

PEMANFAATAN DATA *FORMOSAT-3/COSMIC GPS RADIO OCCULTATION* UNTUK ESTIMASI KANDUNGAN UAP AIR DI ATMOSFER

UTILIZATION OF FORMOSAT-3/COSMIC GPS RADIO OCCULTATION DATA FOR PRECIPITABLE WATER VAPOR ESTIMATING IN THE ATMOSPHERE

Noersomadi

Bidang Teknologi Atmosfer, Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
Jln. Dr. Junjuran 133 Bandung 40173
Pos-el: noersomadi@bdg.lapan.go.id

ABSTRACT

Utilization of FORMOSAT-3/COSMIC satellite data using GPSRO for atmospheric Precipitable Water Vapor (PWV) estimating has been done. This research analyzed comparison between daily PWV profile from radiosonde and GPSRO observations during 2007. Used radiosonde data were from observation at Soekarno-Hatta Airport, Jakarta. While GPSRO data were determined by finding the nearest occultation locations with radiosonde launching in the same day. Extrapolation method has been applied for estimating data which were not recorded above surface. Results showed before and after applying extrapolation method on GPSRO data, the linear correlation between PWV derived from both of observations technique are 0.657 and 0.849 respectively. Application of PWV from GPSRO was shown in hovmoller diagram during 2 January to 19 May 2011. The estimation during that period are between 10 to 55 mm, which described the existence of Madden Julian Oscillation. Hence, these results depicted that GPSRO can be utilized for PWV estimation that could be continued to enhance precipitation modelling.

Keywords: *GPSRO, Extrapolation, Estimation, PWV*

ABSTRAK

Telah dilakukan pemanfaatan data satelit FORMOSAT-3/COSMIC dengan teknik GPSRO untuk mengestimasi kandungan uap air (precipitable water vapor/ PWV) di atmosfer. Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis perbandingan antara profil PWV harian dari pengamatan dengan radiosonde dan GPSRO selama tahun 2007. Data radiosonde yang digunakan adalah hasil pengamatan di Bandara Soekarno-Hatta, Jakarta. Adapun data pengamatan GPSRO ditentukan melalui pencarian lokasi okultasi yang terdekat dengan peluncuran radiosonde pada hari yang sama. Metode ekstrapolasi diterapkan pada data GPSRO untuk menaksir data di sekitar permukaan yang tidak terekam dalam jangkauan okultasi satelit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa, sebelum dan setelah diterapkan metode ekstrapolasi, korelasi linier profil PWV harian dari kedua teknik pengamatan berturut-turut sebesar 0,657 dan 0,849. Penerapan estimasi PWV GPSRO ditunjukkan dalam diagram hovmollerselama 2 Januari hingga 19 Mei 2011. Hasil estimasi selang waktu tersebut adalah antara 10–55 mm yang menampilkan eksistensi sinyal Madden Julian Oscillation. Dari hasil ini, diperoleh bahwa data GPSRO dapat dimanfaatkan untuk estimasi PWV yang kemudian dapat dilanjutkan untuk pengembangan model curah hujan.

Kata kunci: GPSRO, Ekstrapolasi, Estimasi, PWV

PENDAHULUAN

Pengamatan atmosfer global dengan teknik okultasi yang pertama kali dilakukan adalah eksperimen *Global Positioning System/Meteorology* selama April 1995–Februari 1997, yang diprakarsai oleh *University Corporation for Atmospheric Research* (UCAR), sebagaimana dijelaskan oleh Ware.¹ Sejak Mei 2001, *Geoforschungszentrum* (GFZ) *Potsdam–Germany* telah meluncurkan *CHALLENGING Mini satellite Payload* (CHAMP) yang juga merupakan satelit untuk observasi atmosfer dengan teknik okultasi. Misi pengamatan atmosfer dengan teknik okultasi yang terbaru adalah *Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate* (COSMIC) yang berhasil meluncurkan enam satelit orbit rendah FORMOSAT-3 pada 14 April 2006.²

Teknik pengamatan *Global Positioning System Radio Occultation* (GPSRO) mengukur variabilitas atmosfer (temperatur, tekanan, dan kelembapan) dengan menentukan beda fasa atau sudut pembelokan sinyal dari satelit GPS yang diterima oleh satelit orbital rendah melalui pendekatan indeks refraktifitas medium perambatan.³ Berbeda dengan pengamatan menggunakan radiosonde yang terbatas pada wilayah tertentu, teknik GPSRO merekam profil vertikal atmosfer (tekanan udara, tekanan uap air atau kelembapan, dan temperatur) mencakup wilayah global.⁴ Telah banyak dilakukan penelitian yang memanfaatkan data GPSRO seperti Tsuda,⁵ Ratnam,⁶ dan Noersomadi⁷ untuk analisis gelombang atmosfer di lapisan stratosfer bawah.

Isu perubahan iklim telah memicu pengembangan model prediksi curah hujan, mengingat variabilitas curah hujan merupakan kontrol dinamika atmosfer. Curah hujan dapat diestimasi dari PWV atau total kandungan uap air dalam kolom atmosfer. PWV (dalam satuan kg/m² atau milimeter) dihitung dengan mengintegrasikan kelembapan spesifik pada setiap level tekanan dalam satu kolom atmosfer (persamaan 1), dengan percepatan gravitasi (m/s²), q kelembapan spesifik (g/kg), dan p adalah tekanan atmosfer dalam satuan milibar.⁸

$$PWV = \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} q \, dp \dots\dots\dots(1)$$

Berdasarkan hal tersebut penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan profil tekanan dan kelembapan atmosfer yang diamati dari satelit FORMOSAT-3/COSMIC guna mengestimasi PWV, yang dibandingkan dengan hasil pengamatan radiosonde. Penerapan estimasi PWV dari GPSRO ini ditampilkan dalam diagram waktu versus bujur geografis (*hovmoller diagram*) yang dibandingkan dengan data dari *NCEP/NCAR Reanalysis*.

METODE PENELITIAN

Data penelitian ini meliputi profil vertikal atmosfer (tekanan dan kelembapan spesifik) yang merupakan hasil rekaman pengamatan cuaca menggunakan GPSRO dan radiosonde. Data satu tahun pengamatan radiosonde (2007) diperoleh dari hasil peluncuran balon sonde setiap 12 jam sekali di Bandara Soekarno-Hatta, Jakarta (106.65° BT, 6.11° LS) yang diunduh dari situs *University of Wyoming*.⁹

Data GPSRO yang digunakan adalah data level-2 (*atmospheric wet profile*) hasil okultasi satelit FORMOSAT-3/COSMIC.¹⁰ Data tersebut berupa grid per 100 m. Karena lokasi okultasi terjadi secara acak pada setiap saat, dalam penelitian ini diambil profil yang berada dalam cakupan wilayah (101°–111°) BT dan (1°–11°) LS. Jika dalam sehari terjadi lebih dari satu kali okultasi dalam cakupan wilayah tersebut, diambil profil dari lokasinya paling dekat dengan koordinat Bandara Soekarno-Hatta. Apabila tidak terjadi okultasi dalam cakupan wilayah tersebut, pada waktu tersebut dianggap tidak ada pengamatan (*missing value*).

Estimasi PWV dilakukan dengan menerapkan persamaan (1). Salah satu kelemahan teknik GPSRO adalah variabilitas atmosfer yang terukur tidak mencapai dekat permukaan atau ketinggian 0–100 m (rata-rata capaian pengamatan hingga ketinggian 400 m). Oleh sebab itu, untuk memperoleh estimasi PWV yang lebih mendekati hasil penurunan data radiosonde, dalam penelitian ini digunakan metode ekstrapolasi terhadap data

GPSRO.¹¹ Ekstrapolasi diterapkan guna menaksir data tekanan dan kelembapan di sekitar level permukaan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

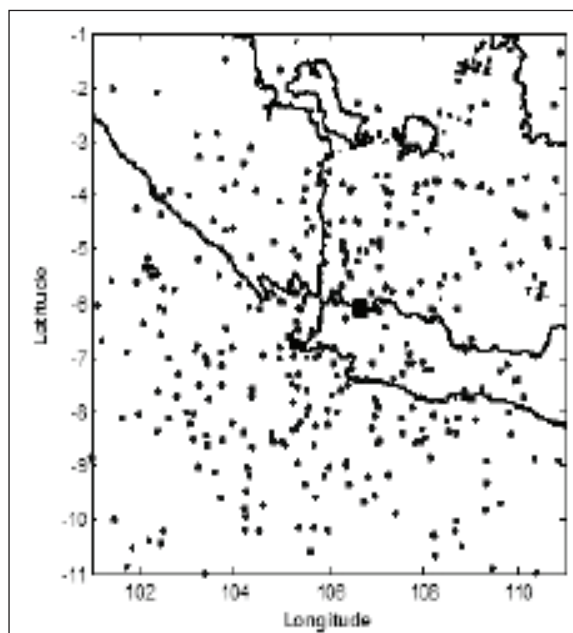
Kejadian okultasi satelit GPSRO yang termasuk dalam cakupan area (101° – 111°) BT dan (1° – 11°) LS tidak selalu tepat sama dengan posisi peluncuran radiosonde di Bandara Soekarno-Hatta, sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 1. Perbedaan waktu pengamatan dan lokasi kejadian antara radiosonde dan GPSRO ini dapat memunculkan selisih total kandungan uap air dalam satu kolom atmosfer. Fenomena meteorologi seperti aktivitas konveksi lokal di sekitar daerah peluncuran balon sonde memungkinkan perbedaan PWV hasil estimasi kedua pengamatan.

Penerapan metode ekstrapolasi dilakukan dengan mengingat bahwa atmosfer bersifat kompresibel yang mengakibatkan uap air lebih banyak terkandung di permukaan. Perhatikan Gambar 2 yang menampilkan ilustrasi integrasi kurva kelembapan spesifik terhadap tekanan (luas daerah di bawah kurva). Apabila data kelembapan spesifik di dekat permukaan tidak terukur, maka PWV sama dengan luas daerah **I**. Akan

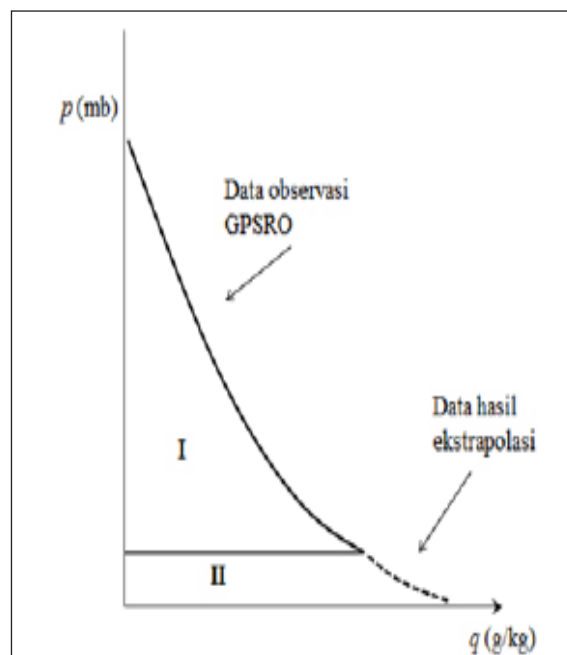
tetapi jika dilakukan ekstrapolasi data q hingga ke permukaan (q untuk p di dekat permukaan), total PWV adalah luas **I** ditambah **II**. Hal inilah yang menjadi dasar penerapan metode eks-trapolasi untuk penaksiran data GPSRO di dekat permukaan. Dengan demikian, integrasi PWV dari data GPSRO diharapkan dapat mendekati PWV hasil observasi balon radiosonde yang dilakukan dari permukaan.

Di daerah permukaan bumi, akibat atmosfer bersifat *compressible*, densitas atmosfer tinggi mengakibatkan tekanan udara semakin tinggi.¹² Demikian pula untuk nilai q yang mencerminkan jumlah kandungan uap air (gram) dalam satu kilogram udara kering, akan semakin tinggi.

Pada Gambar 3 ditunjukkan contoh hasil ekstrapolasi data temperatur dan kelembapan spesifik di dekat permukaan pada 1 Januari 2007. Lokasi okultasi yang teramati adalah 106.43° BT 6.65° LS (3,24 km dari peluncuran radiosonde). Terlihat bahwa hasil ekstrapolasi cukup baik, yang memberi arti bahwa hasil integrasi kelembapan diharapkan akan menghasilkan PWV yang memiliki korelasi tinggi terhadap PWV dari pengamatan radiosonde. Dari Gambar 3b juga dapat dianalisis bahwa terdapat perbedaan kandungan



Gambar 1. Lokasi peluncuran radiosonde di Bandara Soekarno-Hatta (kotak) dan okultasi satelit GPSRO (COSMIC) yang terdekat dengannya selama tahun 2007 (titik).



Gambar 2. Ilustrasi penerapan metode ekstrapolasi terhadap kurva kelembapan spesifik sebagai fungsi tekanan atmosfer.

uap air pada ketinggian 1–2 km. Hal ini dapat diartikan meskipun lokasi peluncuran radiosonde dengan kejadian okultasi hanya berjarak 3,24 km, terdapat perbedaan kandungan uap air di kedua lokasi tersebut. Konveksi lokal ataupun perbedaan waktu dan lokasi antara peluncuran radiosonde dapat memicu ketidaksamaan dalam pengukuran kelembapan (kandungan uap air). Dengan demikian perlu dilakukan estimasi kelembapan di sekitar permukaan yang tidak terdeteksi oleh GPSRO.

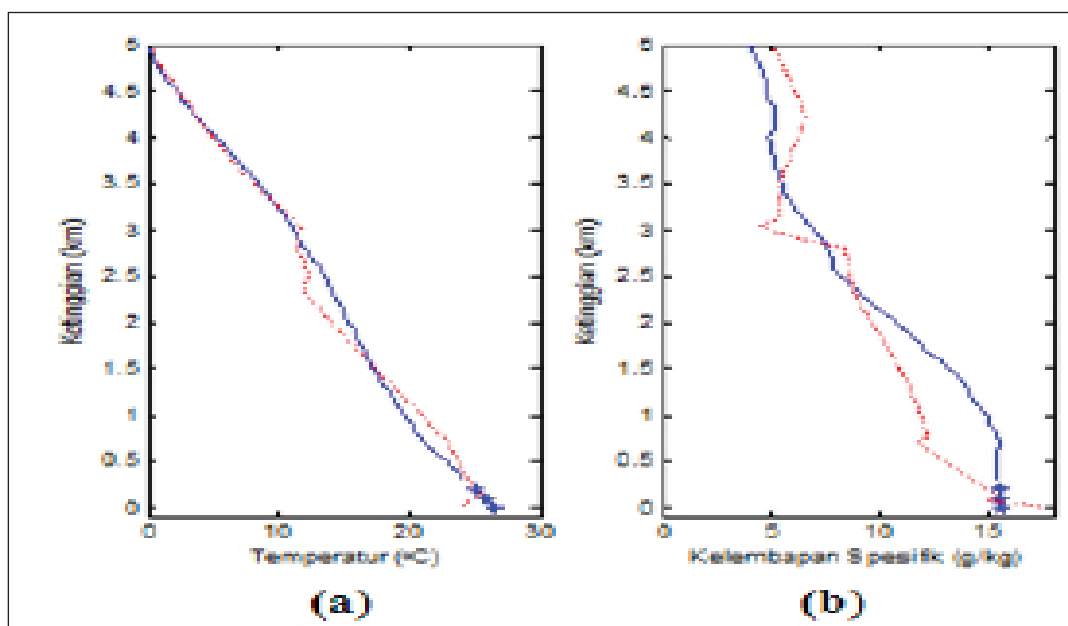
Menurut Folkins¹³ telah diketahui bahwa sumber utama troposfer tropis adalah proses penguapan (evaporasi). Proses evaporasi tersebut akan meningkatkan kandungan uap air di atmosfer bersamaan dengan ketersediaan fluks massa uap air. Hal ini mengakibatkan variasi diurnal kelembapan relatif terhadap ketinggian. Jika udara cenderung stabil (dini hari hingga pagi hari), kandungan uap air pada ketinggian di atas 5 km relatif rendah. Akan tetapi, proses evaporasi akan mendesak lapisan inversi yang kemudian meningkatkan ketersediaan uap air pada ketinggian 5–10 km, dan mengubah lapisan atmosfer menjadi tidak stabil.

Pada Gambar 4a dan 4b berturut-turut diperlihatkan diagram pencar (*scatter*) yang menyatakan perbandingan antara PWV hasil

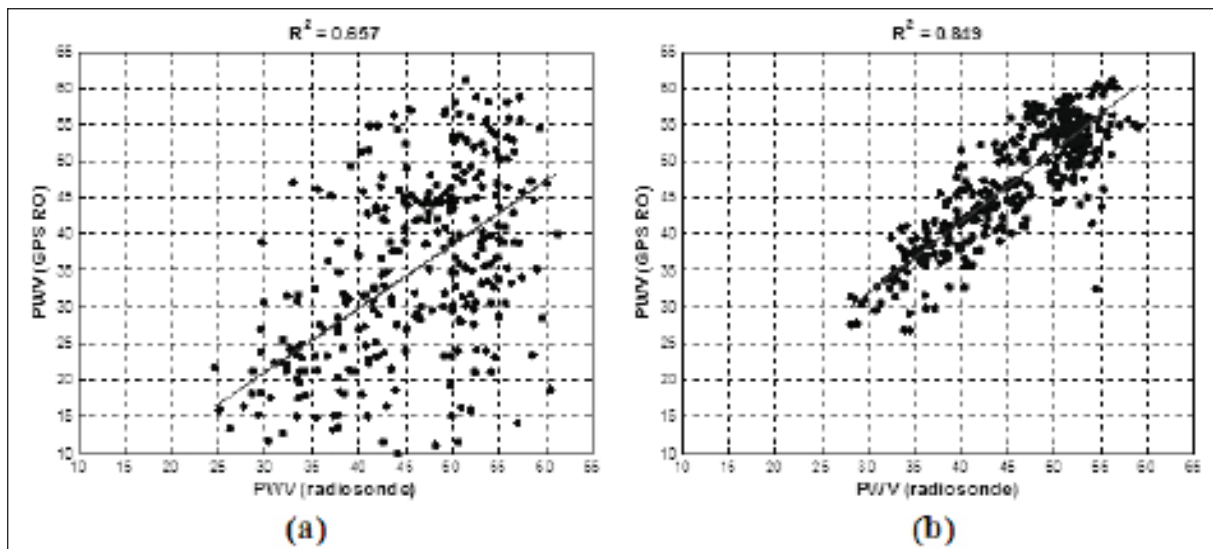
pengukuran dengan radiosonde dan GPSRO, sebelum dan setelah dilakukan ekstrapolasi. Tampak bahwa korelasi linier PWV dari kedua pengamatan menunjukkan hasil yang lebih baik setelah dilakukan ekstrapolasi data GPSRO.

Jumlah data yang diperlukan untuk input ekstrapolasi profil dekat permukaan adalah sebanyak titik grid yang akan diestimasi. Setelah dilakukan ekstrapolasi data GPSRO (Gambar 4b) untuk estimasi tekanan atmosfer dan kelembapan di dekat permukaan menunjukkan korelasi yang lebih baik yakni sebesar 0,85 (sebelum ekstrapolasi korelasi antara GPSRO dan radiosonde hanya sebesar 0,66). Dengan demikian, data GPSRO mampu mengukur variabilitas temperatur dan kelembapan atmosfer dengan baik, yang selanjutnya dapat dijadikan sebagai input untuk estimasi PWV dalam skala global. Hasil asimilasi PWV global dari GPSRO dapat dijadikan input untuk pengembangan model prediksi variabilitas curah hujan skala global, sebagaimana Vedel¹⁴ telah membuat model prediksi numerik yang lebih baik dengan mempertimbangkan data GPS *ground base*.

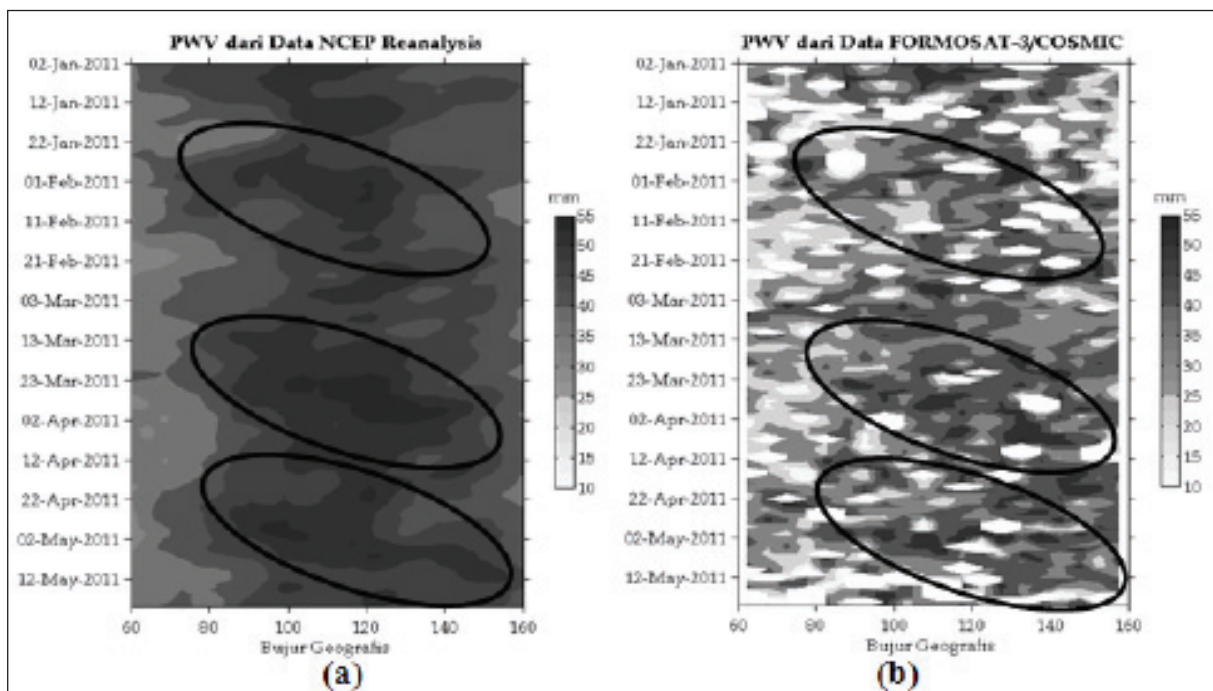
Nilai PWV hasil pengukuran GPSRO dan radiosonde masing-masing berkisar antara 30–60 mm. Distribusi titik dalam diagram *scatter* (Gambar 4b) lebih banyak di sekitar 50–60 mm. Hal ini menunjukkan bahwa atmosfer di



Gambar 3. Contoh perbandingan data GPSRO (garis penuh) dan radiosonde (garis putus-putus), serta hasil ekstrapolasi (asterik). (a) Temperatur, (b) Kelembapan Spesifik.



Gambar 4. Diagram *scatter* perbandingan antara PWV harian hasil pengukuran dengan GPS RO dan radiosonde. (a) sebelum penerapan ekstrapolasi, dan (b) setelah penerapan ekstrapolasi terhadap data GPS RO.



Gambar 5. Diagram hovmöller PWV dari data (a) NCEP/NCAR *Reanalysis*, dan (b) FORMOSAT-3/COSMIC GPSRO. Kurva elips pada kedua gambar menunjukkan nilai PWV tinggi sebagai indikasi pergerakan awan konvektif.

wilayah Bandara Soekarno-Hatta dan sekitarnya relatif lembap sepanjang tahun 2007. PWV hasil radiosonde yang memiliki nilai lebih rendah atau tinggi dari pengukuran GPSRO memberikan arti bahwa terdapat konveksi lokal yang menaikkan jumlah kandungan uap air hingga lapisan troposfer menengah, mengingat bahwa waktu dan lokasi kejadian okultasi tidak selalu tepat sama atau sangat dekat dengan peluncuran radiosonde.

Perhatikan kembali Gambar 1 yang menunjukkan lokasi okultasi selama setahun. Terdapat kejadian okultasi yang di atas lautan atau daratan pulau lain, lokasi tersebut merupakan yang terdekat dengan koordinat peluncuran radiosonde.

PWV yang diestimasi dari GPSRO diterapkan untuk mendeteksi sinyal *Madden Julian Oscillation* (MJO) pada Gambar 5. Zhang¹⁵ mendokumentasikan variabilitas musiman MJO

berdasarkan angin zonal dan presipitasi. Diagram *hovmoller* yang diperlihatkan dalam Gambar 5 merupakan perata-rataan tiga hari berturut-turut yang digeser satu hari (hari tengah dijadikan sebagai referensi waktu). Batas lintang adalah dari 10°LS–10°LU. Adapun resolusi bujur adalah perata-rataan setiap 5° dari 60°–160° BT. Tampak pergerakan awan konvektif yang diindikasikan oleh nilai PWV tinggi, yang merambat dari Samudra Hindia melintasi Kepulauan Indonesia (90°–145° BT).

Terlihat bahwa terdapat sinyal MJO tampak jelas digambarkan oleh data NCEP/NCAR *Reanalysis* (Gambar 5a). Adapun PWV dari GPSRO menunjukkan hasil yang relatif sama. Nilai PWV dari GPSRO (Gambar 5b) secara spasial tidak mulus seperti yang ditunjukkan data NCEP/NCAR *Reanalysis* disebabkan oleh ketersediaan data GPSRO di sekitar ekuator relatif sedikit karena jarang terjadi okultasi satelit. Kejadian okultasi satelit di ekuator relatif sedikit merupakan sebagai akibat orbit polar satelit GPSRO sebagaimana penjelasan Anthes,² Aoyama,³ dan Wickert.⁴ Total PWV yang bernilai lebih dari 50 mm dapat dijadikan indikator keberadaan aktifitas konveksi yang bergerak dari Samudra Hindia melintasi Kepulauan Indonesia pada akhir bulan Januari, minggu ketiga Maret, dan akhir April hingga awal Mei 2011. Penyimpangan nilai PWV GPSRO terhadap radiosonde disebabkan oleh perbedaan waktu dan lokasi kejadian okultasi terhadap pengamatan radiosonde.

KESIMPULAN

Teknik GPSRO mampu mengukur variabilitas tekanan dan kelembapan atmosfer. Perlu dilakukan penerapan metode ekstrapolasi terhadap data GPSRO sebelum penaksiran variabilitas PWV guna mengestimasi tekanan dan kelembapan pada ketinggian di dekat permukaan. Korelasi PWV yang diperoleh sebelum dan sesudah penerapan metode ekstrapolasi berturut-turut sebesar 0,66 dan 0,85. Perbedaan nilai PWV hasil integrasi data GPSRO dan radiosonde disebabkan oleh ketidaksamaan lokasi dan waktu antara kejadian okultasi satelit dan peluncuran balon sonde. Nilai PWV antara 30–60 mm, dengan distribusi diagram *scatter* antara GPSRO dan radiosonde memperlihatkan bahwa kondisi atmosfer di

sekitar wilayah Bandara Soekarno-Hatta relatif basah sepanjang tahun. Aplikasi PWV yang telah diestimasi melalui diagram *hovmoller* dapat mendeteksi sinyal MJO. Dari hasil ini disimpulkan bahwa data GPSRO dapat dimanfaatkan untuk estimasi PWV yang kemudian dapat dilanjutkan guna pengembangan model prediksi curah hujan secara global.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada *COSMIC Data Analysis and Archive Center* (CDAAC) yang telah menyediakan data profil atmosfer hasil pengukuran FORMOSAT-3/COSMIC GPSRO. Demikian pula kepada *Department of Atmospheric Science–University of Wyoming* dan *NOAA Climate Data Centre* yang telah menyediakan akses data radiosonde dan data grid spasial PWV secara gratis.

DAFTAR PUSTAKA

- ¹Ware, R., M. Exner, D. Feng, M. Gorbunov, K. Hardy, B. Herman, Y. Kuo, T. Meehan, W. Melbourne, C. Rocken, W. Schreiner, S. Sokolovskiy, F. Solheim, X. Zou, R. Anthes, S. Businger, and K. Trenberth. 1996. GPS sounding of the atmosphere from low earth orbit: Preliminary Results. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 77: 19–40.
- ²Anthes, R.A., et al. 2008. The COSMIC/FORMOSAT-3 Mission: Early Results. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 89: 313–333. doi: 10.1175/BAMS-89-3-313.
- ³Aoyama, Y., Shoji, Y., Mousa, A., Tsuda, T., Nakamura, H. 2004. Temperature and Water Vapor Profiles Derived from Downward-Looking GPS Occultation Data, *J. Meteor. Soc. Japan* 82: 433–440.
- ⁴Wickert, J., et al.. 2001. Atmospheric Sounding By GPS Radio Occultation: First results from CHAMP, *Geophys. Res. Lett.* 28: 3.263–3.266.
- ⁵Tsuda, T., and K. Hocke. 2004. Application of GPS Radio Occultation Data for Studies of Atmospheric Waves in the Middle Atmosphere and Ionosphere, *J. Meteor. Soc. Japan*. 82: 419–426.
- ⁶Ratnam, M. V., T. Tsuda, S. Mouri and T. Kozu. 2006. Modulation of Tropopause Temperature Structure Revealed by Simultaneous Radiosonde and CHAMP GPS Measurements, *J. Meteor. Soc. Japan*. 84: 989–1.003.

- ⁷Noersomadi, and T. W. Hadi. 2010. Downward Propagating Equatorial Kelvin Wave over the Eastern Indian Ocean as Revealed from Radiosonde and GPS Radio Occultation (CHAMP) Data. *J. Matematika dan Sains*. 15(1): 39–45.
- ⁸Yoshihira, T., T. Tsuda, and K. Hirahara. 2000. High time resolution measurements of precipitable water vapor from propagation delay of GPS satellite signals. *Earth Planets Space*. 52: 479–493.
- ⁹(<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)
- ¹⁰(<http://cosmic.ucar.edu>)
- ¹¹Sidi, A. 2003. *Practical Extrapolation Methods: Theory and Applications*, Cambridge: Cambridge University Press.
- ¹²Holton, J.R. 2004. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Amsterdam: Elsevier Academic Press.
- ¹³Folkins, I., R.V. Martin. 2005. The Vertical Structure of Tropical Convection and Its Impact on the Budgets of Water Vapor and Ozone. *J. Atmos. Sci.* 62: 1.560–1.573.
- ¹⁴Vedel, H., X.Y. Huang. 2004. Impact of Ground Based GPS Data on Numerical Weather Prediction. *J. Meteor. Soc. Japan*. 82: 459–472.
- ¹⁵Zhang, C. and M. Dong, 2004, Seasonality in the Madden-Julian Oscillation, *American Meteor. Soc.* 17: 3.169–3.180.

