

EVALUASI MODEL DATA SATELIT GRACE UNTUK ESTIMASI TOTAL SIMPAPAN AIR DI WILAYAH LAHAN GAMBUT PULAU KALIMANTAN

Rendra Fauzi¹, Leni S. Heliani¹

¹Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
Jalan Grafika No. 2, Bulaksumur, Yogyakarta. Indonesia 55281, email: lheliani@ugm.ac.id

(Diterima 13 Mei 2019, Disetujui 30 Juni 2019)

ABSTRAK

Simpangan Air Tanah (TWS) merupakan salah satu komponen utama siklus hidrologi di permukaan bumi. Pada penelitian ini, nilai TWS diestimasi berdasarkan data gayaberat dari satelit GRACE, dengan studi kasus di wilayah lahan gambut pulau Kalimantan. Model data satelit GRACE yang digunakan ada 3 yakni CSR, GFZ, dan JPL dengan data akuisisi dari 2002 hingga 2017. Proses perhitungan menggunakan toolbox GRAMAT yang dikembangkan oleh Wei Feng dengan proses meliputi hitungan nilai Tinggi Air Rerata (EWH), reduksi efek ocean-leakage, serta analisis harmonik meliputi amplitudo, fase, dan perubahan tahunan. Dari hasil diperoleh informasi bahwa perubahan nilai EWH yang dihasilkan oleh tiap model data bernilai positif, dengan nilai berkisar antara 0,474 hingga 0,676 mm tiap tahunnya. Matrik korelasi antar model menunjukkan nilai korelasi di atas 0,81, hal ini berarti semua model memberikan hasil yang relatif sama. Berdasarkan nilai ketelitian dari simpangan baku maka model data yang paling cocok untuk perhitungan simpanan air lahan gambut adalah model data JPL.

Kata kunci : *Gayaberat, GRACE, Lahan Gambut, TWS, EWH*

ABSTRACT

Total Water storage (TWS) is one of the main components of the hydrological cycle of the Earth surface. In this research, TWS was estimated based GRACE satellite gravity data, with a case study the Peatland area of Borneo Island. Three models of GRACE data, namely CSR, GFZ, and JPL, from 2002 to 2017 were processed using GRAMAT toolbox developed by Wei Feng. The processing steps included calculating the equivalent water height (EWH), reduction of the effect of oceans leakage, and harmonic analysis including amplitude, phase, and trend change. Results show that the trends in the EWH generated by each model and method are positive, with values ranging from 0.474 to 0.676 mm per year. The correlation matrix between models has value above 0.81, this means that all models give relatively the same results. Based on the accuracy value from the standard deviation, the most suitable data model for estimating peatland water storage is the JPL data model.

Keywords : *Gravity, GRACE, Peatland, TWS, EWH*

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Observasi data gayaberat merupakan bagian utama dari ilmu geodesi. Hal terkait retribusi massa penting dalam penentuan dinamika bumi fisis. Saat ini perolehan data gayaberat tak terbatas pada pengukuran secara terestrial, tetapi dapat diperoleh juga dari hasil akuisisi satelit. Kualitas dan jumlah parameter gayaberat dari data satelit juga meningkat seiring dengan peningkatan teknologi dan model fisik.

Misi satelit gayaberat memiliki berbagai fokus bidang seperti kelautan, atmosfer, pemanasan global, ice-sheet, geoid, hingga hidrologi. Misi satelit gayaberat GRACE, dapat menyediakan data pengamatan dalam rentang waktu hingga bulanan untuk pemantauan perubahan massa dalam skala besar (Tapley dkk., 2004). Data tersebut kemudian dapat diolah menjadi

informasi terkait dengan total simpanan air (TWS) untuk kepentingan di bidang hidrologi.

Total water storage (TWS) adalah air yang disimpan di atas dan di bawah permukaan tanah, yang meliputi salju, es, kelembaban tanah, air tanah, dan air permukaan. TWS merupakan komponen mendasar dari siklus air (Oki & Kanae, 2006). Perhitungan TWS umumnya dilakukan di wilayah basin (badan air). Namun data terkait TWS ini dibutuhkan juga di wilayah terestris lain seperti lahan gambut.

Informasi TWS di lahan gambut dapat dimanfaatkan sebagai informasi dalam memprediksi tingkat potensi kebakaran lahan gambut. Medan lahan gambut yang ekstrim, berdampak pada sulitnya akses dalam memperoleh data in-situ termasuk data TWS. Untuk itu dengan adanya fungsi satelit GRACE dalam mengestimasi nilai simpanan air, maka diperoleh alternatif metode akuisisi data TWS di lahan gambut.

Dinamika wilayah lahan gambut berbeda dengan wilayah basin pada umumnya. Pemanfaatan data gayaberat untuk penelitian hidrologi lahan gambut juga masih minim. Untuk itu diperlukan perhatian lebih dalam pemilihan data dan proses pengolahan untuk estimasi nilai total simpanan air di wilayah lahan gambut.

Data satelit gayaberat GRACE dimodelkan dalam berbagai versi. Pembagian model dilakukan berdasarkan institut/lembaga pemrosesan, serta tingkatan degree dan orde. Selain itu dalam pengolahan data satelit gayaberat GRACE juga terdapat beberapa metode dalam filtering, destriping, leakage-reduction, GIA-effect, dan sebagainya. Pemilihan data dan proses yang tepat akan berdampak pada ketelitian informasi yang dihasilkan.

1.2 Rumusan Masalah

Metode estimasi simpanan air di wilayah lahan gambut dengan data gayaberat dapat dilakukan. Namun dinamika wilayah gambut yang bervariasi membuat kondisi lahan gambut berbeda dengan wilayah basin lain. Sehingga diperlukan informasi mengenai model data yang paling sesuai untuk estimasi nilai simpanan air di wilayah lahan gambut.

1.3 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian antara lain:

- Membandingkan 4 model data GRACE yaitu 2 model CSR, 1 model GFZ, dan 1 model JPL.
- Metode yang digunakan adalah metode destriping, Chen P5M8 sebab sudah digunakan untuk wilayah Pulau Kalimantan oleh Han dkk. (2018).
- Analisis hasil dilakukan pada 4 area lahan gambut yang berbeda di Pulau Kalimantan, adapun batasan 4 area dapat dilihat pada Gambar 3.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hidrologi Lahan Gambut

Lahan gambut memiliki sifat akuifer yang berdampak pada kemampuan yang cukup tinggi dalam penyimpanan air. Lahan gambut memiliki kemampuan penyimpanan air hingga 13 kali dari bobotnya. Kondisi lahan gambut yang kini banyak mengalami konversi, mengakibatkan terjadinya kebakaran dan penurunan muka lahan gambut, hal ini membuat kemampuan lahan gambut dalam menahan air menurun (Agus dan Subiksa, 2008).

Menurunnya kemampuan ini berdampak pada perubahan nilai dari simpanan air di lahan gambut. Pendeteksian nilai perubahan tersebut diperlukan, mengingat nilai perubahan simpanan air penting dalam proses mitigasi dan restorasi dari lahan gambut.

2.2 Penggunaan GRACE untuk estimasi total simpanan air

Beberapa penelitian yang cukup esensial dalam hal penggunaan satelit gayaberat untuk penentuan simpanan air telah dilakukan di area wilayah lembah di California Tengah (Famiglietti dkk., 2011), dataran tinggi wilayah Amerika Serikat (Scanlon dkk., 2012), dataran tinggi utara Cina (Feng dkk., 2013), wilayah Timur Tengah (Joodaki dkk., 2014), serta lembah sungai Yangtze di Cina (Long dkk., 2015). Berbagai penelitian tersebut menghasilkan nilai simpanan air tanah dari satelit gayaberat GRACE, yang hasilnya representatif dengan model hidrologi global. Hubungan global antara elemen massa, dinyatakan sebagai *equivalent water height (EWH)*, dan potensial gravitasi yang terkait dinyatakan dalam koefisien *spherical harmonic*, dengan persamaan sebagai berikut (Wahr dkk., 1998)

$$\Delta\sigma(\theta, \lambda) = a_e \rho_w \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\cos\theta) (\Delta\hat{C}_{lm}\cos(m\lambda) + \Delta\hat{S}_{lm}\sin(m\lambda)) \quad (1)$$

Dengan $\Delta\hat{C}_{lm}$ dan $\Delta\hat{S}_{lm}$ diperoleh dari

$$\Delta\hat{C}_{lm} = \frac{\rho_{ave}}{3\rho_w} \frac{2l+1}{1+k_l} \Delta C_{lm} \quad (2)$$

$$\Delta\hat{S}_{lm} = \frac{\rho_{ave}}{3\rho_w} \frac{2l+1}{1+k_l} \Delta S_{lm} \quad (3)$$

Keterangan :

$\Delta\sigma$: densitas permukaan;

a_e : rerata radius bumi;

ρ_w : densitas air;

\bar{P}_{lm} : polynomial Legendre;

ρ_{ave} : rerata densitas massa bumi (5517 kg/m³);

l, m : degree dan orde;

k_l : *love number* untuk degree l ;

$\Delta C_{lm}, \Delta S_{lm}$: variasi dari *normalized spherical harmonic* data model gayaberat;

2.3 GRAMAT Toolbox

GRACE Matlab Toolbox (GRAMAT) merupakan perangkat program dalam bentuk script matlab untuk memproses data GRACE level-2 dan memperkirakan spatio-temporal variasi massa. Toolbox ini sudah dilengkapi dengan GUI yang dapat memudahkan penggunaan. GRAMAT

dikembangkan oleh Wei Feng dari *Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences*.

Toolbox ini bertujuan untuk membantu pengolahan GRACE dalam bidang hidrologi yang cenderung mengabaikan distorsi dan kesalahan sinyal yang tidak dapat diabaikan selama memproses data GRACE level-2 secara langsung. Fokus pengolahan ialah menganalisis metode reduksi *noise* untuk memproses produk koefisien spherical harmonic (SH) data GRACE.

Fungsi dalam GRAMAT terdiri atas (1) *destriping* koefisien SH untuk menghilangkan garis dari utara ke selatan, yakni kesalahan akibat frekuensi tinggi yang berkorelasi secara geografis, dan Gaussian *smoothing*, (2) analisis dan sintesis SH, (3) penilaian dan pengurangan *leakage-effect* pada variasi massa turunan GRACE, dan (4) analisis harmonik deret waktu regional dari variasi massa dan penilaian ketidakpastian estimasi GRACE.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Data dan Perangkat yang Digunakan

1. Perangkat Lunak yang digunakan antara lain:
 - a. Matlab R2016a
 - b. ArcGIS 10.3
 - c. Global Mapper v.19
 - d. Microsoft Office 2016
2. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:
 - a) Data Model Gayaberat Satelit GRACE oleh *Center for Space Reasearch (CSR)* versi RL05, degree maks 60, yang selanjutnya disebut model CSR60
 - b) Data Model Gayaberat Satelit GRACE oleh *Center for Space Reasearch (CSR)* versi RL05, degree maks 96 yang selanjutnya disebut model CSR96
 - c) Data Model Gayaberat Satelit GRACE oleh *GeoForschungsZentrum (GFZ)* versi RL05a, degree maks 90 yang selanjutnya disebut model GFZ
 - d) Data Model Gayaberat Satelit GRACE oleh *Jet Propulsion Laboratory (JPL)*. versi RL05.1, degree maks 60 yang selanjutnya disebut model JPL
 - e) *Monthly estimates of degree 1 gravity coefficients* oleh Swenson dkk. (2008)
 - f) *Monthly C20 RL-05 time series from SLR* oleh Cheng dkk. (2013)

3.2 Metodologi

Metodologi perhitungan nilai simpanan air dari satelit gayaberat GRACE direferensikan dari penelitian Han dkk. (2017). Tahapan pertama menghapus koefisien C20 (degree 2, orde 0), hal ini dilakukan sebab koefisien tersebut memiliki kesalahan yang relatif besar, koefisien ini diganti dengan koefisien hitungan SLR.

Tahapan kedua mengikutsertakan koefisien degree 1 (C10, C11, dan S11). Proses ini untuk menambahkan kembali variasi geocenter musiman, koefisien derajat 1 disertakan dari data yang disediakan oleh Swenson dkk. (2008).

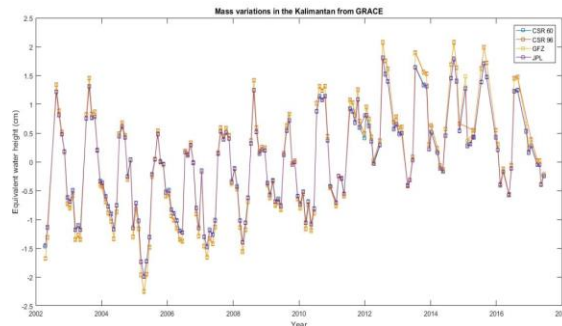
Tahap ketiga mengurangi kesalahan koefisien degree harmonik dengan melakukan proses ocean-leakage dan destriping koefisien (tipe yang digunakan Chen P5M8). Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai EWH dengan persamaan II.1, lalu dilakukan analisis harmonik dari nilai EWH yang diperoleh.

Model kemudian dibandingkan berdasarkan hasil dari parameter analisis harmonik yang telah dihitung, serta nilai simpangan baku yang dihasilkan untuk kemudian dapat ditentukan model terbaik yang dapat digunakan untuk menentukan EWH di lahan gambut.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Harmonik

Nilai EWH dihitung berdasarkan SH yang sudah dikoreksi dan diolah. Adapun grafik *time series* dari EWH untuk 4 model dengan metode *destriping* P5M8 untuk area 1 dapat diilustrasikan Gambar 1., sumbu x menampilkan tahun mulai 2002 hingga 2017. Sumbu y menampilkan nilai EWH dalam rentang -3 hingga 3 cm.



Gambar 1. Grafik EWH pada area 1

Secara umum pola nilai EWH untuk area 1 dari tahun 2002 hingga 2017 mengalami peningkatan. Nilai tertinggi tercatat pada akhir tahun 2012, dan nilai terendah tercatat pada awal tahun 2015. Hasil untuk area 1 memiliki pola yang sama dengan untuk area 4. Sementara pola area 2 dan area 3

memiliki kesamaan namun berbeda dengan area 1 dan 4. Pada area 2 dan 3 nilai EWH berada pada rentang -2,5 hingga 2,5 cm. Pada grafik juga terlihat bahwa keempat model hampir tumpang-tindih, yang berarti setiap model menghasilkan nilai yang relatif sama.

Analisis harmonik dari EWH *time series* dilakukan untuk memperoleh informasi terkait nilai amplitudo tahunan, nilai fase tahunan serta nilai pola perubahan (*trend*). Analisis harmonik dapat dilihat pada Tabel 1. berikut.

Tabel 1. Analisis Harmonik Tiap Model

Model	Area	Amplitudo (mm)	TREND (mm/tahun)	Phase (deg)
CSR_60_	1	6.17	0.474	262.5
	2	4.41	0.519	262.5
	3	4.30	0.480	262.5
	4	5.55	0.539	262.5
CSR_96_	1	6.58	0.561	261.5
	2	5.01	0.633	261.5
	3	5.03	0.634	261.5
	4	6.18	0.676	261.5
GFZ_	1	6.65	0.565	262.5
	2	4.96	0.624	262.5
	3	4.95	0.619	262.5
	4	5.86	0.648	262.5
JPL_	1	6.10	0.493	263.5
	2	4.36	0.533	263.5
	3	4.26	0.493	263.5
	4	5.43	0.556	263.5

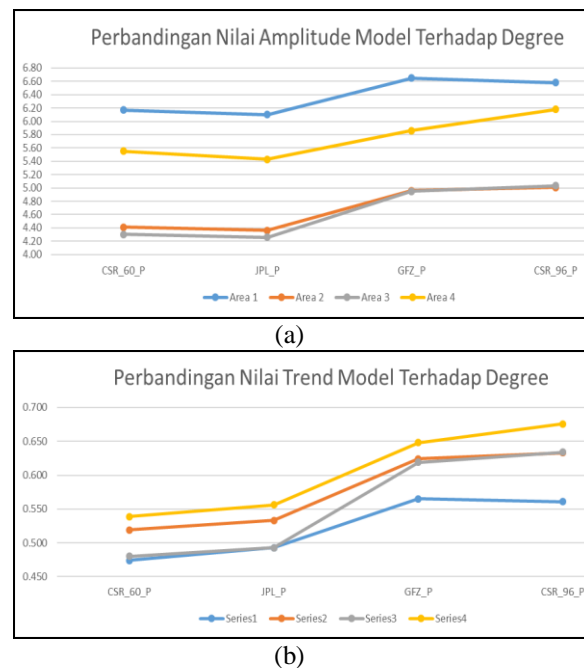
Berdasarkan Tabel 1. diperoleh informasi bahwa keseluruhan model pada tiap Area memberikan hasil *trend* bernilai positif, hal ini dapat menunjukkan bahwa simpanan air di wilayah lahan gambut Kalimantan mengalami peningkatan dari tahun 2002 hingga 2017. Hasil ini dapat kemudian di verifikasi dan di validasi lebih lanjut dengan data lain seperti data klimatologi dan data tinggi muka air tanah yang disediakan oleh Badan Restorasi Gambut di beberapa titik lokasi di Pulau Kalimantan.

Parameter analisis harmonik untuk keempat model bervariasi pada parameter amplitudo tahunan dan *trend* tahunan. Sementara, parameter fase tahunan relatif sama. Nilai parameter untuk Area 1 dan 4 cenderung berbeda dengan Area 2 dan 3. Area 2 dan 3 cenderung memiliki nilai amplitudo yang lebih kecil, namun memiliki nilai *trend* lebih besar. Lokasi Area 2 dan 3 yang sama-sama berada di wilayah selatan Pulau Kalimantan dapat menjadi salah satu faktor penyebab.

4.2 Perbandingan Parameter Model

A. Efek Degree

Model data satelit gayaberat GRACE yang digunakan yakni CSR, JPL dan GFZ memiliki nilai *degree* yang bervariasi. CSR dan JPL memiliki *degree* maksimum 60, kemudian GFZ memiliki *degree* maksimum 90, dan CSR versi lainnya memiliki *degree* maksimum 96. Nilai *degree* ini mempengaruhi hasil analisis harmonik dan dapat dijadikan sebagai pertimbangan dalam pemilihan model yang paling sesuai untuk estimasi simpanan air di wilayah lahan gambut. Adapun perbandingan *degree* dari model data yang digunakan terhadap nilai parameter harmonik dapat dilihat pada Gambar 2.



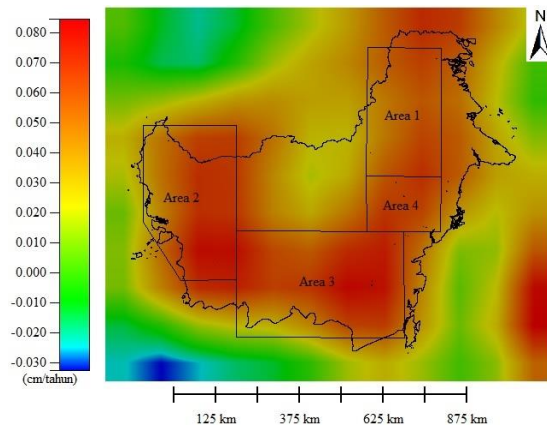
Gambar 2. (a) Efek degree terhadap nilai *amplitude* (b) Efek degree terhadap nilai *trend*

Pada Gambar 2. terlihat bahwa semakin tinggi nilai maksimum *degree* model data yang digunakan berimplikasi pada nilai parameter harmonik (*amplitude* & *trend*) yang semakin besar untuk area yang sama. Dapat diperhatikan juga bahwa dengan *degree* maksimum yang sama (model data CSR60 dan JPL) nilai yang dihasilkan juga berbeda di beberapa area. Faktor yang dapat mempengaruhi adalah jumlah data yang berbeda dalam rentang tahun yang sama. Pada parameter analisis harmonik fase belum memiliki pola yang dapat

diidentifikasi, sehingga belum dapat disimpulkan. Penelusuran lebih lanjut dapat dilakukan.

B. Korelasi Area

Parameter analisis harmonik dari *time series* EWH dapat divisualisasikan dalam bentuk raster. Gambar 3. menunjukkan visualisasi hasil parameter *trend* EWH di Pulau Kalimantan dari hasil pengolahan model data satelit GRACE GFZ.



Gambar 3. Hasil visualisasi *trend* EWH

Berdasarkan Gambar 3. Area di selatan Pulau Kalimantan memiliki nilai *trend* yang lebih besar dibanding area wilayah utara. Faktor lokasi lahan gambut dapat menjadi penyebab pemusatan nilai *trend* EWH ini. Lebih lanjut korelasi antar jumlah luasan area gambut di wilayah analisis dapat mempengaruhi nilai parameter analisis harmonik EWH. Dari visualisasi keempat model menunjukkan pola yang hampir sama dimana area tepi (pesisir) Pulau Kalimantan intensitasnya lebih tinggi dibanding area tengah.

4.3 Korelasi antar Model dan Ketelitian Tiap Model

Parameter analisis harmonik dari EWH yang sudah dievaluasi kemudian diuji statistik untuk mengetahui tingkat korelasi antar model satu dengan yang lain. Adapun matrik korelasi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Matriks Korelasi Antar Model

Korelasi	CSR_60	CSR_96	GFZ	JPL
CSR_60	1	0.99	0.99	0.81
CSR_96	0.99	1	0.99	0.81
GFZ	0.99	0.99	1	0.83
JPL	0.81	0.81	0.83	1

Nilai korelasi antar model secara keseluruhan sangat tinggi, yakni diatas 0,81. Hal ini menggambarkan bahwa hasil yang diberikan oleh model data yang berbeda relatif sama. Nilai korelasi yang paling berbeda diberikan oleh model data dari JPL dengan metode *destriping* P5M8. Perbedaan korelasi ini dapat menjadikan JPL sebagai metode acuan yang baik dalam mengidentifikasi adanya hasil *out-layer*.

Analisis lebih lanjut untuk menentukan model yang paling sesuai dilakukan dengan membandingkan nilai simpangan baku rerata untuk tiap model, seperti yang ditunjukkan Tabel 3.

Tabel 3. Nilai Simpangan Baku Tiap Model

Model	AMPLITUDE (mm)	TREND (mm/tahun)	PHASE (deg)
CSR_60	0.591	0.099	6.7
CSR_96	0.657	0.115	6.8
GFZ	0.649	0.108	6.7
JPL	0.455	0.099	6.8

Berdasarkan Tabel 3. diketahui bahwa model data JPL memberikan hasil simpangan baku yang paling baik. Fakta ini dikombinasikan dengan fakta bahwa nilai korelasi model JPL relatif berbeda dari beberapa metode lain, dijadikan sebagai acuan pengambilan keputusan bahwa model JPL dapat digunakan sebagai metode yang paling cocok dalam perhitungan nilai simpanan air di wilayah lahan gambut

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Perubahan nilai EWH yang dihasilkan oleh tiap model data dan metode bernilai positif, dengan nilai berkisar antara 0,474 hingga 0,676 mm tiap tahunnya. Matriks korelasi antar model menunjukkan nilai korelasi di atas 0,81, hal ini berarti semua model memberikan hasil yang relatif sama. Berdasarkan nilai ketelitian dari simpangan baku maka model data yang paling cocok untuk perhitungan simpanan air lahan gambut adalah model data JPL.

Penulis juga menyarankan untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan verifikasi dan validasi lebih lanjut dari hasil EWH dengan menggunakan data seperti data klimatologi dan data tinggi muka air tanah yang disediakan oleh Badan Restorasi Gambut di beberapa titik lokasi di Pulau Kalimantan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Institut National Aeronautics and Space Administration

(NASA) yang sudah menyediakan akses pegunduhan data. Serta Wei Feng dari Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences yang menyediakan toolbox GRAMAT sebagai bagian perangkat pengolahan data.

DAFTAR PUSTAKA

- Agus, F. dan Subiksa, I. G. M., 2008, Lahan Gambut : Potensi untuk Pertanian dan Aspek Lingkungan, Balai Penelitian Tanah, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Tersedia di laman: <http://www.worldagroforestry.org/sea/publications/files/book/BK0135-09.PDF>.
- Cheng, M., B. D. Tapley, dan J. C. Ries, 2013, Deceleration in the Earth's oblateness, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, 740–747, doi:10.1002/jgrb.50058.
- Famiglietti, J. S., M. Lo, S. L. Ho, J. Bethune, K. J. Anderson, T. H. Syed, S. C. Swenson, C. R. de Linage, dan M. Rodell, 2011, Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L03403, doi:10.1029/2010GL046442.
- Feng, Wei, 2018, GRAMAT: a comprehensive Matlab toolbox for estimating global mass variations from GRACE satellite data. *Earth Science Informatics*. doi:10.1007/s12145-018-0368-0.
- Feng, W., M. Zhong, J.-M. Lemoine, R. Biancale, H.-T. Hsu, dan J. Xia, 2013, Evaluation of groundwater depletion in North China using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and ground-based measurements, *Water Resour. Res.*, 49, 2110–2118, doi:10.1002/wrcr.20192.
- Han, J., Tangdamrongsub N., C. Hwang, dan Abidin H. Z, 2017, Intensified water storage loss by biomass burning in Kalimantan: detection by GRACE: Kalimantan water storage loss by GRACE, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. March 2017, doi: 10.1002/2017JB014129.
- Joodaki, G., J. Wahr, dan S. Swenson, 2014, Estimating the human contribution to groundwater depletion in the Middle East, from GRACE data, land surface models, and well observations, *Water Resour. Res.*, 50, 2679–2692, doi:10.1002/2013WR014633.
- Long, D., Y. Yang, Y. Wada, Y. Hong, W. Liang, Y. Chen, B. Yong, A. Hou, J. Wei, dan L. Chen, 2015, Deriving scaling factors using a global hydrological model to restore GRACE total water storage changes for China's Yangtze River Basin, *Remote Sens. Environ.*, 168, 177–193, doi:10.1016/j.rse.2015.07.003.
- Oki, T., dan S. Kanae, 2006, Global hydrological cycles and world water resources, *Science*, 313, 1068–1072, doi:10.1126/science.1128845.
- Scanlon, B. R., L. Longuevergne, dan D. Long, 2012, Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA, *Water Resour. Res.*, 48, W04520, doi:10.1029/2011WR011312.
- Swenson, S., D. Chambers, dan J. Wahr, 2008, Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output, *J. Geophys. Res.*, 113, B08410, doi:10.1029/2007JB005338.
- Tapley, B. D., S. Bettadpur, J. C. Ries, P. F. Thompson, dan M. M. Watkins, 2004, GRACE measurements of mass variability in the Earth system, *Science*, 305, 503–505, doi:10.1126/science.1099192.
- Wahr, J., M. Molenaar, dan F. Bryan, 1998, Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE, *J. Geophys. Res.*, 103, 30,205–30,229, doi:10.1029/98JB0284.