

*Determination of ZNHD based on
GPS Data, Radiosonde, and
Numerical Weather Model*

**Penentuan ZNHD Berdasarkan Data
Pengamatan GPS, Radiosonde, dan
Model Atmosfir Global**

Susilo^{1,2}

Dudy D. Wijaya¹

Wedyanto Koentjoro¹

Joni Efendi²

¹Geodesy Research Division, Faculty of Earth Sciences and Technology, ITB

²Geospatial Information Agency (BIG)

***Determination of ZNHD based on GPS Data, Radiosonde,
and Numerical Weather Model***

**Penentuan ZNHD Berdasarkan Data Pengamatan GPS,
Radiosonde, dan Model Atmosfir Global**

Susilo^{1,2}, Dudy D. Wijaya¹, Wedyanto Koentjoro¹, Joni Efendi²

¹) Geodesy Research Division, Faculty of Earth Sciences and Technology, Institut Teknologi Bandung, Ganesha 10, Bandung 40132, West Java, INDONESIA

²) Geospatial Information Agency (BIG), INDONESIA

Email: susilo@bakosurtanal.go.id, dudy@itb.ac.id, wedyanto@gd.itb.ac.id,
joniefendi@yahoo.com

Abstract. Water vapor is a principal element in the thermodynamics of the atmosphere and plays an important role in clouds condensation, which eventually can affect the radiative energy balance. Water vapor observation is essential for monitoring global/regional scale of weather and climate changes. However, high variation of water vapor concentrations makes it difficult to observe accurately using the conventional meteorological observation technique (radiosonde), which is limited in both space and time. Nowadays, accurate observation of water vapor can be accomplished by the Global Positioning System (GPS). In this research, we use 14 continuous GPS stations from Bakosurtanal to observe temporal characteristic of water vapor concentration over West Java region.

In this research, site-specific ZTD were hourly estimated during three years of GPS measurement period (2008-2010). In general, validation of the IGS ZTD with the ZPD shows a good agreement with bias ~ 1:05 mm, mean standard deviation and rms ~ 7.48 with coefficient correlation 0.97. ZNHD GPS and ZNHD radiosonde Bakosurtanal shows the similar pattern with coefficient correlation 0.99 and bias ~-7.77 mm, and standard deviation ~15.56 and rms ~15.14 mm. The comparison between ZNHD GPS with ZNHD radiosonde Cengkareng shows a similar pattern with mean bias ~2.2 cm, rms ~2.9 cm with coefficient correlation 0.81. ZNHD GPS station from NCEP data were affected by topographic GPS station (orthometric height). ZNHD NCEP for GPS station with low orthometric height give a good result with coefficient correlation greater than 0.50 while ZNHD NCEP for high orthometric height GPS station have coefficient correlation less than 0.50.

Keywords: GPS, NCEP, radiosonde, topographic, ZNHD.

Abstrak. Uap air adalah elemen utama proses termodinamika atmosfer dan mempunyai peranan yang penting dalam proses kondensasi dan pembentukan awan, yang akhirnya dapat mempengaruhi keseimbangan energi radiasi. Pengamatan uap air sangat penting untuk memantau cuaca dan perubahan iklim dalam skala global/regional. Namun, variasi konsentrasi uap air yang tinggi sehingga sulit untuk diamati secara akurat menggunakan teknik pengamatan meteorologi konvensional (radiosonde), yang terbatas dalam ruang dan waktu. Saat ini, *Global Positioning System* (GPS) dapat digunakan untuk pengamatan uap air secara akurat. Dalam penelitian ini, kami menggunakan 14 stasiun kontinu GPS Bakosurtanal untuk mengamati karakteristik temporal uap air di atas wilayah Jawa Barat.

ZTD GPS setiap stasiun di estimasi dengan interval 1 jam dalam periode data 2008 - 2010. Secara umum, validasi ZTD dengan ZPD (IGS) memberikan hasil yang cukup bagus dan valid dengan rata-rata bias = ~ 1.05 mm, rata-rata std dan rms = ~ 7.48 dan korelasi = 0.97. Validasi ZNHD GPS dengan ZNHD radiosonde Bakosurtanal memberikan pola yang mirip dengan korelasi yang tinggi = ~ 0.99 dengan nilai bias = ~ -7.77 mm, std = ~ 15.56 mm dan rms = ~ 15.14 mm. Perbandingan ZNHD GPS dengan ZNHD radiosonde Cengkareng memberikan hasil yang bagus dengan rerata bias = ~ 2.2 cm dan rms = ~ 2.9 cm dengan koefisien korelasi = 0.81. Faktor jarak stasiun GPS dengan stasiun radiosonde Cengkareng mempengaruhi hasil perbandingan ZNHD GPS dan ZNHD radiosonde Cengkareng. Penentuan ZNHD dari data NCEP untuk stasiun GPS sangat dipengaruhi oleh kondisi topografi (tinggi orthometrik). Perbandingan ZNHD GPS dan ZNHD NCEP untuk stasiun GPS dengan topografi rendah akan memberikan hasil yang lebih bagus dibandingkan dengan stasiun GPS di daerah pegunungan. Hasil penelitian menunjukkan perbandingan ZNHD GPS dan ZNHD NCEP untuk stasiun GPS topografi rendah mempunyai korelasi di atas 0.5 sedangkan untuk stasiun GPS dengan topografi tinggi korelasinya di bawah 0.5.

Kata kunci: GPS, NCEP, radiosonde, topografi, ZNHD.

PENDAHULUAN

Uap air adalah elemen utama proses termodinamika atmosfer dan mempunyai peranan yang penting dalam proses kondensasi dan pembentukan awan, yang akhirnya dapat mempengaruhi keseimbangan energi radiasi. Pengamatan uap air sangat penting untuk memantau cuaca dan perubahan iklim dalam skala global/regional. Namun, variasi konsentrasi uap air yang tinggi sehingga sulit untuk diukur secara akurat menggunakan teknik pengamatan meteorologi konvensional (radiosonde), yang terbatas dalam ruang dan waktu [Mockler, 1995 dan Gabor, 1997].

Teknologi GPS/GNSS yang awalnya bertujuan untuk penentuan posisi secara teliti, dapat dimanfaatkan untuk aplikasi di bidang meteorologi, salah satunya adalah untuk penentuan kandungan uap air (*Precipitable Water Vapor/PWV*). Dari pengolahan data GPS/GNSS, efek penjarangan sinyal GPS di lapisan atmosfer (troposfer) merupakan salah satu bias yang mempengaruhi ketelitian posisi yang dihasilkan. Efek ini biasa disebut dengan *delay* troposfer dan harus dipertimbangkan dalam pengolahan data GPS, baik diestimasi [Herring, et.al, 1990; Macmillan, 1995; Bar-sever, et.al, 1998] ataupun dimodelkan [Saastamoinen, 1972; Herring, 1992; Neill, 1996; Boehm, 2007; Wijaya, 2010; Wijaya, 2011]. Dengan menggunakan fungsi pemetaan parameter *delay* troposfer pada arah lintasan satelit GPS (*Slant Total Tropospheric Delay/STD*) dapat dikonversi menjadi parameter *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD), yang sangat dipengaruhi oleh kondisi suhu, tekanan, dan kelembaban lokasi antena receiver. ZTD dibagi menjadi dua komponen, yaitu komponen hidrostatis (*Zenith Hydrostatic Delay* atau ZHD) dan komponen non-hidrostatis (*Zenith non-Hydrostatic Delay* atau ZNHD). ZHD dihitung dengan menggunakan data pengamatan suhu, tekanan, dan kelembaban di sekitar stasiun GPS, sedangkan ZNHD diperoleh dari selisih ZTD dan ZHD [Hofmann-Wellenhof et.al, 2001].

Untuk mempelajari perubahan cuaca/iklim, ZNHD yang di dalamnya terkandung informasi uap air harus dikonversi menjadi PWV. ZNHD merupakan fungsi dari *water vapor* dan suhu. Sejauh ini, radiosonde merupakan metode utama yang selalu digunakan untuk pengukuran di bidang meteorologi.

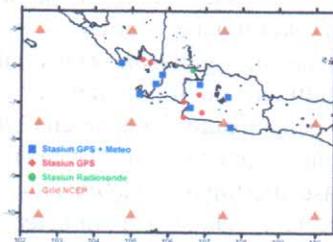
Dalam penelitian ini, akan dibahas tentang penentuan ZNHD dari data GPS, radiosonde, dan model atmosfer global NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*).

2 Metodologi

2.1 Data dan Wilayah Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data kontinu GPS Bakosurtanal tahun 2008 - 2010, data radiosonde Bakosurtanal tanggal 28 Juli - 01 Agustus 2010, data radiosonde stasiun Cengkareng dan Surabaya tahun 2008 - 2010 dari <http://weather.uwyo.edu>, dan data model global atmosfer NCEP tahun 2008 - 2010 dari <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>, data ZPD (*Zenith Path Delay*) IGS stasiun darw dan bako tahun 2008 - 2010 dari <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov>.

Distribusi stasiun GPS, stasiun radiosonde dan grid NCEP dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Distribusi stasiun kontinu GPS, stasiun radiosonde, dan grid NCEP.

2.2 Penentuan ZHD dan ZNHD dari Data Profil Vertikal Atmosfer

Profil vertikal atmosfer dapat diperoleh dari peluncuran radiosonde dan model global atmosfer. Informasi parameter meteorologi sepanjang lintasan vertikal dapat digunakan untuk penentuan *delay* troposfer, yaitu dengan menghitung integral parameter meteorologi sepanjang lintasan. Adapun informasi yang digunakan untuk menghitung *delay* troposfer antara lain suhu, tekanan, kelembaban dan tinggi geopotensial. ZTD dapat ditentukan dengan mengintegrasikan refraktifitas troposfer dalam setiap layer, yang kemudian dapat diuraikan menjadi ZHD dan ZNHD seperti terlihat pada persamaan (1) dan (2).

$$ZHD = 10^{-6} \sum_{ii} k_1 R_d \rho_{t_{ii}} \Delta h_{ii} \quad (1)$$

$$ZNHD = 10^{-6} \sum_{ii} k_3 R_v \rho_{v_{ii}} \left(\frac{1}{T_{ii}} + k_5 \right) \Delta h_{ii} \quad (2)$$

Dimana k_1 adalah konstanta refraktifitas yang menunjukkan induksi momen dipole untuk molekul udara kering, k_3 adalah konstanta orientasi polarisasi molekul water vapor, k_5 adalah konstanta refraktifitas water vapor (Wijaya, 2010), R_d adalah konstanta spesifik gas kering, R_v adalah konstanta spesifik water vapor, $\rho_{t_{ii}}$ adalah total densitas udara dalam lapisan atmosfer ii , $\rho_{v_{ii}}$ adalah total densitas water vapor

dalam lapisan atmosfer ii , Δh_{ii} adalah selisih tinggi lapisan atmosfer antara layer, ii adalah layer lapisan atmosfer, T_{ii} adalah suhu pada layer lapisan atmosfer.

Persamaan (1) dan (2) merupakan persamaan dasar untuk menghitung *delay* troposfer dari data profil vertikal (radiosonde dan model global atmosfer) [Susilo, 2012].

2.3 Penentuan ZHD dan ZNHD dari Data GPS

ZHD dan ZNHD dari data GPS dapat diekstrak dari ZTD hasil pengolahan data GPS. Pengolahan data GPS untuk menentukan ZTD menggunakan perangkat lunak ilmiah GAMIT 10.4 [King, et.al, 2010]. ZTD diestimasi dari data *double difference phase* dengan mengasumsikan bahwa komponen kesalahan jam satelit dan jam receiver sudah dieliminir dengan proses pengurangan data, *delay* ionosfer direduksi dengan menggunakan kombinasi linier, kesalahan orbit direduksi dengan menggunakan orbit final IGS atau di *fixed*, efek multipath dieliminir dengan menggunakan sudut elevasi pengamatan, jenis antena *chokering*, dan model absolut antena (*igs_05.atx*), sedangkan ambiguitas fase diestimasi terlebih dahulu, dan *noise* receiver diabaikan sehingga parameter yang tersisa adalah jarak geometrik dan STD, yang diestimasi bersamaan dalam pengolahan data. Dengan menggunakan fungsi pemetaan Neill (1996), ZTD dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$ATDEL(EL) = DRYZEN * DRYMAP(EL) + WETZEN * WETMAP(EL) \quad (3)$$

dimana EL adalah elevasi satelit GPS, $ATDEL$ adalah *delay* atmosfer pada arah lintasan satelit GPS, $DRYZEN$ adalah *zenith dry delay* (ZDD/ZHD), $WETZEN$ adalah *zenith wet delay* (ZWD/ZNHD), $DRYMAP$ dan $WETMAP$ adalah fungsi pemetaan untuk udara kering (*hidrostatik delay*) dan udara basah (*non-hidrostatik delay*). *A priori* ZHD dan ZNHD dihitung dari menggunakan model Saastamoinen (1972). Jika tidak ada data pengamatan meteorologi permukaan, *a priori* untuk tekanan dan suhu diperoleh dari GPT 50 (*Global Pressure and Temperature*) dari Boehm dan Schuh (2006).

Setelah ZTD diperoleh dari pengolahan data GPS, selanjutnya ZHD dihitung menggunakan persamaan (4) dengan input data tekanan permukaan.

$$ZHD = \frac{0.0022767 \cdot P_0}{1 - 0.00266 \cdot \cos 2\phi - 0.00028 \cdot h} \quad (4)$$

Dimana P_0 adalah tekanan permukaan di stasiun GPS, ϕ adalah lintang geografis stasiun GPS, h adalah tinggi ellipsoid stasiun GPS dalam km. Sedangkan ZNHD diperoleh menggunakan persamaan (5).

$$ZNHD = ZTD - ZHD$$

3 Hasil dan Pembahasan

Hasil dan pembahasan yang dilakukan dalam makalah ini terdiri dari validasi ZTD dengan ZTD IGS, validasi ZNHD GPS dengan ZNHD radiosonde, dan NCEP.

3.1 Validasi ZTD

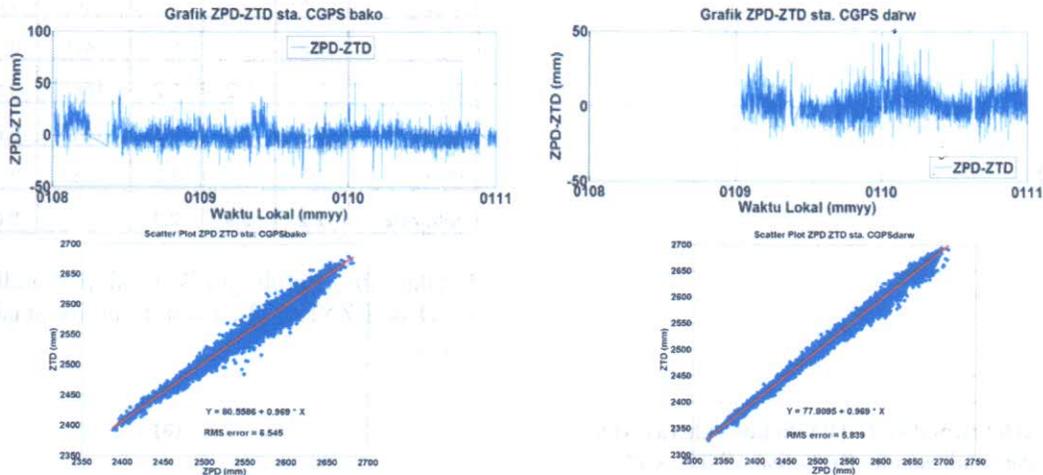
Tujuan validasi nilai ZTD adalah untuk memverifikasi apakah nilai ZTD yang diperoleh dari pengolahan data GPS menggunakan metode yang dijelaskan sebelumnya sudah valid/optimal. Validasi dilakukan dengan membandingkan nilai ZTD stasiun IGS (bako dan darw) dengan nilai ZPD dari hasil pengolahan data IGS. Hasil validasi ZTD untuk kedua stasiun di atas dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 2.

Dari Tabel 1 dan Gambar 2 dapat dilihat bahwa nilai rerata bias antara ZTD dan ZPD adalah -1.05 mm dengan rerata std (standar deviasi) dan rerata rms (*root mean square*) $= \sim 7.48$ mm dan korelasi $= \sim 0.97$. Dengan melihat nilai bias, rms dan korelasi antara ZTD dan ZPD maka dapat disimpulkan bahwa ZTD yang dihasilkan dalam penelitian ini memiliki kesesuaian yang tinggi nilai ZPD dari produk IGS. Selisih nilai ZTD dan ZPD berkisar ± 5 mm (Gambar 2 (a) dan (b)), hal ini bisa terjadi karena adanya beberapa perbedaan dalam metode pengolahan data GPS (Karabatic, 2011). Perbedaan metode itu antara lain: (i) resolusi estimasi nilai ZTD dalam penelitian ini adalah setiap 1 jam sedangkan resolusi ZPD adalah 5 menit, (ii) parameter orbit dalam penelitian ini di *fixed* sedangkan IGS ikut diestimasi.

Berdasarkan hasil di atas maka bisa disimpulkan bahwa teknik/metode penentuan ZTD yang digunakan dalam penelitian ini sudah optimal.

Tabel 1 Statistik Validasi ZTD dan ZTD IGS

Stasiun	Selisih				Regression		
	Bias (mm)	std	rms	Jumlah data	Offset	Koefesien Korelasi	rmse
bako	0.06	7.95	7.95	22461	80.56	0.97	6.55
darw	2.04	7.02	7.02	15198	77.81	0.97	5.84
rerata	1.05	7.48	7.48		79.18	0.97	6.19



Gambar 2 Validasi ZTD dan ZTD (ZPD IGS) : (a) ZPD-ZTD (bako); (b) ZPD-ZTD (darw); (c) scatter ZPD ZTD (bako); (d) scatter ZPD ZTD (darw).

Validasi Nilai ZNHD dengan Data Radiosonde Bakosurtanal

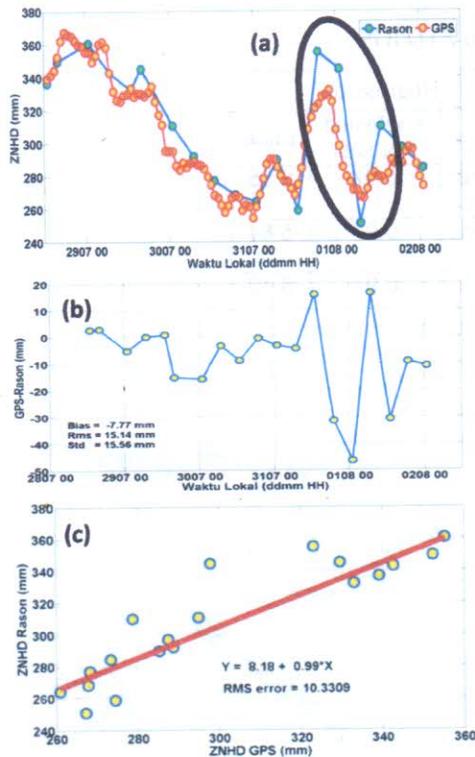
Setelah ZTD sudah divalidasi dengan ZTD dari IGS, selanjutnya adalah dihitung ZHD dengan persamaan (4). Nilai ZNHD menggunakan persamaan (5). ZHD GPS dihitung dengan menggunakan model Saastamoinen (1972), dengan input data meteorologi permukaan. Untuk stasiun GPS yang tidak dilengkapi dengan sensor meteorologi, ZHD dihitung dengan menggunakan input data tekanan dan suhu dari GPT. ZNHD yang digunakan untuk validasi adalah ZNHD GPS stasiun bako dengan ZNHD dari data penalaran radiosonde di Bakosurtanal. ZNHD radiosonde dihitung dengan menggunakan persamaan (6) dengan mengkoreksikan perbedaan tinggi antenna GPS dengan tinggi sensor radiosonde. Hasil validasi ZNHD GPS dengan ZNHD radiosonde dapat dilihat pada Gambar 3.

Dari hasil validasi nilai ZNHD GPS dengan ZNHD Radiosonde, dapat dilihat bahwa ZNHD GPS dan ZNHD radiosonde memiliki pola yang cenderung sama (Gambar 3 (a)). Terdapat perbedaan nilai ZNHD pada lingkaran hitam Gambar 3 (a). Perbedaan nilai ini kemungkinan terjadi karena pergerakan balon radiosonde yang tidak true vertikal, dan sangat tergantung dari angin sehingga menghasilkan nilai

ZNHD yang tidak tepat berada di atas stasiun GPS. Akan tetapi, secara keseluruhan nilai ZNHD GPS sudah sesuai dengan nilai ZNHD radiosonde dengan bias = ~ -7.77 mm, std = ~ 15.56 mm dan rms = ~ 15.14 mm. Korelasi ZNHD GPS dan ZNHD radiosonde sangat tinggi yaitu 0.99.

Dari pola dan korelasi ZNHD GPS dan ZNHD radiosonde maka dapat disimpulkan bahwa penentuan ZNHD dari data GPS akan memberikan hasil yang sama dengan ZNHD dari radiosonde, sehingga nilai ZNHD GPS sudah cukup mewakili ZNHD radiosonde. Resolusi ZNHD GPS sangat bagus untuk mempelajari perubahan cuaca/iklim dibandingkan dengan ZNHD radiosonde.





Gambar 3 ZNHD GPS dan ZNHD Radiosonde (a) Nilai ZNHD GPS dan Radiosonde; (b) Selisih ZNHD GPS – ZNHD Radiosonde; (c) Korelasi ZNHD GPS dan ZNHD Radiosonde.

3.3 Perbandingan ZNHD GPS dengan ZNHD Radiosonde Cengkareng

Hasil perbandingan ZNHD GPS dengan ZNHD radiosonde stasiun Cengkareng dapat dilihat pada Tabel 2. Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa rata-rata bias antara ZNHD GPS dan ZNHD Radiosonde Cengkareng sebesar 2.2 cm dengan standar deviasi dan rms bernilai 2.9. Hal ini terjadi karena dipengaruhi oleh jarak stasiun GPS terhadap stasiun radiosonde Cengkareng, sehingga nilai bias ZNHD cukup besar (fraksi cm) karena ZNHD yang mengandung komponen uap air akan bervariasi secara spasial. Akan tetapi koefisien korelasi keduanya cukup bagus dengan rata-rata 0.81.

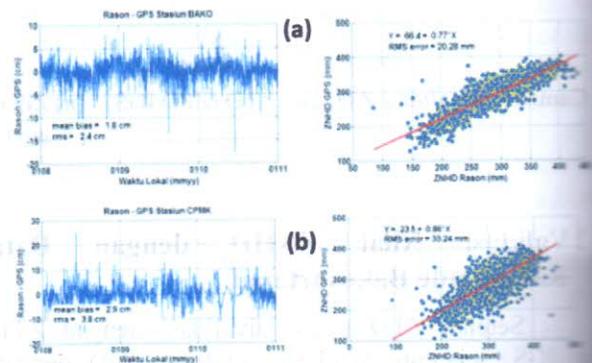
Tabel 2 Statistik ZNHD GPS dengan ZNHD Radiosonde Cengkareng

sta. gps	Bias (cm)	std	rms	#	rho	Jarak (km)
bako	1.8	2.4	2.4	2004	0.77	47.542
cldo	1.9	2.5	2.5	1792	0.79	75.386
cpsr	1.9	2.6	2.6	1750	0.76	91.262
cptn	2.2	2.9	2.9	1553	0.82	97.728
ctvi	2.1	2.8	2.8	1556	0.85	111.951

Tabel 3 (lanjutan) Statistik ZNHD GPS dengan ZNHD Radiosonde Cengkareng.

sta. gps	Bias (cm)	std	rms	#	rho	Jarak (km)
tjls	2.2	2.9	2.9	1741	0.8	115.90
csbk	2.1	2.7	2.7	1368	0.76	129.00
csgt	2.1	2.9	2.9	1191	0.85	129.00
clbg	1.7	2.3	2.3	1809	0.84	132.00
cujg	2.5	3.3	3.3	1461	0.84	143.20
clgi	2.2	2.9	2.9	1435	0.71	153.30
cujk	2.4	3.2	3.2	1785	0.87	173.80
cpmk	2.9	3.8	3.8	1463	0.86	205.95
ctcn	2.5	3.2	3.2	1338	0.76	214.016
rata-rata	2.2	2.9	2.9		0.81	

Berikut ini contoh grafik hasil perbandingan ZNHD GPD dan ZNHD Radiosonde untuk stasiun bako dan cpmk.



Gambar 4 Perbandingan ZNHD GPS dan ZNHD Radiosonde Cengkareng : (a) sta GPS bako; (b) sta. GPS cpmk.

3.4 Perbandingan ZNHD GPS dengan ZNHD NCEP

Hasil perbandingan ZNHD GPS dengan ZNHD NCEP dapat dilihat pada Tabel 4.

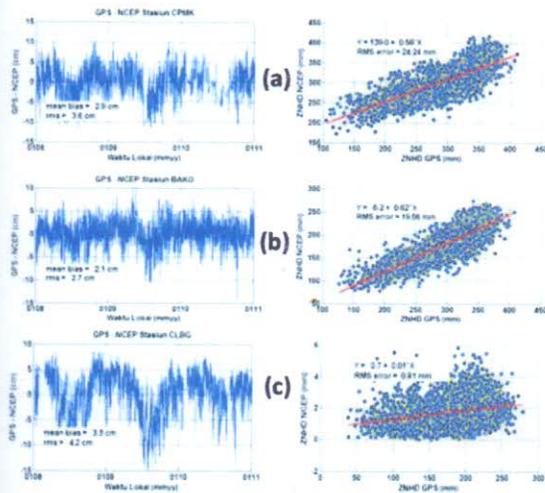
Tabel 4 statistik ZNHD GPS dan ZNHD NCEP

sta. gps	bias (cm)	std	rms	rho	h_ortho (m)
bako	2.1	2.7	2.7	0.62	141.4
cldo	3.3	4.1	4.1	0.08	663.3
cpsr	2.1	2.7	2.7	0.7	17.8
cptn	2.8	3.5	3.5	0.34	348.6
ctvi	3.7	4.5	4.5	0.03	824.6
tjls	2.2	2.9	2.9	0.67	4.8

Tabel 4 (lanjutan) statistik ZNHD GPS dan ZNHD NCEP

sta. gps	bias (cm)	std	rms	rho	h_ortho (m)
csbk	2	2.6	2.6	0.69	58.8
csgt	3.9	4.6	4.6	0.07	680.9
clbg	3.3	4.2	4.2	0.01	1307.9
cujg	2.6	3.3	3.3	0.61	6.4
clgi	2.2	2.8	2.8	0.51	248.8
cujk	2.5	3.2	3.2	0.61	30.9
cpmk	2.9	3.6	3.6	0.56	7.6
ctcn	2.3	3	3	0.65	22
Rata-rata	2.7	3.4	3.4		

Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa rata-rata bias = 2.7 cm dengan standar deviasi dan rms bernilai 2.4 cm. Akan tetapi, koefisien korelasi (rho) untuk beberapa stasiun GPS (cldo, cptn, ctvi, csgt, clbg,) sangat rendah yaitu di bawah 0.5. Hal ini terjadi karena berkaitan dengan tinggi orthometrik stasiun GPS dengan level data dari NCEP. Data kelembaban relatif (RH) yang digunakan hanya sampai level pressure 300 hPa, sehingga untuk level pressure antara 300 – 0 hPa diinterpolasi dengan menggunakan persamaan *hypsonetric*. Meskipun sudah diinterpolasi menggunakan persamaan *hypsonetric*, akan tetapi nilai RH sangat kecil sehingga mengakibatkan nilai *partial water vapor pressure* yang digunakan untuk menghitung ZNHD sangat kecil. Akibat dari hal tersebut adalah nilai ZNHD yang kecil dan tidak menggambarkan keadaan yang sebenarnya. Berikut ini contoh grafik ZNHD GPS dengan ZNHD NCEP untuk stasiun GPS cpmk, bako, dan clbg, yang mewakili posisi stasiun GPS di dekat permukaan laut, pertengahan, dan gunung.



Gambar 5 Perbandingan ZNHD GPS dan ZNHD NCEP : (a) sta GPS cpmk; (b) sta GPS bako; (c) sta GPS clbg.

Dari pembahasan perbandingan ZNHD GPS dan ZNHD NCEP dapat disimpulkan bahwa data NCEP sangat baik untuk menghitung ZNHD di wilayah yang mempunyai topografi dekat pantai atau rendah. Untuk topografi pegunungan penggunaan data NCEP untuk menentukan ZNHD akan memberikan hasil yang tidak bagus.

4 Kesimpulan

Dari pembahasan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa metode pengolahan data GPS yang digunakan sudah memberikan nilai ZTD yang cukup bagus, hal ini ditandai dengan hasil validasi nilai ZTD dengan ZPD (ZTD IGS) yang cukup bagus dengan nilai rata-rata bias = ~ 1.05 mm, rata-rata std dan rms = ~ 7.48 dan korelasi 0.97. Dari sini dapat disimpulkan bahwa metode pengolahan data GPS untuk penentuan ZTD dalam penelitian ini sudah valid [Susilo, 2012].

Pola ZNHD GPS dan ZNHD radiosonde untuk stasiun bako mempunyai kecenderungan yang sama. Hal ini ditandai dengan hasil validasi nilai ZNHD GPS stasiun bako dengan ZNHD radiosonde Bakosurtanal sudah memberikan hasil yang bagus, dengan nilai bias = ~ -7.77 mm, std = ~ 15.56 mm dengan rms = ~ 15.14 dan korelasi = 0.99, sehingga dapat disimpulkan bahwa ZNHD GPS sudah valid setelah divalidasi dengan ZNHD radiosonde.

Perbandingan ZNHD GPS dengan ZNHD Radiosonde Cengkareng memberikan pola yang sama dengan rata-rata bias = ~ 2.2 cm dan rms = ~ 2.9 cm dengan koefisien korelasi 0.81. Jarak stasiun GPS dengan stasiun radiosonde Cengkareng merupakan faktor utama yang mempengaruhi nilai bias dan rms.

Perbandingan ZNHD GPS dengan ZNHD NCEP sangat dipengaruhi oleh kondisi topografi stasiun GPS, terutama tinggi orthometrik stasiun GPS. ZNHD NCEP akan berkorelasi tinggi dengan ZNHD stasiun GPS yang berada di topografi rendah (pantai) sedangkan untuk stasiun GPS di topografi tinggi (pegunungan) korelasinya sangat rendah/jelek.

Dari hasil validasi ZNHD GPS dengan ZNHD radiosonde dan model atmosfer global dapat disimpulkan juga bahwa GPS merupakan suatu metode alternatif untuk keperluan monitoring atmosfer dengan ketelitian yang sebanding dengan metode konvensional (Radiosonde).

5 Ucapan Terima Kasih

Terima kasih penulis sampaikan kepada Dr. Cecep Subarya, MSurv.Sc. yang telah memberikan koordinat stasiun kontinu GPS yang teliti, dan masukan untuk pengolahan data GPS menggunakan GAMIT 10.4. Terima kasih juga penulis sampaikan kepada Bakosurtanal/BIG, dan Kemenristek atas kesempatan untuk melakukan penelitian ini, serta kepada NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, atas penggunaan data model atmosfer global.

6 Daftar Pustaka

- Bar-sever, Y.E., Kroger, P.M., & Boerjesson, J.A., *Estimating Horizontal Gradients of Tropospheric Path Delay with A Single GPS Receiver*, J. Geophys. Res., 103(B3), 5019-5035, 1998.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., Ware, R. H., *GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System*, Journal of Geophysical Research, vol. 97, no. d14, pages 15,787-15,801, 1992.
- Bevis, M., S. Businger, S. Chiswell, T. A. Herring, R. A. Anthes, C. Rocken, & R. H. Ware, *GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water*, J. Appl. Meteor., 33, 379-386, 1994.
- Boehm, J., *Tropospheric Delay Modelling at Radiowavelengths for Space Geodetic Techniques*, Technical Report Heft Nr. 80, 2007, Institute of Geodesy and Geophysics, Vienna University of Technology, 2007.
- Foelsche, U., *Tropospheric Water Vapor Imaging by Combination of Ground-Based and Spaceborne GNSS Sounding Data*, Ph. D thesis, Institute for Meteorology and Geophysics, University Graz, Austria, 1999.
- Gabor, M. *Remote Sensing of Water Vapor From GPS Receivers*, ASE 389P - Remote Sensing from Space, University of Texas at Austin, Spring 1997 mid-term project; website: <http://www.ae.utexas.edu/courses/ase389/midterm/gabor/gabor.html>, 1997.
- Herring, T.A., Davis, J.L., and Shapiro, I., *Geodesy by Radio Interferometry : The Application of Kalman Filtering to The Analysis of Very Long Baseline Interferometry Data*, Geophys. Res. Lett., 95 (B8), 12561-12581, 1990.
- Herring, T.A., *Modeling Atmospheric Delays in The Analysis of Space Geodetic Data*, in Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, Publ. Geod., edited by J.C. De Munk and T. A. Spoelstra, pp. 157-164, Netherlands Geodetic Commission, Delft, 1992.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J., *Global Positioning System: Theory and Practice*, 5th edition. Australia: Springer-Verlag Wien New York, 2001.
- Karabatic, A., *Precise Point Positioning (PPP) – An Alternative Technique for Ground Based GNSS Troposphere Monitoring*, Dissertation, Vienna University of Technology, Faculty of Mathematics and Geoinformation, Vienna Februari, 2011.
- King, R.W., Herring, T.A., McClusky, S.C., *GAMIT Reference Manual*, Release 10.40, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Oktober, 2010.
- MacMillan, D.S., *Atmospheric Gradients from Very Long Baseline Interferometry Observations*, Geophys. Res. Lett., 22(9), 1041-1044, 1995.
- Mockler, S. B., *Water Vapor in the Climate System*, Special Report, <http://www.eso.org/gen-fac/pubs/astclim/espas/pwv/mockler.html#chapman>, 1995.
- Niell, A.E. *Global Mapping Functions for The Atmospheric Delay at Radiowavelengths*, J. Geophys. Res., 101, 3227-3246, 1996.
- Saastamoinen, J., *Atmospheric Correction for The Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites*, in *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, Geophys. Monogr. Ser., vol.15, edited by S.W. Henriksen, A. Mancini, and B.H. Chovitz, pp. 247-251, AGU, Washington D.C., 1972.
- Susilo, *Pemantauan Precipitable Water Vapor (PWV) di Wilayah Jawa Barat Menggunakan GPS Kontinu*, Tesis Magister Teknik Geodesi dan Geomatika, ITB, Bandung, 2012.
- Wijaya, D. D., *Atmospheric Correction Formulae for Space Geodetic Techniques*, PhD thesis, Engineering Geodesy, Graz University of Technology, Shaker-Verlag, 2010.
- Wijaya, D. D., & Fritz K. Brunner, *Atmospheric Range Correction for Two-Frequency SLR Measurements*, Journal of Geodesy, doi 10.1007/s00190-011-0469-8, 2011.