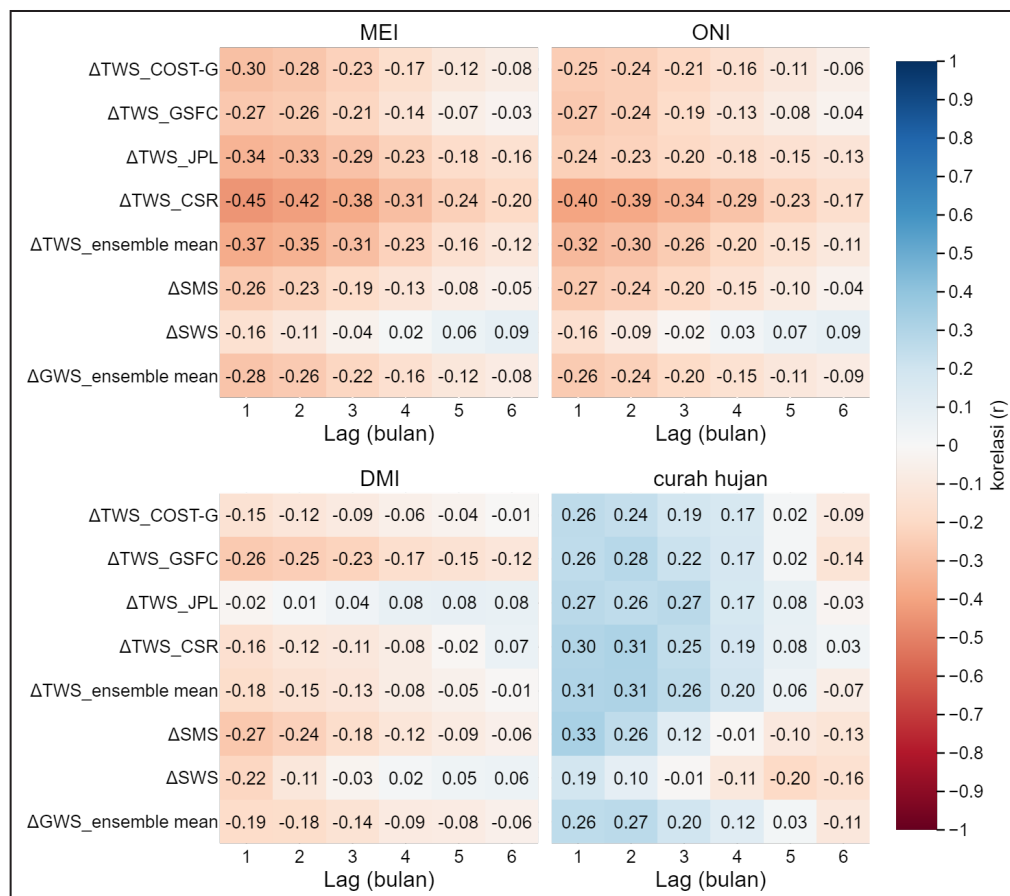
-0,19 hingga -0,28. Curah hujan rata-rata bulanan juga memiliki korelasi yang rendah dengan Δ TWS, Δ SMS, maupun Δ SWS, dengan nilai r berkisar antara 0,24 hingga 0,32. Adapun Δ GWS rata-rata gabungan juga memiliki korelasi yang rendah dengan indeks ENSO dan IOD. Nilai r yaitu sebesar -0,3 (MEI), -0,26 (ONI), dan -0,17 (DMI). Korelasi Δ GWS dan curah hujan bulanan juga rendah ($r = 0,24$).

Tidak terdeteksi efek *lag* yang signifikan antara Δ TWS, Δ SMS, Δ SWS, dan Δ GWS dengan indeks ENSO, IOD, maupun curah hujan. *Lag* sebesar satu hingga enam bulan secara konsisten memperlemah nilai korelasi (Gambar 6). Misalnya, korelasi antara MEI dan Δ TWS rata-rata gabungan menurun dari -0,37 pada *lag* satu bulan menjadi -0,12 pada *lag* enam bulan. Hal tersebut mengindikasikan bahwa perubahan simpanan air di Pulau Jawa relatif sensitif terhadap kondisi ENSO dan perubahan curah hujan secara temporal. Hal ini konsisten hasil studi sebelumnya oleh Liu dr. (2020) yang melaporkan tidak ada *lag* signifikan antara Δ TWS dan indeks ENSO di wilayah Indonesia.

Tantangan utama dalam menggunakan GRACE untuk memantau dinamika air tanah adalah resolusi spasialnya yang kasar ($\geq 90.000 \text{ km}^2$) sehingga membatasi kemampuannya untuk mendeteksi fluktuasi muka air tanah yang ber-

sifat lokal (Alley dan Konikow, 2015; Loomis dr., 2019; Tapley dr., 2004). Akibatnya, nilai Δ GWS mungkin berbeda dari data observasi muka air tanah in situ, terutama di wilayah dengan pengambilan air tanah yang signifikan (Asoka dr., 2017; Shamsudduha dan Taylor, 2020). GRACE menangkap sinyal perubahan simpanan air, namun tidak memiliki resolusi vertikal atau tidak membedakan sinyal dari akuifer dangkal (tidak tertekan) dan dalam (tertekan) (Mohamed dr., 2017). Artinya, apakah respons Δ GWS merepresentasikan akuifer dangkal atau dalam ditentukan oleh perubahan simpanan air pada kedua akuifer tersebut. Meskipun demikian, perubahan simpanan air yang ditangkap oleh GRACE kemungkinan didominasi oleh akuifer tidak tertekan karena perubahan volume pada akuifer dalam yang tertekan akan sangat kecil disebabkan oleh nilai storativitas akuifer tertekan yang jauh lebih kecil dibandingkan akuifer tidak tertekan (Alley dan Konikow, 2015).

Storativitas akuifer tertekan (S) sangat bervariasi, yaitu dari 10^{-6} hingga 0,02 (rata-rata 3×10^{-4}) untuk akuifer tertekan dengan ketebalan sekitar 10 m (Kuang dr., 2020); untuk akuifer tidak tertekan, storativitas (S_y) berkisar antara 0,01 hingga 0,4 dengan rata-rata sekitar 0,2 (Batu, 1998). Ketidakpastian ini menghasilkan rentang nilai Δ GWS yang sangat lebar. Sebagai



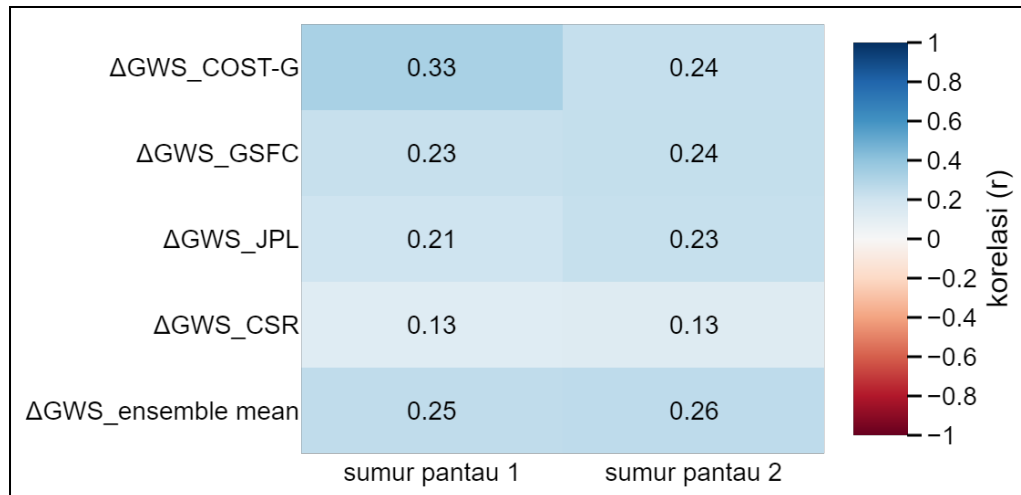
Gambar 6. Korelasi antara nilai rata-rata Δ TWS, Δ SMS, Δ SWS, dan Δ GWS dengan indeks ENSO (MEI dan ONI) dan IOD (DMI) serta curah hujan dengan efek lag.

contoh, penurunan muka air tanah sebesar 1 m setara dengan penurunan simpanan air sebesar 10^{-4} cm pada akuifer tertekan ($S = 10^{-6}$) atau hingga 40 cm pada akuifer tak tertekan ($S_y = 0,4$). Secara rata-rata, akuifer tertekan menghasilkan perubahan simpanan sekitar 0,3 mm per meter penurunan muka air tanah ($S = 3 \times 10^{-4}$), sedangkan akuifer tidak tertekan menghasilkan sekitar 20 cm ($S_y = 0,2$). Meskipun nilai korelasi tidak terpengaruh oleh ketidakpastian ini, amplitudo Δ GWS hasil estimasi GRACE tetap memiliki ketidakpastian yang tinggi tanpa nilai storativitas yang akurat.

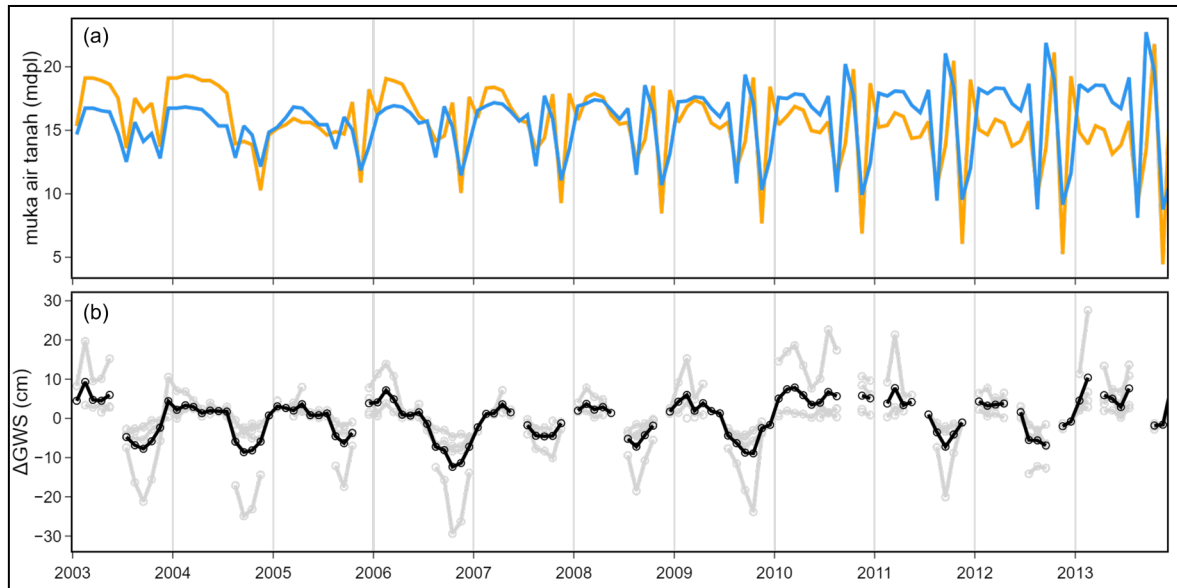
Sebagai contoh, hasil estimasi Δ GWS dari GRACE dibandingkan dengan data perubahan muka air tanah yang tersedia di Jakarta pada dua titik pemantauan akuifer dangkal dengan kedalaman kurang dari 40 m (Lestari drr., 2020). Jakarta merupakan salah satu kota yang meng-

hadapi permasalahan penurunan muka air tanah dan tanah (Kagabu drr., 2010). Secara umum, akuifer dangkal (zona 1) disusun oleh litologi endapan aluvial dan batupasir Formasi Citalang yang relatif permeabel (Fachri drr., 2002). Korelasi antara Δ GWS dengan nilai yang logis dan elevasi muka air tanah pada kedua sumur pantau relatif rendah, berkisar antara 0,13 hingga 0,33 (Gambar 7 dan 8). Hal ini mengindikasikan perbedaan antara dinamika simpanan air tanah secara regional dan respons akuifer secara lokal. Δ GWS dari GRACE mencerminkan dinamika simpanan air tanah pada skala regional, sedangkan elevasi muka air tanah bersifat lokal dan mungkin dipengaruhi oleh heterogenitas akuifer dan pengambilan air tanah.

Studi ini menemukan limitasi Δ GWS dari GRACE karena Δ GWS diestimasi sebagai komponen residu dari selisih antara Δ TWS



Gambar 7. Korelasi antara ΔGWS dengan elevasi muka air tanah pada dua sumur pantau di Jakarta.



Gambar 8. (a) Plot elevasi muka air tanah (meter di atas permukaan laut (mdpl)) pada sumur pantau 1 (oranye) dan sumur pantau 2 (biru) berdasarkan data dari Lestari dr. (2020). (b) Plot ΔGWS , dimana garis dan lingkaran hitam menunjukkan nilai rata-rata gabungan (*ensemble mean*), sedangkan garis dan lingkaran abu-abu menunjukkan ΔGWS yang dihitung dari masing-masing data GRACE COST-G, GSFC, JPL, dan CSR.

dari GRACE dan komponen simpanan air lainnya pada Persamaan (1). Karena ΔGWS tidak diukur secara langsung oleh satelit, melainkan diperkirakan melalui perhitungan neraca air, akurasi sangat bergantung pada nilai ΔTWS dan komponen simpanan air lainnya, dalam hal ini kelembapan tanah (ΔSMS) dan air permukaan (ΔSWS). ΔSMS memberikan pengaruh paling besar terhadap ΔTWS pada studi ini, sementara kontribusi ΔSWS dapat diabaikan

(Gambar 2c). Karena ΔGWS dihitung sebagai residu, diskrepansi antara ΔTWS dan ΔSMS memengaruhi estimasi ΔGWS secara langsung (Shamsudduha dan Taylor, 2020), seperti yang dapat diamati pada Tabel 1.

Ketidakpastian perhitungan juga dapat disebabkan oleh komponen simpanan air permukaan (ΔSWS). ΔSWS yang tersedia mungkin tidak sepenuhnya memperhitungkan badan air (sungai, danau, waduk, dan lahan basah), dimana

hal ini berpotensi menyebabkan nilai Δ SWS yang jauh lebih rendah dibandingkan Δ TWS (Getirana drr., 2017; Scanlon drr., 2019; Shamsudduha drr., 2012). Keterbatasan ini sangat penting di wilayah tropis, contohnya Cekungan Amazon di mana simpanan air permukaan dapat berkontribusi hingga ~27% dari total variasi Δ TWS (Getirana drr., 2017).

Pembangunan jaringan pemantauan air tanah yang ekstensif di Indonesia, termasuk di Pulau Jawa, diperlukan untuk mengevaluasi dan mendukung pengambilan air tanah secara berkelanjutan. Sistem pemantauan sebaiknya mencakup jaringan sumur pantau dengan kedalaman bervariasi, mencakup akuifer tidak tertekan dan akuifer tertekan pada setiap unit hidrostratigrafi, contohnya hingga kedalaman 300 m untuk Jakarta berdasarkan Fachri drr. (2002). Distribusi spasial jaringan pantau idealnya tidak hanya mempertimbangkan luas area pemantauan, tetapi juga tingkat pengambilan air tanah seperti pada kawasan industri, pertanian yang intensif, dan perkotaan besar. Ketiga kawasan tersebut membutuhkan jaringan pemantauan air tanah yang lebih rapat (misalnya satu sumur per 25-50 km²) dibandingkan dengan wilayah dengan kepadatan penduduk dan pemanfaatan air tanah yang rendah (misalnya satu sumur per 200-500 km²). Pemantauan terhadap muka air tanah dan kualitas air perlu dilakukan secara berkala (sebaiknya minimal dalam skala bulanan). Sistem pemantauan air tanah yang ekstensif memungkinkan deteksi dini untuk menghindari penurunan muka air tanah yang signifikan serta mendukung kebijakan berbasis data untuk mencegah pengambilan air tanah secara berlebihan. Sistem ini sangat penting untuk wilayah dengan akuifer yang heterogen dan pengaruh antropogenik (seperti pengambilan air tanah) yang menimbulkan variasi muka air tanah yang besar dan tidak dapat dideteksi dengan baik oleh satelit GRACE yang beroperasi pada skala yang bersifat regional. Hal tersebut membatasi penggunaan Δ GWS berbasis GRACE untuk mendeteksi fluktuasi air tanah yang bersifat lokal.

KESIMPULAN

Studi ini mengevaluasi penggunaan data satelit GRACE untuk mengestimasi perubahan simpanan air tanah (Δ GWS) di Pulau Jawa. Pada periode April 2002 hingga September 2023, nilai simpanan air total (Δ TWS) berfluktuasi, ditandai oleh anomali positif yang mengindikasikan peningkatan simpanan air dan anomali negatif yang menandakan periode penurunan simpanan air dengan nilai rata-rata gabungan berkisar antara -12,4 hingga 12,8 cm serta tren tahunan sebesar 0,3 cm/tahun.

Dari lima kombinasi perhitungan, proporsi Δ GWS yang logis berkisar antara 58 hingga 76%, dengan nilai Δ GWS rata-rata gabungan antara -9,7 hingga 11,1 cm dan menunjukkan tren peningkatan sebesar 0,2 cm/tahun. Analisis statistik menunjukkan korelasi yang relatif lemah antara Δ TWS, Δ GWS, indeks ENSO, indeks IOD, serta curah hujan. Adapun nilai Δ GWS yang tidak logis merupakan indikasi kualitas data yang buruk atau tidak konsisten, terutama ketika nilai komponen simpanan air lain (Δ SMS dan Δ SWS) menyimpang melebihi Δ TWS dari GRACE.

Validasi nilai Δ GWS dari GRACE sangat bergantung pada data muka air tanah secara regional dan storativitas akuifer (S dan Sy). Hasil studi ini menunjukkan korelasi yang relatif rendah antara Δ GWS dan data elevasi muka air tanah akuifer dangkal di Jakarta, dimana hal ini mengindikasikan perbedaan antara dinamika simpanan air tanah secara regional yang dideteksi oleh GRACE dan respons akuifer secara lokal yang mungkin dipengaruhi oleh heterogenitas akuifer dan pengambilan air tanah. Limitasi Δ GWS dari GRACE juga disebabkan oleh metode perhitungan yang mengestimasi Δ GWS sebagai komponen residu dari selisih antara Δ TWS dari GRACE dan komponen simpanan air lainnya. Salah satu ketidakpastian perhitungan dapat disebabkan oleh komponen simpanan air permukaan (Δ SWS) yang mungkin tidak sepenuhnya memperhitungkan badan air (sungai, danau, waduk, dan lahan basah),

dimana hal ini berpotensi menyebabkan nilai Δ SWS yang jauh lebih rendah dibandingkan Δ TWS. Untuk mengurangi ketidakpastian Δ GWS dari GRACE, dibutuhkan studi lanjutan yang mengintegrasikan data pemantauan muka air tanah secara in situ dengan resolusi spasial yang lebih rapat pada skala regional dan karakteristik parameter storativitas berdasarkan uji pemompaan. Selain itu, pemanfaatan model hidrologi terkalibrasi juga dapat digunakan untuk meningkatkan akurasi komponen Δ SWS dan Δ SMS.

Studi ini menekankan pentingnya jaringan pemantauan muka air tanah (dan juga kualitasnya) yang ekstensif di Indonesia, termasuk di Pulau Jawa, untuk mendukung kebijakan berbasis data dan mencegah dampak negatif berupa penurunan muka air tanah yang signifikan dan pencemaran air tanah. Jaringan sumur pantau perlu mempertimbangkan: luas area, tingkat pengambilan air tanah, serta kedalaman akuifer tidak tertekan dan akuifer tertekan pada setiap unit hidrostratigrafi. Pemantauan terhadap muka air tanah dan kualitas air perlu dilakukan secara berkala (sebaiknya minimal dalam skala bulanan).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada para pihak yang terlibat baik secara langsung maupun tidak langsung dalam studi ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada para penelaah yang telah memberikan masukan terhadap makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alley, W. M., dan Konikow, L. F. (2015). Bringing GRACE Down to Earth. *Groundwater*, 53(6), 826-829. <https://doi.org/10.1111/gwat.12379>
- Arifin, Taylor, R., Shamsudduha, M., dan Ramdhan, A. M. (2025). Groundwater storage dynamics and climate variability in the Lower Kutai Basin of Indonesia: reconciling GRACE Δ GWS to piezometry. *EGUsphere*, 2025, 1-34. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-2941>
- Asoka, A., Gleeson, T., Wada, Y., dan Mishra, V. (2017). Relative contribution of monsoon precipitation and pumping to changes in groundwater storage in India. *Nature Geoscience*, 10(2), 109-117. <https://doi.org/10.1038/ngeo2869>
- Batu, V. (1998). *Aquifer hydraulics: a comprehensive guide to hydrogeologic data analysis*. John Wiley & Sons, Inc.
- Bierkens, M. F. P., dan Wada, Y. (2019). Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: a review. *Environmental Research Letters*, 14(6), 063002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1a5f>
- Boergens, E., Dobs law, H., dan Dill, R. (2020). *COST-G GravIS RL01 Continental Water Storage Anomalies. V. 0005* https://doi.org/10.5880/COST-G.GRAVIS_01_L3_TWS
- Bondarenko, M., Priyatikanto, R., Tejedor-Garavito, N., Zhang, W., McKeen, T., Cunningham, A., Woods, T., Hilton, J., Cihan, D., Nosatiuk, B., Brinkhoff, T., Tatem, A., dan Sorichetta, A. (2025). *Constrained estimates of 2015-2030 total number of people per grid square at a resolution of 30 arc (approximately 1km at the equator) R2025A version v1*. U. o. S. WorldPop - School of Geography and Environmental Science.
- Cuthbert, M. O., Gleeson, T., Bierkens, M. F. P., Ferguson, G., dan Taylor, R. G. (2023). Defining Renewable Groundwater Use and Its Relevance to Sustainable Groundwater Management. *Water Resources Research*, 59(9), e2022WR032831. <https://doi.org/10.1029/2022WR032831>
- Cuthbert, M. O., Taylor, R. G., Favreau, G., Todd, M. C., Shamsudduha, M., Villholth, K. G., MacDonald, A. M., Scanlon, B. R., Kotchoni, D. O. V., Vouillamoz, J.-M., Lawson, F. M. A., Adjomayi, P. A., Kashaigili, J., Seddon, D., Sorensen, J. P. R., Ebrahim, G. Y., Owor, M., Nyenje, P. M., Nazoumou, Y.,

- Goni, I., Ousmane, B. I., Sibanda, T., Ascott, M. J., Macdonald, D. M. J., Agyekum, W., Koussoubé, Y., Wanke, H., Kim, H., Wada, Y., Lo, M.-H., Oki, T., dan Kukuric, N. (2019). Observed controls on resilience of groundwater to climate variability in sub-Saharan Africa. *Nature*, 572(7768), 230-234. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1441-7>
- Dahle, C., Boergens, E., Sasgen, I., Döhne, T., Reißland, S., Dobsław, H., Klemann, V., Murböck, M., König, R., Dill, R., Sips, M., Sylla, U., Groh, A., Horwath, M., dan Flechtner, F. (2025). GravIS: mass anomaly products from satellite gravimetry. *Earth Syst. Sci. Data*, 17(2), 611-631. <https://doi.org/10.5194/essd-17-611-2025>
- Fachri, M., Hutasoit, L. M., Djuhaeni, dan Ramdhan, A. M. (2002). Stratigraphy and hydrostratigraphy in Jakarta groundwater basin. *Buletin Geologi*, 34(3), 169-189.
- Generoso, R., Couharde, C., Damette, O., dan Mohaddes, K. (2020). The Growth Effects of El Niño and La Niña: Local Weather Conditions Matter. *Annals of Economics and Statistics*(140), 83-126. <https://doi.org/10.15609/annaeconstat2009.140.0083>
- Getirana, A., Kumar, S., Giroto, M., dan Rodell, M. (2017). Rivers and Floodplains as Key Components of Global Terrestrial Water Storage Variability. *Geophysical Research Letters*, 44(20), 10,359-310,368. <https://doi.org/10.1002/2017GL074684>
- Grönwall, J., dan Danert, K. (2020). Regarding Groundwater and Drinking Water Access through A Human Rights Lens: Self-Supply as A Norm. *Water*, 12(2), 419. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/2/419>
- Gu, G., dan Adler, R. F. (2019). Precipitation, temperature, and moisture transport variations associated with two distinct ENSO flavors during 1979–2014. *Climate Dynamics*, 52(12), 7249-7265. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3462-3>
- Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., dan Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, 7(1), 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y., Shamsudduha, M., Taylor, R. G., Faltalah, O., dan Kirchner, J. W. (2024). Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. *Nature*, 625(7996), 715-721. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8>
- Kagabu, M., Delinom, R., Lubis, R. F., Shimada, J., dan Taniguchi, M. (2010). Groundwater characteristics in Jakarta area, Indonesia. *Riset Geologi dan Pertambangan*, 20(2), 69-79.
- Kiem, A. S., dan Franks, S. W. (2001). On the identification of ENSO-induced rainfall and runoff variability: a comparison of methods and indices. *Hydrological Sciences Journal*, 46(5), 715-727. <https://doi.org/10.1080/02626660109492866>
- Kuang, X., Jiao, J. J., Zheng, C., Cherry, J. A., dan Li, H. (2020). A review of specific storage in aquifers. *Journal of Hydrology*, 581, 124383. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124383>
- Landerer, F. W., Flechtner, F. M., Save, H., Webb, F. H., Bandikova, T., Bertiger, W. I., Bettadpur, S. V., Byun, S. H., Dahle, C., Dobsław, H., Fahnestock, E., Harvey, N., Kang, Z., Kruizinga, G. L. H., Loomis, B. D., McCullough, C., Murböck, M., Nagel, P., Paik, M., Pie, N., Poole, S., Strelakov, D., Tamisiea, M. E., Wang, F., Watkins, M. M., Wen, H.-Y., Wiese, D. N., dan Yuan, D.-N. (2020). Extending the Global Mass Change Data Record: GRACE Follow-On Instrument and Science Data Performance. *Geophysical Research Letters*, 47(12), e2020GL088306. <https://doi.org/10.1029/2020GL088306>
- Landerer, F. W., dan Swenson, S. C. (2012). Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. *Water Resources Research*, 48(4). <https://doi.org/10.1029/2011WR011453>
- Lestari, A. D., Sulaksana, N., dan Assegaf, A. (2020). Karakteristik Akuifer Pada Kedalaman Kurang Dari 40 meter Berdasarkan

- Analisis Data Curah Hujan dan Fluktuasi Muka Air Tanah Periode 2003 - 2013 di Daerah Jakarta Selatan. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 11(3), 125-134.
- Liu, X., Feng, X., Ciais, P., dan Fu, B. (2020). Widespread decline in terrestrial water storage and its link to teleconnections across Asia and eastern Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24(7), 3663-3676. <https://doi.org/10.5194/hess-24-3663-2020>
- Loomis, B. D., Luthcke, S. B., dan Sabaka, T. J. (2019). Regularization and error characterization of GRACE mascons. *Journal of Geodesy*, 93(9), 1381-1398. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01252-y>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Mohamed, A., Sultan, M., Ahmed, M., Yan, E., dan Ahmed, E. (2017). Aquifer recharge, depletion, and connectivity: Inferences from GRACE, land surface models, and geochemical and geophysical data. *GSA Bulletin*, 129(5-6), 534-546. <https://doi.org/10.1130/b31460.1>
- Müller Schmied, H., Cáceres, D., Eisner, S., Flörke, M., Herbert, C., Niemann, C., Peiris, T. A., Popat, E., Portmann, F. T., Reinecke, R., Schumacher, M., Shadkam, S., Telteu, C. E., Trautmann, T., dan Döll, P. (2021). The global water resources and use model WaterGAP v2.2d: model description and evaluation. *Geoscientific Model Development*, 14(2), 1037-1079. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-1037-2021>
- Ndehedehe, C. E., Adeyeri, O. E., Onojeghuo, A. O., Ferreira, V. G., Kalu, I., dan Okwuashi, O. (2023). Understanding global groundwater-climate interactions. *Science of The Total Environment*, 904, 166571. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166571>
- Rodell, M., Velicogna, I., dan Famiglietti, J. S. (2009). Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*, 460(7258), 999-1002. <https://doi.org/10.1038/nature08238>
- Saji, N. H., Goswami, B. N., Vinayachandran, P. N., dan Yamagata, T. (1999). A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 401(6751), 360-363. <https://doi.org/10.1038/43854>
- Save, H. (2020). CSR GRACE and GRACE-FO RL06 Mascon Solutions v02. <https://doi.org/10.15781/cgq9-nh24>
- Save, H., Bettadpur, S., dan Tapley, B. D. (2016). High-resolution CSR GRACE RL05 mascons. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(10), 7547-7569. <https://doi.org/10.1002/2016JB013007>
- Scanlon, B. R., Rateb, A., Anyamba, A., Kebede, S., MacDonald, A. M., Shamsudduha, M., Small, J., Sun, A., Taylor, R. G., dan Xie, H. (2022). Linkages between GRACE water storage, hydrologic extremes, and climate teleconnections in major African aquifers. *Environmental Research Letters*, 17(1), 014046. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3bfc>
- Scanlon, B. R., Zhang, Z., Rateb, A., Sun, A., Wiese, D., Save, H., Beaudoin, H., Lo, M. H., Müller-Schmied, H., Döll, P., van Beek, R., Swenson, S., Lawrence, D., Croteau, M., dan Reedy, R. C. (2019). Tracking Seasonal Fluctuations in Land Water Storage Using Global Models and GRACE Satellites. *Geophysical Research Letters*, 46(10), 5254-5264. <https://doi.org/10.1029/2018GL081836>
- Scanlon, B. R., Zhang, Z., Save, H., Sun, A. Y., Müller Schmied, H., van Beek, L. P. H., Wiese, D. N., Wada, Y., Long, D., Reedy, R. C., Longuevergne, L., Döll, P., dan Bierkens, M. F. P. (2018). Global models underestimate large decadal declining and rising water storage trends relative to GRACE satellite data. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(6), E1080-E1089. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704665115>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>

- Shamsudduha, M., dan Taylor, R. G. (2020). Groundwater storage dynamics in the world's large aquifer systems from GRACE: uncertainty and role of extreme precipitation. *Earth System Dynamics*, 11(3), 755-774. <https://doi.org/10.5194/esd-11-755-2020>
- Shamsudduha, M., Taylor, R. G., dan Longuevergne, L. (2012). Monitoring groundwater storage changes in the highly seasonal humid tropics: Validation of GRACE measurements in the Bengal Basin. *Water Resources Research*, 48(2). <https://doi.org/10.1029/2011WR010993>
- Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M., dan Reigber, C. (2004). The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*, 31(9). <https://doi.org/10.1029/2004GL019920>
- Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J. S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T. R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M. F. P., MacDonald, A., Fan, Y., Maxwell, R. M., Yechieli, Y., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Shamsudduha, M., Hiscock, K., Yeh, P. J. F., Holman, I., dan Treidel, H. (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3(4), 322-329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>
- Thomas, B. F., Caineta, J., dan Nanteza, J. (2017). Global Assessment of Groundwater Sustainability Based On Storage Anomalies. *Geophysical Research Letters*, 44(22), 11,445-411,455. <https://doi.org/10.1002/2017GL076005>
- Vishwakarma, B. D., Devaraju, B., dan Sneeuw, N. (2016). Minimizing the effects of filtering on catchment scale GRACE solutions. *Water Resources Research*, 52(8), 5868-5890. <https://doi.org/10.1002/2016WR018960>
- Vishwakarma, B. D., Devaraju, B., dan Sneeuw, N. (2018). What Is the Spatial Resolution of grace Satellite Products for Hydrology? *Remote Sensing*, 10(6), 852. <https://doi.org/10.3390/rs10060852>
- Vishwakarma, B. D., Zhang, J., dan Sneeuw, N. (2021). Downscaling GRACE total water storage change using partial least squares regression. *Scientific Data*, 8(1), 95. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00862-6>
- Wang, S., Huang, J., He, Y., dan Guan, Y. (2014). Combined effects of the Pacific Decadal Oscillation and El Niño-Southern Oscillation on Global Land Dry–Wet Changes. *Scientific Reports*, 4(1), 6651. <https://doi.org/10.1038/srep06651>
- Watkins, M. M., Wiese, D. N., Yuan, D.-N., Boening, C., dan Landerer, F. W. (2015). Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(4), 2648-2671. <https://doi.org/10.1002/2014JB011547>
- Wiese, D. N., Landerer, F. W., dan Watkins, M. M. (2016). Quantifying and reducing leakage errors in the JPL RL05M GRACE mascon solution. *Water Resources Research*, 52(9), 7490-7502. <https://doi.org/10.1002/2016WR019344>
- Wiese, D. N., Yuan, D.-N., Boening, C., Landerer, F. W., dan Watkins, M. M. (2023). JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height CRI Filtered RL06.3Mv04. <https://doi.org/10.5067/TEMSC-3JC634>
- Xu, Z. X., Takeuchi, K., dan Ishidaira, H. (2004). Correlation between El Niño–Southern Oscillation (ENSO) and precipitation in South-east Asia and the Pacific region. *Hydrological Processes*, 18(1), 107-123. <https://doi.org/10.1002/hyp.1315>
- Zhang, J., Lu, Z., Li, C., Lei, G., Yu, Z., dan Li, K. (2024). Estimation of groundwater-level changes based on GRACE satellite and GLDAS assimilation data in the Songnen Plain, China. *Hydrogeology Journal*, 32(5), 1495-1509. <https://doi.org/10.1007/s10040-024-02815-w>