PENCITRAAN DISTRIBUSI VERTIKAL UAP AIR DI KAWASAN BANDUNG MENGGUNAKAN TEKNIK GPS TOMOGRAFI 1D

Suhartawati Sholihah, Wedyanto Kuntjoro, Dudy D. Wijaya

Teknik Geodesi dan Geomatika, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung

ABSTRAK

Global Positioning System (GPS) tidak hanya berguna untuk keperluan navigasi dan penentuan posisi. GPS juga dapat dimanfaatkan untuk keperluan meteorologi seperti pemantauan kondisi atmosfer Bumi. Sinyal GPS yang ditransmisikan dari satelit ke receiver mengalami perlambatan dan pembelokan akibat adanya partikel-partikel pada lapisan troposfer. Salah satu partikel yang memiliki peranan penting terhadap berlangsungnya siklus hidrologi di Bumi adalah uap air. Uap air tersebut bersifat sangat dinamis baik secara spasial maupun temporal. Perbedaan kandungan uap air pada setiap tempat dan ketinggian menyebabkan besarnya refraktivitas pada lapisan troposfer juga bervariasi. Pemantauan uap air dengan ketelitian tinggi masih menjadi tantangan di Indonesia. Informasi yang akurat mengenai uap air tentunya bermanfaat dalam melakukan prediksi cuaca lokal maupun mempelajari iklim global. Salah satu produk dari pengolahan data GPS adalah informasi mengenai estimasi besarnya bias troposfer pada arah zenith atau disebut sebagai Zenith Tropospheric Delay (ZTD). Besarnya hasil estimasi tersebut kemudian dapat dipisahkan menjadi komponen kering atau Zenith Hydrostatic Delay (ZHD) dan uap air atau Zenith Wet Delay (ZWD). Untuk mengetahui besarnya kandungan uap air pada setiap lintasan sinyal, maka ZWD harus dikonversi menjadi Slant Wet Delay (SWD) dengan mengalikan ZWD dan mapping function. Nilai SWD kemudian digunakan untuk melakukan rekonstruksi distribusi vertikal uap air pada troposfer dengan teknik tomografi. Pada penelitian ini digunakan data pengamatan GPS dari stasiun GPS kontinu (CGPS) ITB selama satu hari. Hasil yang didapatkan menyatakan bahwa Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique (MART) berhasil diterapkan untuk menyelesaikan persamaan linear dalam menentukan refraktivitas komponen basah dengan GPS tomografi 1D. Penelitian lebih lanjut dengan memanfaatkan jaringan stasiun CGPS dan pengembangan metode numerik dapat memberikan hasil yang lebih optimal dan akurat.

Kata kunci: GPS, zenith wet delay, slant wet delay, tomografi, MART

ABSTRACT

GPS is not only useful for navigation and positioning purposes. GPS can also be used for meteorological purposes such as monitoring Earth's atmosphere. GPS signals transmitted from satellites to receivers is distorted and delayed due to particles existence in the troposphere. Water vapor has a significant role in hydrological cycle on Earth. Water vapor is very diverse spatially and temporally. Therefore, troposphere refractivity is diverse too. High-accuracy water vapor monitoring has been challenging in Indonesia. That information is certainly useful for numerical weather prediction and global climate studies. GPS data processing can estimate the magnitude of troposphere bias in zenith direction or well known as Zenith Tropospheric Delay (ZTD). Troposphere bias can then be separated into dry components or Zenith Hydrostatic Delay (ZHD) and water vapor or Zenith Wet Delay (ZWD). In order to know the amount of water vapor content in each signal path, ZWD must be converted to Slant Wet Delay (SWD) by multiplying ZWD and mapping function. SWD are then used to reconstruct vertical water vapor distribution in the troposphere by using tomography technique. This research used GPS observation data from CGPS ITB station for one day. The result shows that Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique (MART) was successfully applied to solve linear equations in determining wet refractivity. Further research using CGPS station network and numerical method development can provide more optimal and accurate water vapor distribution.

Keywords: GPS, zenith wet delay, slant wet delay, tomography, MART

1. PENDAHULUAN

Pada saat ini teknologi Global Positioning System (GPS) tengah mengalami perkembangan yang sangat pesat. Pemanfaatannya tidak terbatas hanya untuk keperluan penentuan posisi dan navigasi. Berbagai metode pengolahan data GPS yang telah berkembang diantaranya bisa memberikan hasil estimasi koreksi kesalahan yang diakibatkan sinyal melewati lapisan troposfer (bias troposfer). Koreksi tersebut dapat dimanfaatkan untuk bidang selain geodesi yakni meteorologi maupun hidrologi. Stasiun pengamatan GPS kontinu telah tersebar hampir merata di seluruh wilayah Indonesia. Dalam bidang meteorologi, GPS memiliki potensi yang besar untuk pengembangan model numerik dalam prediksi cuaca di Indonesia. Bias troposfer yang diestimasi saat pengolahan data GPS merupakan gabungan dari komponen kering dan komponen basah. Komponen basah tersebut berkaitan dengan kandungan uap air yang ada pada lapisan troposfer. Informasi kandungan uap air tersebut masih merepresentasikan jumlah total secara vertikal. Namun, pada kenyataannya uap air bervariasi secara spasial maupun temporal. Pemantauan uap air di Indonesia dengan ketelitian tinggi masih menjadi tantangan. Alat tradisional yang telah digunakan untuk pemantauan uap air seperti radiosonde belum efektif memberikan informasi distribusi uap air dengan akurasi tinggi disertai faktor biaya yang cukup mahal. Untuk menjawab tantangan tersebut, GPS meteorologi dengan teknik tomografi memberikan solusi yang lebih efektif dalam melakukan pemantauan distribusi uap air pada troposfer. Pada penelitian ini, telah dilakukan pengolahan data pengamatan GPS selama satu hari dari stasiun CGPS ITB1. Dengan menggunakan jaringan stasiun GPS maka semakin banyak data pengamatan serta penelitian ini dapat dikembangkan menjadi GPS tomografi 4D (Manning dkk., 2012).

2. METODE PENELITIAN

a. Pengolahan Data GPS

Sinyal GPS merupakan gelombang elektromagnetik yang ditransmisikan oleh satelit GPS ke *receiver* di Bumi. Sinyal

tersebut terlebih dahulu berinteraksi dengan atmosfer yang mengandung molekul-molekul tidak homogen. Interaksi tersebut mempengaruhi kecepatan dan arah sinyal GPS sehingga mempengaruhi hasil ukuran jarak. Oleh karena itu perlu dilakukan koreksi terhadap ukuran jarak atau dikenal dengan *delay correction*. Besarnya kesalahan yang diakibatkan sinyal GPS ketika melalui lapisan troposfer disebut dengan bias troposfer. Dalam praktiknya, bias troposfer dapat diestimasi dengan memodelkannya ke arah zenith atau disebut sebagai *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD). Bias troposfer terdiri dari komponen kering dan komponen basah (Bevis, 1992). Komponen kering disebut juga sebagai komponen hidrostatik (ZHD) sedangkan komponen basah disebut juga sebagai komponen *non*-hidrostatik (ZWD). Komponen hidrostatik dipengaruhi oleh tekanan sehingga besarnya cenderung stabil. Sedangkan komponen *non*-hidrostatik dipengaruhi oleh uap air yang sifatnya bervariasi secara spasial maupun temporal. Hal ini menyebabkan ZHD lebih mudah diestimasi dibandingkan ZWD. Dalam penentuan posisi di geodesi, ZTD merupakan faktor koreksi terhadap jarak yang bisa diestimasi menggunakan model yang telah ada. Salah satu model yang umum digunakan adalah Saastamoinen.

Pengolahan data GPS metode *Precise Point Positioning* (PPP) pada dasarnya adalah metode penentuan posisi absolut yang menggunakan data *one-way* fase dan pseudorange dalam bentuk kombinasi bebas ionosfer. Parameter yang ditentukan dalam pengolahan data metode PPP adalah tiga komponen posisi, kesalahan jam *receiver*, serta bias troposfer di arah zenith (ZTD). Metode tersebut hanya melibatkan satu *receiver* GPS dan memerlukan koreksi orbit dan jam satelit (Abidin dkk., 2007). Koreksi orbit dan jam satelit merupakan produk IGS yang bisa didapatkan secara gratis di situsnya. Namun, untuk data koreksi yang paling presisi dan kualitas paling tinggi bisa didapatkan hampir dua minggu setelah waktu pengamatan.

Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya bahwa bias troposfer ZTD dapat diuraikan menjadi ZHD dan ZWD, persamaan yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai ZHD adalah (Saastamoinen, 1973):

$$ZHD = 0.0022768 \cdot \frac{p}{(1 - 0.00266 \cdot \cos(2\varphi) - 0.28 \cdot 10^{-6} \cdot h)} \quad (1)$$

dengan p merupakan tekanan (hPa), φ merupakan latitude, dan h merupakan tinggi ellipsoid (m).

Perhitungan ZHD dilakukan menggunakan data meteorologi dari model *gpt2_1w* (*Global Pressure and Temperature 2 wet*) (Lagler dkk., 2013). Model tersebut membutuhkan parameter masukan berupa waktu (dalam *modified julian date*), *latitude*, *longitude*, dan tinggi ellipsoid. Parameter keluarannya berupa tekanan (hPa), temperatur (°C), temperatur rata-rata uap air (K), tekanan uap air (hPa), koefisien *hydrostatic mapping function*, koefisien *wet mapping function*, faktor penurunan uap air, serta undulasi geoid.

Setelah mendapatkan nilai komponen hidrostatik, maka komponen *non*-hidrostatik ZWD dapat dihitung dengan mengurangkan ZHD terhadap bias troposfer ZTD.

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (2)$$

b. GPS Tomografi

Dalam konteks pemodelan koreksi atmosfer, perambatan gelombang elektromagnetik melalui atmosfer dapat diturunkan dari persamaan Maxwell. Dari persamaan tersebut, kemudian akan diturunkan persamaan-persamaan untuk mempelajari dan memodelkan refraktivitas pada atmosfer (Wijaya, 2016)).

Indeks refraksi n didefinisikan sebagai rasio kecepatan gelombang elektromagnetik dalam vakum c terhadap kecepatan dalam medium v [7].

$$n \equiv \frac{c}{v} \quad (3)$$

Pada kenyataannya nilai indeks refraksi selalu mendekati 1. Hal tersebut menyebabkan nilai $(n - 1)$ pada *delay correction* akan sangat kecil. Dengan demikian *delay correction* dapat diubah dengan melibatkan nilai refraktivitas (N) yang besarnya adalah $10^6(n - 1)$.

Bias troposfer pada saat pengamatan satelit dengan sudut elevasi e atau *Slant Total Delay* (STD) didefinisikan sebagai perkalian antara ZTD dengan $mf(e)$.

$$STD = ZTD \cdot mf(e) \quad (4)$$

dengan

$$ZTD = 10^{-6} \int_p N(f, \vec{r}) dz \quad (5)$$

dan

$$mf = \frac{\int_p N(f, \vec{r}) ds + d_{geo}}{\int_p N(f, \vec{r}) dz} \quad (6)$$

N adalah refraktivitas lapisan atmosfer sepanjang lintasan sinyal, f adalah frekuensi gelombang elektromagnetik, $\vec{r}$ adalah vektor posisi sepanjang lintasan sinyal, dz adalah elemen diferensial sepanjang lintasan sinyal dalam arah zenith, dan d_{geo} adalah efek pembelokan geometrik.

Slant Wet Delay (SWD) merupakan besarnya kandungan komponen basah pada troposfer sepanjang arah lintasan sinyal. SWD dapat didefinisikan sebagai persamaan berikut [1].

$$SWD = 10^{-6} \int N_w ds \quad (7)$$

Untuk mendapatkan nilai SWD dapat dilakukan dengan mengalikan ZWD dengan *mapping function*. Salah satu *mapping function* yang dapat digunakan adalah *Vienna Mapping Function 1* (VMF1) (Boehm dkk., 2006).

Mapping function digunakan untuk mengestimasi bias troposfer pada setiap sudut elevasi satelit yang teramati. *Mapping function* didefinisikan sebagai rasio *slant delay* dengan *zenith delay*. VMF1 merupakan sebuah model yang dikembangkan untuk gelombang *microwave* seperti yang terdapat pada GNSS dan VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*). Koefisien VMF1 ditentukan dari *ray tracing* data ECMWF (*European*

Centre for Mid-Range Weather Forecast) dengan resolusi temporal setiap 6 jam.

VMF1 memberikan *mapping function* untuk masing-masing komponen bias troposfer yakni komponen hidrostatik dan *non*-hidrostatik. Oleh karena itu koefisien untuk masing-masing komponen tersebut juga berbeda. Untuk *mapping function* komponen hidrostatik, nilai koefisien b_h adalah tetap sementara a_h dan c_h tergantung pada waktu. Sementara itu untuk *mapping function* komponen *non*-hidrostatik, nilai koefisien b_w dan c_w adalah tetap sementara a_w tergantung pada waktu.

Tomografi telah berhasil diterapkan dalam beberapa bidang seperti studi seismik dan oseanografi menggunakan akustik serta pemantauan ionosfer. GPS dapat secara terus-menerus mentransmisikan sinyal ke *receiver* di Bumi dan dipengaruhi oleh keberadaan atmosfer. Oleh karena itu sinyal GPS dapat digunakan sebagai data untuk menerapkan GPS tomografi. Struktur spasial dan temporal uap air dapat dimodelkan menggunakan teknik GPS tomografi (Sato dkk., 2006).

Pada prinsipnya, teknik GPS tomografi memenuhi persamaan yang menghubungkan *Slant Wet Delay* (SWD) dengan *Wet Refractivity* (N_w) sepanjang lintasan sinyal sebagaimana tertulis pada persamaan 7. Dalam kasus tersebut SWD didapatkan dari pengamatan GPS dan N adalah parameter yang belum diketahui sehingga perlu direkonstruksi dari persamaan-persamaan pengamatan. Persamaan 7 dapat dipecahkan dengan mendiskritkan troposfer menjadi beberapa grid atau vokal. Pembagian lapisan troposfer menjadi beberapa vokal ditunjukkan oleh gambar 1.

Gambar 1. Pembagian lapisan troposfer menjadi vokal-vokal

Setiap grid atau vokal tersebut akan memiliki nilai refraktivitasnya masing-masing. Dengan demikian persamaan yang kemudian berlaku adalah:

$$SWD = 10^{-6} \sum_s N ds \quad (8)$$

Persamaan 8 dapat diuraikan menjadi seperti berikut.

$$\begin{aligned} SWD^1 &= n_1 ds_1^1 + n_2 ds_2^1 + n_3 ds_3^1 + n_4 ds_4^1 \\ SWD^2 &= n_1 ds_1^2 + n_2 ds_2^2 + n_3 ds_3^2 + n_4 ds_4^2 \\ SWD^3 &= n_1 ds_1^3 + n_2 ds_2^3 + n_3 ds_3^3 + n_4 ds_4^3 \\ SWD^n &= n_1 ds_1^n + n_2 ds_2^n + n_3 ds_3^n + n_4 ds_4^n \end{aligned}$$

Selanjutnya jika diubah ke dalam bentuk matriks maka akan didapat matriks sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} SWD^1 \\ SWD^2 \\ SWD^3 \\ \vdots \\ SWD^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ds_1^1 & ds_2^1 & ds_3^1 & \dots & ds_n^1 \\ ds_1^2 & ds_2^2 & ds_3^2 & \dots & ds_n^2 \\ ds_1^3 & ds_2^3 & ds_3^3 & \dots & ds_n^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ ds_1^m & ds_2^m & ds_3^m & \dots & ds_n^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ \vdots \\ n_n \end{bmatrix}$$

Nilai SWD dan ds diperoleh dari hasil pengamatan GPS. ds merupakan panjang lintasan sinyal yang melalui suatu vokal dan diperoleh dari perhitungan yang diturunkan dari elevasi satelit. Parameter yang dicari adalah n dan akan didapatkan dari hasil inversi.

Inversi tomografi dapat dilakukan salah satunya dengan menggunakan MART (*Multiplicative Algebraic Reconstruction Techniques*). MART adalah salah satu metode

yang dapat diterapkan untuk menyelesaikan masalah inversi untuk persamaan 8. Metode ini menerapkan teknik iterasi yang memproses dari pengamatan demi pengamatan. Teknik ini juga tidak perlu melakukan invers matriks dan tidak memerlukan tempat penyimpanan yang besar pada komputer. MART memerlukan dua vektor berupa x , m dan matriks desain A yang berisi segmen lintasan sinyal dalam voksel. Persamaan MART adalah sebagai berikut (Bender, 2010):

$$x_j^{k+1} = x_j^k \cdot \left(\frac{m_i}{\langle A^i, x^k \rangle} \right) \sqrt{\frac{\lambda A_j^i}{\langle A^i, A \rangle}} \quad (9)$$

Pada persamaan di atas menunjukkan metode MART memerlukan nilai x yakni sebagai nilai refraktivitas pendekatan. Dalam penelitian ini digunakan data meteorologi NCEP berupa temperatur udara, tinggi geopotensial, dan kelembaban. Dari ketiga data tersebut akan dicari nilai tekanan parsial uap air. Kemudian, tinggi geopotensial, tekanan udara, temperatur, dan tekanan parsial uap air akan menjadi masukan dalam mencari nilai pendekatan x . NCEP menyediakan data setiap enam jam dalam satu hari yakni pada pukul 00:00, 6:00, 12:00, dan 18:00 waktu UTC.

Pengolahan dengan teknik tomografi membagi lapisan troposfer menjadi beberapa voksel. Banyaknya voksel dipengaruhi oleh penentuan parameter yang dilakukan sebelum menjalankan program tomografi. Luas area menentukan jumlah voksel yang dapat terisi data. Proses tomografi GPS yang menggunakan satu *receiver* ini menggunakan cakupan wilayah seluas sekitar 40 km x 40 km dengan stasiun ITB1 sebagai pusatnya. Cakupan wilayah seluas 40 km x 40 km tersebut memungkinkan adanya lintasan sinyal GPS yang masuk ke dalam voksel. Ketika cakupan dipersempit, hasil yang didapatkan yaitu tidak ada lintasan sinyal GPS yang masuk ke dalam voksel.

c. Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu data pengamatan GPS berformat RINEX dari stasiun ITB1 selama 1 hari, yakni pada

tanggal 30 Januari 2011. Data ini memiliki epoch pengamatan setiap 30 detik.

Data *precise orbit* berformat sp3 ini diunduh secara gratis di <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/>. Data ini pada dasarnya memiliki informasi posisi setiap satelit (X, Y, Z dalam satuan km).

Data *precise clock* merupakan produk IGS yang dapat diunduh di <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products> untuk koreksi kesalahan jam satelit.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan data GPS dilakukan menggunakan perangkat lunak RTKLib. Dari pengolahan tersebut, didapatkan ZTD seperti ditunjukkan pada gambar 2. Rata-rata nilai ZTD tersebut adalah 2.37 m. Selanjutnya estimasi ZHD menggunakan model Saastamoinen dan parameter meteorologi dari model gpt2_w1 didapatkan hasil seperti gambar 3. ZWD didapatkan dari pengurangan ZHD terhadap ZTD seperti pada gambar 4.

Gambar 2. ZTD 30 Januari 2011 dari pengamatan GPS

Gambar 3. ZHD 30 Januari 2011 dari pengamatan GPS

Gambar 4. ZWD 30 Januari 2011 dari pengamatan GPS

Dari ketiga gambar di atas, dapat dilihat bahwa nilai ZTD tertinggi terjadi pada saat tengah hari. Pola nilai ZHD terlihat berbeda dengan nilai ZWD. nilai ZHD terlihat relatif tetap sepanjang hari sedangkan nilai ZWD tertinggi terjadi saat tengah hari.

Slant Wet Delay (SWD) yang dihasilkan dari proses pengolahan data GPS tanggal 30 Januari 2011 dari stasiun ITB1 adalah sebagai

berikut.

Gambar 5. Nilai *Slant Wet Delay*

Dari gambar di atas, terlihat besarnya SWD dipengaruhi oleh elevasi satelit. Semakin tinggi elevasi satelit, maka SWD juga semakin kecil karena lintasan sinyal lebih pendek. Tidak adanya satelit yang memiliki elevasi di bawah 15° dikarenakan pengaturan yang telah dilakukan di awal pengolahan data.

Dalam melakukan tomografi 1D ini, banyak layer vertikal yang akan terbentuk ada 100 layer, sedangkan dalam arah horizontal tidak ada pembagian segmen. Dengan demikian dalam kasus ini jumlah voksel sama dengan jumlah layer.

Dari seluruh pengamatan selama satu hari, dalam proses tomografi ini dibagi menjadi setiap satu jam pengamatan sehingga ada 24 bagian. Hal ini bertujuan untuk mengetahui variasi temporal dari troposfer.

Jumlah pengamatan yang masuk ke dalam voksel berbeda-beda setiap jamnya. Hal ini dipengaruhi oleh elevasi dan azimuth satelit pada saat tertentu. Jumlah pengamatan tersebut ditunjukkan dengan gambar 6 berikut.

Gambar 6. Banyak pengamatan yang masuk voksel setiap jam

Inversi tomografi dilakukan untuk mendapatkan nilai refraktivitas setiap layer berdasarkan hasil dari teknik tomografi sebelumnya, seperti tertulis pada persamaan 9.

Hasil pengolahan menunjukkan bahwa refraktivitas bervariasi secara temporal.

Hampir pada setiap jam nilai refraktivitas mendekati 0 mulai dari ketinggian 10 km. Sedangkan pada ketinggian sekitar 3 hingga 4 km, nilai refraktivitas relatif hanya sedikit mengalami perubahan dengan ditunjukkan gradien yang kecil. Besarnya refraktivitas ini berbanding lurus dengan kandungan uap air yang ada di troposfer. Hal ini sesuai dengan yang tertulis pada persamaan 7.

Sebagaimana telah diketahui bahwa pada lapisan troposfer terjadi penurunan suhu

seiring dengan bertambahnya ketinggian. Berdasarkan teori ini, pada ketinggian 8 km suhu di lapisan tersebut mencapai -40°C sampai -80°C . Kondisi ini menyebabkan uap air sulit untuk dapat menembus ke lapisan di atasnya karena segera mengalami kondensasi dan kemudian jatuh ke Bumi dalam bentuk cair (hujan) ataupun padat (salju, es).

Gambar 7. Perbandingan antara ZWD dari hasil tomografi GPS dan hasil hitungan

Dari nilai refraktivitas yang sudah didapat dari inversi tomografi, kemudian dapat dihitung kembali besarnya ZWD dengan mengalikan refraktivitas terhadap panjang segmen layer. Pada gambar 7 dapat dilihat bahwa *wet delay* tertinggi selama satu hari terjadi pada waktu menjelang siang hari. Pola tersebut sama dengan hasil pengolahan data GPS sebelumnya seperti pada gambar 4. Sementara terendah terjadi pada dini hari. Hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai refraktivitas dari inversi tomografi telah sesuai.

Pada persamaan 9 terdapat variabel k untuk menentukan banyaknya iterasi yang akan dilakukan dalam penyelesaian menggunakan metode MART. Besarnya nilai k ini tidak dapat ditentukan dengan pasti karena tergantung pada kualitas data, nilai

pendekatan, dan parameter-parameter lain yang digunakan. Pada penelitian ini, telah dicoba menggunakan nilai k yang berbeda-beda sampai mendapatkan nilai ZWD dari GPS tomografi yang stabil.

Nilai k paling besar yang digunakan adalah 16 yang digunakan untuk menghitung refraktivitas pada pukul 6:00 WIB. Pada jam tersebut, jumlah pengamatan *slant delay*

(a)

(b)

paling minimum dibandingkan dengan jam pengamatan lainnya. Jumlah pengamatan ada 74 dengan parameter yang ditentukan ada 100.

Dari hasil pengolahan inversi tomografi, refraktivitas troposfer yang bervariasi secara temporal selama 24 jam kemudian digabungkan menjadi sebuah citra uap air selama satu hari dari ketinggian 0 hingga 10 km seperti ditunjukkan pada gambar 8. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa kandungan uap air di lapisan yang dekat dengan permukaan Bumi lebih tinggi dan semakin menurun seiring dengan bertambahnya ketinggian. Variasi kandungan uap air secara vertikal di lapisan bawah lebih besar, yakni setiap kurang dari 1 km kandungan uap airnya berubah. Sedangkan

Gambar 8. Rekonstruksi refraktivitas uap air pada tanggal 30 Januari 2011, (a) dengan data NCEP, (b) dengan teknik GPS tomografi 1D

pada ketinggian 3 km ke atas, perubahan secara vertikal terjadi hingga setiap 2 km.

4. KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Indeks refraksi lapisan troposfer di kawasan Bandung dari pengolahan data GPS dengan teknik tomografi memiliki nilai berbeda dengan data model NCEP. Pengolahan data GPS memberikan hasil yang lebih baik karena merupakan data pengamatan langsung dan dapat mewakili kondisi yang sebenarnya, ditunjukkan dengan hasil ZWD yang sama dengan pengolahan data awal. Besarnya indeks refraksi bervariasi pada setiap ketinggian dan setiap waktu.
2. Distribusi vertikal uap air di kawasan Bandung bervariasi secara spasial dan temporal. Hal ini ditunjukkan dengan profil refraktivitas yang semakin menurun seiring dengan bertambahnya ketinggian. Uap air mendekati 0 pada ketinggian 10 km. Variasi kandungan uap air secara vertikal di lapisan bawah lebih besar, yakni setiap kurang dari 1 km kandungan uap airnya berubah. Sedangkan pada ketinggian 3 km ke atas, perubahan secara vertikal terjadi hingga setiap 2 km.
3. Algoritma *Multiplicative Algebraic Reconstruction Techniques* (MART) dapat digunakan untuk menyelesaikan matriks yang tidak dapat diinversi, seperti pada kasus dalam menyelesaikan persamaan linear untuk mencari refraktivitas komponen basah dengan GPS tomografi.

Ucapan Terima Kasih

Kami mengucapkan terima kasih kepada Kelompok Keilmuan Geodesi ITB yang telah membantu menyediakan data pengamatan GPS untuk penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H. Z. 2007. *Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya*, Jakarta: PT Pradnya Paramita.
- Bender, M., Dick G., Ge M., Deng Z., Wickert J., Kahle H. G., Raabe A., Tetzlaff G. 2011. Development of a

GNSS Water Vapour Tomography System Using Algebraic Reconstruction Technique, *Advanced in Space Research*, vol. 47, no. 10, pp. 1704-1720.

- Bevis, M., Businger S., Herring T. A., Rocken C., Anthes R. A., dan Ware R. H. 1992. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System, *Journal of Geophysical Research*.
- Boehm, J., Werl B., dan Schuh H. 2006. Troposphere Mapping Function for GPS and VLBI from ECMWF Operational Analysis Data, *Journal of Geophysical Research*, Vols. 111, B02406.
- Lagler, K., Schindelegger M., Boehm J., Krasna H., Nilsson T. 2013. GPT2: Empirical Slant Delay Model for Radio Space Geodetic Techniques *Geophysical Research Letters*, vol. 40, no. doi:10.1002/grl.50288, pp. 1069-1073.
- Manning, T., Zhang K., dan Rohm. 2012. Detecting Severe Weather using GPS Tomography: An Australian Case Study, *Journal of Global Positioning System*, pp. Vol.11, No.1: 58-70.
- Saastamoinen, J. 1973. Contribution to the Theory of Atmospheric Refraction, *Bulletin Géodésique (1946-1975)*, vol. 107, no. 1, pp. 13-34.
- Sato, K., Eugenio R., Tsuda T., Seko H. 2013. A High-Resolution, Precipitable Water Vapor Monitoring System Using a Dense Network of GNSS Receivers, *Journal of Disaster Research*.
- Wijaya, D. D. 2010. Atmospheric Correction Formulae for Space Geodetic Technique. *Dissertation*, Engineering Geodesy, Graz University of Technology, Austria, 2010.
- Wijaya, D. D. 2016. Catatan Kuliah, *Teknik Geodesi dan Geomatika ITB*, 2016.