

Temporal Variation Analysis From Troposphere Delay Using GPS (Study: Bandung, Indonesia)

Dhota Pradipta, Wedyanto Kuntjoro, Kosasih Prijatna

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

Abstract. Tropospheric delay is the amount of distortion caused by the deceleration of satellite's signal propagation due to the influence of troposphere. The value of this delay is certain effect of elevation angle that is called the slant delay. In the processing of GPS signals correction, the value of slant delay will be converted using a mapping function to the measured value of the zenith delay which became known as the Zenith Total Delay (ZTD). Zenith value is an accumulated value of the tropospheric delay along the signal's path at the zenith direction.

The value of ZTD can be determined by GPS technique. In Geodesy, ZTD is a nuisance parameter, but for meteorology, it is a parameter of interest, which causes from variability of the atmospheric constituents. The section of ZTD, i.e. Zenith Wet Delay (ZWD), could be derived by subtracting Zenith hydrostatic Delay (ZHD) component from ZTD. By surface temperature readings at the GPS receiver, the retrieved ZWD can then be transformed with additional uncertainty into an estimate of the Precipitable Water Vapor (PWV).

The aim of this research is to study temporal behavior of PWV at ITB campus, as it is revealed from GPS measurements. According to the research that has been conducted, we obtained some results, i.e. The data quality and strategy which were used in processing could affect the result. In particular, we found that, within 20 minutes, maximum and minimum PWV values could reach 85.2 mm and 6.4 mm, respectively. It may indicate that the atmosphere above the studied area varies highly. Temporal condition in observation point that appears in result such as at 12.00 – 18.00 WIB often shows significant irregular anomalies of PWV that influenced local area observation.

Keywords: *GPS, PWV, temporal analysis, ZTD.*

1 Pendahuluan

Efek *delay* gelombang elektromagnetik akibat lapisan troposfer berbeda bila dibandingkan dengan lapisan ionosfer yang memberikan efek *delay* sesuai dengan frekuensi sinyal GPS yang digunakan (diperlambat dan dipercepat) [1]. Lapisan troposfer adalah medium yang non-dispersif untuk gelombang radio pada frekuensi hingga 15 GHz [4]. Pengaruh refraksi troposfer pada modulasi fase dan kode adalah sama. Namun, sebagian dari energi sinyal mengalami refraksi oleh gas-gas yang tidak terionisasi seperti nitrogen, oksigen, argon, karbondioksida dan molekul air, akibatnya menimbulkan *delay* sekitar 2.1 – 2.3 m pada arah zenith [1]. Besarnya penyimpangan jarak ini disebabkan oleh perlambatan waktu tempuh akibat pengaruh troposfer di arah zenith (vertikal) yang disebut dengan *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD).

ZTD dapat dipengaruhi oleh lama pengamatan yang dapat mengakibatkan variasi nilai *delay* [3]. Nilai ZTD juga dipengaruhi oleh variasi temperatur, tekanan, kelembaban, dan berdasarkan lokasi spasial titik pengamatan [7]. Pada dasarnya, nilai ZTD dapat ditentukan menggunakan teknik GPS dengan strategi pengukuran statik diferensial. Berkaitan dengan hal tersebut, minimal diperlukan 2 titik yang secara simultan mengamati konstelasi satelit GPS dan diketahui koordinatnya secara akurat (akurasi mm). Melalui strategi tersebut, maka dapat diestimasi nilai ZTD secara relatif yang merupakan nilai ZTD di titik pengamatan relatif terhadap titik kontrol.

Dalam paper ini dilakukan penentuan nilai ukuran ZTD, kajian pemodelan ZTD, dan karakteristik temporal troposfer dalam skala lokal di lokasi pengamatan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui kualitas hasil turunan data GPS, dalam hal ini PWV, dengan kondisi meteorologis di lapangan. Studi kasus menggunakan data CGPS-ITB (*Continous* GPS-ITB, Bandung) dan Bakosurtanal (Cibinong, Bogor) secara kontinyu untuk pengamatan *delay* troposfer. Hasil penelitian diharapkan dapat mengetahui variasi temporal saat pengamatan (hasil GPS) yang dihasilkan dengan kondisi faktual di lapangan serta seberapa baik kualitas ZTD yang dihasilkan. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi sumber pengetahuan tentang penentuan ZTD menggunakan teknik GPS serta pengetahuan tentang karakteristik troposfer termasuk fenomena periodik yang terjadi di titik pengamatan. Berdasarkan uraian di atas, penelitian yang akan dilakukan berusaha memecahkan masalah seperti:

Kualitas hasil penentuan ZTD untuk analisis temporal;

Hipotesis: Delay troposfer pada sinyal GPS dapat digunakan untuk analisis meteorologis secara temporal (periodik);

Metodologi:

- a. Studi Literatur,
- b. Data Observasi (akuisisi data) meliputi inventarisasi data dan melengkapi informasi yang sudah ada dengan :
 - 1) Data GPS (tahun 2008 -2009) CGPS – ITB dan Bakosurtanal, lalu
 - 2) Informasi data IGS (2008 – 2009) dan data penunjang lainnya,
 - 3) Pengolahan data, dan
 - 4) Data pengukuran Suhu, tekanan di area pengamatan.

Perangkat lunak pengolahan data yang dipakai adalah Bernese 5.0 yaitu perangkat lunak ilmiah untuk pengolahan data GPS. Bernese digunakan untuk menentukan nilai delay troposfer dari data GPS. Nilai delay troposfer dalam arah zenith hasil proses Bernese disebut ZTD (*Zenith Tropospheric Delay*). Nilai ZTD ini adalah nilai koreksi posisi (untuk penentuan posisi tinggi), oleh sebab itu, koordinat titik yang diamati harus diketahui. Perangkat lunak ini mampu menggunakan sumber informasi orbit yang berbeda (*navigation, ultra rapid, dan final information*) serta variasi lama waktu pengamatan akan berdampak pada variasi nilai ZTD pada saat pengamatan. Nilai ZTD ini dibentuk dari nilai ZHD (*Zenith Hydrostatic Delay*) dan ZWD (*Zenith Wet delay*). Kedua jenis nilai ini (ZHD dan ZWD) dapat dipergunakan untuk mendapatkan analisis temporal saat pengamatan. Pengolahan data GPS dimulai dari input data, proses pengolahan data, nilai ZTD, verifikasi hasil pengolahan data, hingga analisis variasi temporal hasil pengolahan data yang dijelaskan pada Diagram 1, sebagai berikut:

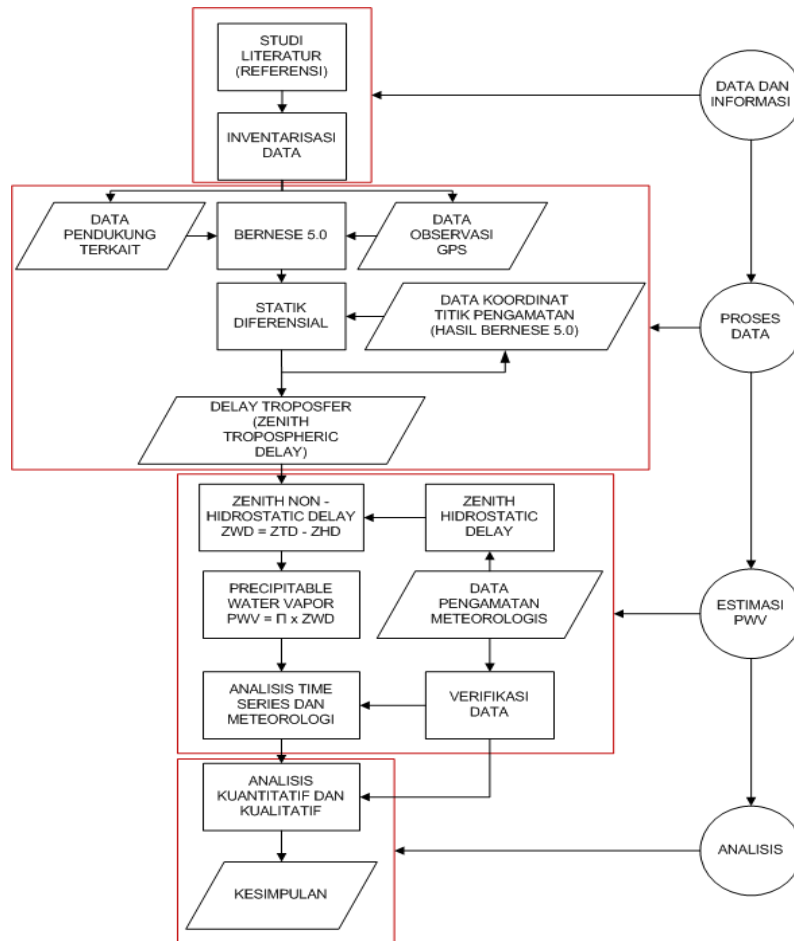


Diagram 1 Metodologi Pengolahan Data.

2 Delay Troposfer

Pada frekuensi sinyal GPS (hingga 15 GHz), *magnitude* dari bias troposfer tidak tergantung pada frekuensi sinyal, oleh sebab itu besarnya tidak dapat diestimasi menggunakan pengamatan pada 2 frekuensi (L1 dan L2), perlu diketahui bahwa *pseudorange* dan fase keduanya diperlambat oleh lapisan troposfer dan besarnya *magnitude* bias troposfer pada 2 data pengamatan tersebut dapat dikatakan sama. *Magnitude* bias troposfer berkisar sekitar ≈ 2.3 m di arah zenith sampai ≈ 20 m pada 10° diatas horizon [1].

Bias troposfer biasanya dipisah menjadi komponen kering (*dry component* $\approx 90\%$ dari bias total) dan komponen basah (*wet component* $\approx 10\%$ dari bias

total). Dengan menggunakan model troposfer (model Hopfield, Saastamoinen, dll) serta data ukuran meteorologi (temperatur, kelembaban, dan tekanan) di permukaan bumi, *magnitude* komponen kering dari bias troposfer biasanya dapat diestimasi sampai ketelitian $\approx 1\%$, sedangkan *magnitude* komponen basah yang tergantung pada kandungan uap air sepanjang lintasan sinyal, biasanya lebih sulit diestimasi secara teliti dari data pengamatan meteorologi di permukaan bumi. *Magnitude* komponen basah hanya bisa diprediksi dengan ketelitian $\approx 3-4$ cm akibat pengaruh uap air yang berubah secara spasial dan temporal [7].

3 Akuisisi dan Pengolahan Data

Metode Akuisisi Data dan strategi pengolahan data

- Pengolahan data menggunakan data GPS di Bakosurtanal (Cibinong, Bogor) dan CGPS-ITB (Bandung) selama 2 tahun pengamatan (1 Januari 2008 – 31 Desember 2009) dengan epok pengamatan 30 detik. Metode statik diferensial digunakan berdasarkan pertimbangan ketelitian yang dianggap memenuhi toleransi yang diberikan di penelitian.
- Proses pengolahan data untuk mendapatkan nilai ZTD menggunakan Bernese 5.0, Informasi orbit yang digunakan menggunakan data final ephemeris.
- Proses visualisasi hasil dan analisis menggunakan bantuan software Surfer (untuk mapping PWV) dan Matlab (untuk analisis time series dan validasi data).

3.1 Penentuan Komponen ZTD

Pada arah zenith, bias troposfer yang dipengaruhi perambatan (delay) sinyal GPS dikenal sebagai ZTD. Sedangkan bias yang dihasilkan dari komponen kering dan basah pada arah zenith dikenal dengan *Zenith Hydrostatic Delay* (ZHD) dan *Zenith Wet Delay* (ZWD).

Harga ZTD sebenarnya merupakan faktor koreksi untuk menentukan jarak satelit GPS ke antena receiver GPS. Persamaan dasar data fase untuk menghitung jarak satelit GPS ke antena receiver adalah sebagai berikut [9]:

$$L_{kl}^{ij} = \rho_{kl}^{ij} + STD_{kl}^{ij} + N_{kl}^{ij} \quad (1)$$

$$STD_{kl}^{ij} = [ZTD_k MF(e_k^i) - ZTD_l MF(e_l^i)] - [ZTD_k MF(e_k^j) - ZTD_l MF(e_l^j)] \quad (2)$$

Dimana L adalah jarak satelit GPS ke antena receiver GPS yang dianggap benar, ρ merupakan jarak satelit GPS ke antena receiver GPS yang terukur, N merupakan bias ambiguitas dan *error* lainnya, $MF(e_k^i)$ adalah *mapping function* STD dari receiver k menuju satelit l dengan sudut elevasi e , dan ZTD merupakan delay troposfer.

$$ZTD = dh_{trop} - dh_{non-trop} \quad (3)$$

Dengan mengestimasi besar nilai ZTD dan menghitung besarnya pada permukaan, maka nilai ZWD dapat diperoleh dengan cara mengurangi ZTD dengan ZHD (ZHD dihasilkan dari model dan data pengamatan meteorologis), dengan asumsi efek troposfer pada komponen horizontal bisa diabaikan.

$$ZWD_{GPS} = ZTD - ZHD_{Model} \quad (4)$$

Penentuan komponen kering atau ZHD dapat dilakukan dengan menggunakan pemodelan hidrostatik yang berkorelasi terbalik dengan faktor ketinggian titik atau tempat saat pengamatan. Pemodelan dari delay yang dihasilkan dilakukan dengan asumsi bahwa atmosfer berada pada kesetimbangan hidrostatik (*Hydrostatic Equilibrium*). Model *Zenith Hydrostatic Delay* Saastamoinen merupakan model yang sering digunakan. Model saastamoinen diekspresikan melalui persamaan [7]:

$$ZHD_{Model} = \frac{(2.2779 + 0.0024 (mm)).Ps}{1 - 0.00266 \cdot \cos 2\varphi - 0.00028 \left[\frac{1}{km} \right] \cdot h} \quad (5)$$

Dimana P_s adalah tekanan total pada permukaan (hektopascal = milibar), φ merupakan posisi lintang receiver GPS, dan h adalah tinggi orthometrik dalam satuan km. Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa penentuan ZHD akan sangat tergantung pada tekanan permukaan, komponen lintang, dan tinggi suatu posisi.

3.2 Model Wet Delay (ZWD)

Model wet delay memiliki ketelitian lebih buruk daripada model hidrostatik, hal ini dikarenakan uap air tidak berkorelasi dengan pengukuran meteorologi di permukaan dan memiliki variasi spasial dan temporal yang tinggi, akibatnya, untuk menentukan model yang akurat cukup sulit dan umumnya model wet delay memiliki akurasi 2-4 cm [7].

Wet delay dalam pengukuran adalah model Hopfield (digunakan sebagai model pembandingan dengan hasil pengolahan GPS) yang dapat dijelaskan sebagai berikut,

$$d_{ws} = 10^{-6} N_{ws} \frac{H_w^e}{5} \quad (6)$$

Dimana,

$$\begin{aligned} d_{ws} &= \text{wet delay} \\ H_w^e &= \text{tekanan parsial uap air di permukaan titik pengamatan dalam mb.} \\ N_{ws} &= 3.73 \times 10^5 \frac{e_s}{T_s^2} \end{aligned} \quad (7)$$

Nilai N_{ws} merupakan refraktivitas komponen basah di permukaan titik pengamatan (Smith and Weintraub, 1953 dalam [7]).

Dari nilai ZWD, nilai PWV dapat ditentukan untuk mendapatkan pengamatan kondisi temporal. Untuk mendapatkan nilai *precipitable water vapour*, digunakan faktor konversi Π dengan nilai 0.15 (menganggap faktor pembelokan tidak ada). PWV memiliki artian secara meteorologis yang merepresentasikan berapa banyak air yang ada jika uap air di arah zenith dikembalikan ke bentuk *liquid*.

3.3 Kandungan uap air dalam troposfer

Untuk mengkuatifikasi jumlah kandungan uap air, digunakan nilai PWV (*Precipitable Water Vapour*) yaitu jumlah uap air di arah zenith receiver bila berbentuk cairan [7]. Nilai PWV didapatkan dari persamaan 7 pada [9] sebagai berikut,

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad (8)$$

Dimana,

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho R_v \left[\left(\frac{k_3}{T_m} \right) + k_2 \right]} \quad (9)$$

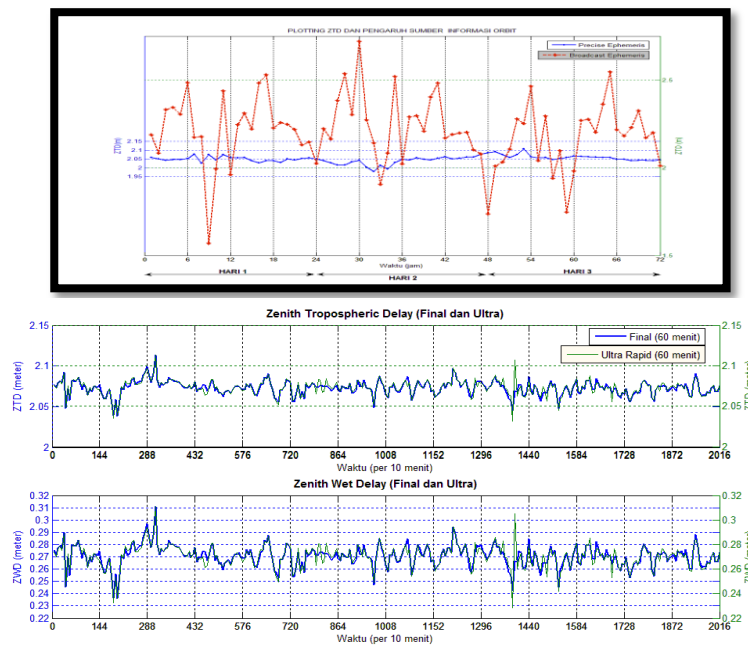
([6]; [8]), dengan ρ adalah densitas air dalam bentuk cair, R_v adalah konstanta gas untuk uap air, dan k_2 dan k_3 merupakan konstanta fisik yang menunjukkan polarisasi molekul-molekul atmosfer akibat induksi gelombang elektromagnetik (Smith dan Weintraub, 1953; [8]), sedangkan T_m merupakan temperatur rata-rata atmosfer yang didapatkan dari,

$$T_m = 70.2 + 0.72 \times T_s \quad (10)$$

T_s merupakan temperatur permukaan di titik pengamatan ([2]; [8]). Nilai Π (dipengaruhi massa jenis air, bobot temperatur rata-rata atmosfer, dll) adalah konstanta tanpa dimensi yang memiliki nilai 0.15 (asumsi global).

4 Analisis

4.1 Pengaruh Kualitas Orbit

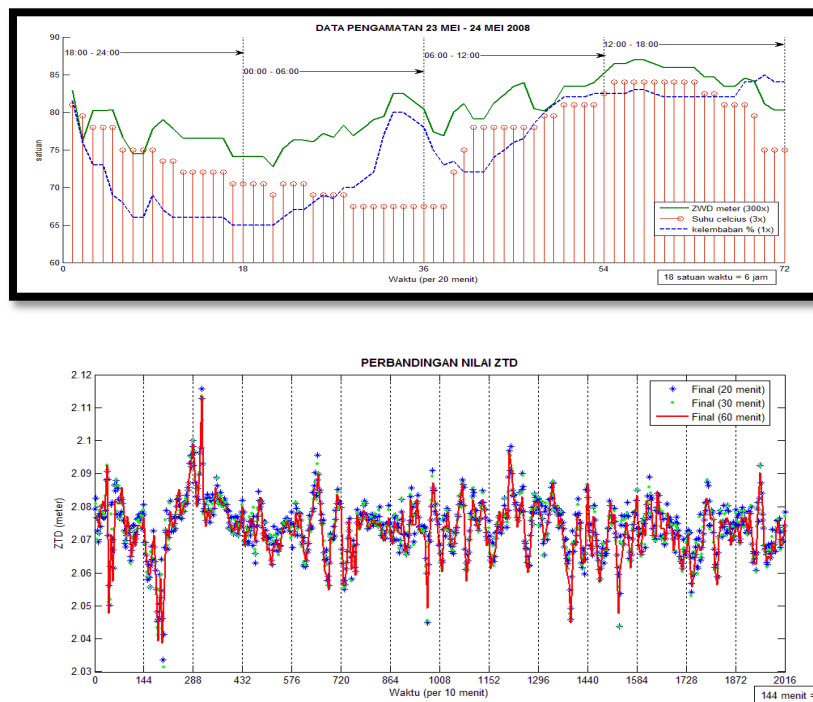


Gambar 1 Pengaruh Informasi orbit untuk penentuan ZTD di stasiun CGPS-ITB.

Informasi orbit dapat mempengaruhi kualitas hasil ZTD sehingga mempengaruhi analisis hasil yang dilakukan. Sebagai contoh dapat dilihat pada **gambar 1** hasil ZTD dengan informasi orbit yang berbeda. Permasalahan yang muncul adalah perbedaan nilai ZTD yang signifikan (± 50 cm) yang menunjukkan adanya perbedaan kualitas informasi orbit.

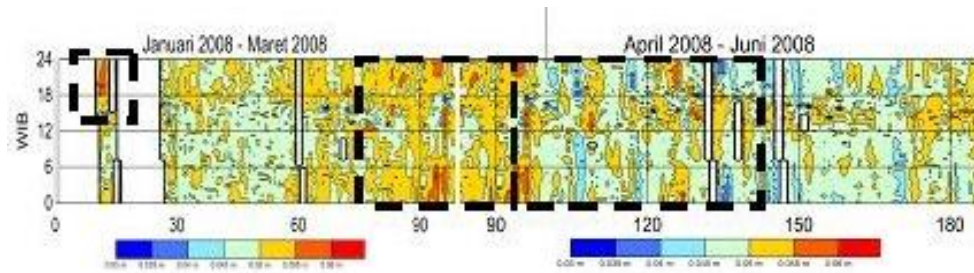
4.2 Karakteristik PWV

Perubahan suhu dan kelembaban tiap 20 menit dapat memberikan pengaruh pada perhitungan komponen ZWD. Berdasarkan hasil sampel pengamatan langsung di titik CGPS-ITB, keadaan meteorologis cenderung memiliki pola yang dapat terlihat pada **gambar 2** berikut ini,

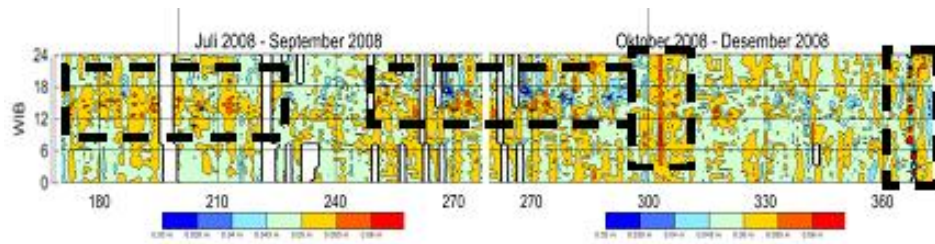


Gambar 2 Suhu, tekanan, dan nilai ZWD serta variasi pengamatan di stasiun CGPS-ITB.

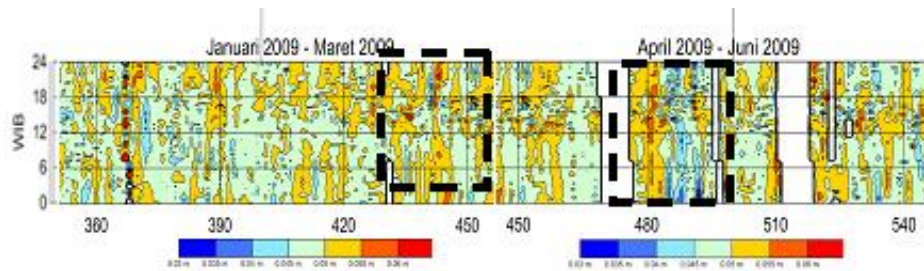
Pada **Gambar2** dapat diketahui, nilai suhu dan kelembaban cenderung memiliki pola sama tetapi berubah saat hujan terjadi (sore hari, 14.00 – 18.00 WIB). Perubahan terjadi bila ada proses yang terjadi di atmosfer seperti fenomena hujan yaitu suhu turun dan kelembaban naik ataupun perubahan malam ke pagi dimana kelembaban tinggi sedangkan suhu rendah dan sebaliknya. Pengamatan langsung inilah yang melatarbelakangi penentuan nilai ZTD tiap 20 menit yang menunjukkan bahwa kondisi meteorologis berubah setiap 20 menit, berdasarkan referensi ([2]; [5]). Pengolahan data menghasilkan nilai PWV minimum sebesar 6.4 mm dan maksimum 85.2 mm dengan nilai rata-rata PWV selama 2 tahun adalah 49.1 mm. Nilai PWV ini kemudian diolah sedemikian rupa dalam bentuk *mapping* waktu terhadap hari seperti pada **gambar 3 (a) hingga 3(d)** sebagai berikut,



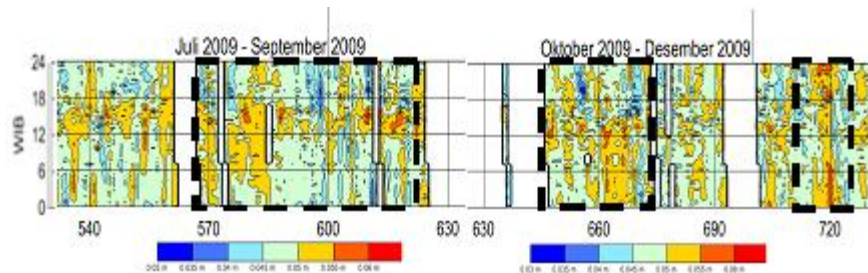
Gambar 3(a) Variasi temporal bulan Januari – Juni 2008



Gambar 3(b) Variasi temporal bulan Juli – Desember 2008



Gambar 3(c) Variasi temporal bulan Januari – Juni 2009



Gambar 3(d) Variasi temporal bulan Juli – Desember 2009

Umumnya peningkatan jumlah uap air adalah saat tengah hari dimana suhu naik yang mengakibatkan penguapan meningkat sehingga jumlah uap air di atmosfer

bertambah. Hal ini dapat diketahui pada gambar 3(a) hingga 3(d) yang menunjukkan setiap hari pengamatan dalam keadaan basah (PWV tinggi) pada tengah hari (12.00 – 18.00 WIB) dalam kondisi normal. Adanya anomali yang berbeda (digambarkan dengan perubahan gradasi warna) menunjukkan adanya perubahan kondisi meteorologis (fenomena) di titik pengamatan yang terjadi secara temporal.

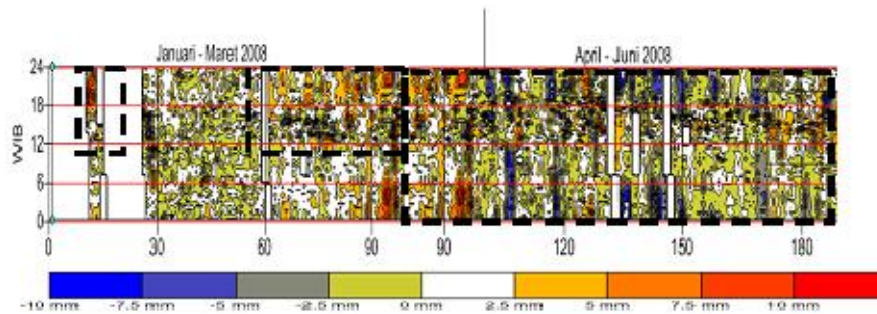
Pada bulan Februari menunjukkan keadaan yang kering dimana nilai PWV cukup rendah dibawah rata-rata. Pada Maret 2008 keadaan terbalik terjadi dimana bulan ini cenderung basah (selama 1 bulan lebih) yang berlanjut hingga pertengahan bulan April 2008 dengan nilai berkisar 60 – 65 mm. Nilai PWV kembali normal pada bulan April 2008 dengan variasi nilai perubahan PWV yang naik turun dengan normal. Hal berbeda terjadi di bulan Mei 2008 dimana nilai PWV berkisar 30 – 40 mm (lebih rendah) yang terjadi selama beberapa hari.

Adanya pola nilai PWV tinggi yang teratur pada tengah hari dimana sepanjang semester kedua 2008 sekitar 60 mm yang menunjukkan adanya pola musim yang ikut mempengaruhi terjadinya perubahan nilai PWV. Pada semester ini plot masih menunjukkan adanya anomali terutama pada bulan Oktober 2008, walaupun nilai PWV masih tetap mengikuti pola yang terjadi sepanjang semester akhir 2008 tetapi masih munculnya nilai PWV sekitar 30 mm (terjadi dalam beberapa hari pada bulan Oktober 2008) yang tidak terjadi pada bulan sebelumnya (September 2008) dan nilai PWV meningkat secara stabil selama awal bulan November 2008 dan kemudian kembali ke kondisi normal, sedangkan anomali terjadi pada akhir tahun 2008 yang terlihat cukup signifikan dan tidak teratur dimana nilai berubah naik dan turun dengan drastis sepanjang hari (24 jam) dari nilai maksimum hingga minimum (selisih dalam satu hari lebih kurang 50 mm).

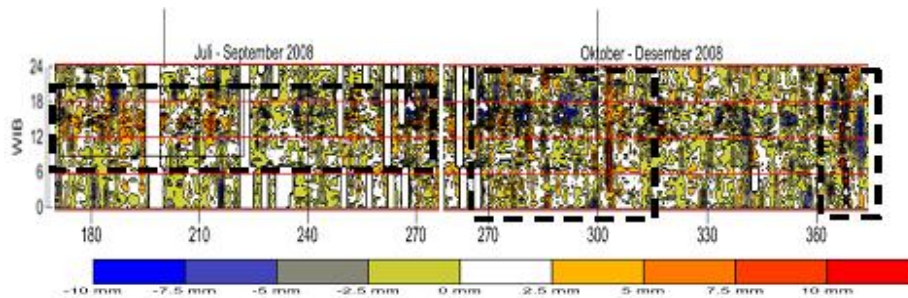
Pada **gambar 3(c)** pola menunjukkan terjadinya bulan yang cenderung kering (PWV rendah) dengan PWV tinggi yang hanya terjadi pada akhir bulan Maret 2009 dimana kemungkinan pada semester pertama 2009 terjadi musim kemarau dan perubahan nilai PWV yang tidak teratur (dalam bulanan) pada semester pertama 2008 tidak muncul pada semester pertama 2009 sehingga menunjukkan bahwa pola yang terjadi pada 2008 tidak terjadi pada 2009 di waktu yang sama. Beberapa keadaan yang berbeda muncul pada awal hingga pertengahan bulan Mei 2009 dimana nilai PWV naik selama beberapa hari (50–60 mm) dan kemudian turun (30-40 mm) selama beberapa hari dan kemudian kembali normal.

Pada **gambar 3(d)** menunjukkan adanya perubahan pola dimana terjadi perubahan pola secara tidak teratur yang ditunjukkan perubahan nilai PWV

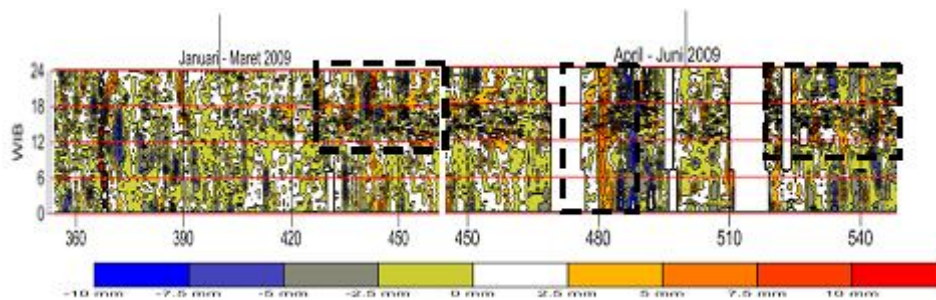
yang tinggi kemudian turun dan tinggi kembali (dalam bulanan) yang terjadi pada bulan Juli – September 2009 sehingga pola yang terjadi di awal 2008 bergeser ke semester 2 tahun 2009 dimana nilai PWV berkisar 40 – 60 mm. Perubahan nilai PWV ditunjukkan pada pertengahan bulan Desember 2009 yang ditandai dengan ketidakaturan perubahan nilai PWV pada bulan sebelumnya yang kemudian menjadi tinggi selama beberapa hari (50-55 mm) dan kemudian kembali normal. Untuk analisis lebih lengkap dapat dilihat pada gambar 4 yang dihasilkan dengan menggunakan nilai rata-rata PWV selama 2 tahun (49.1 mm),



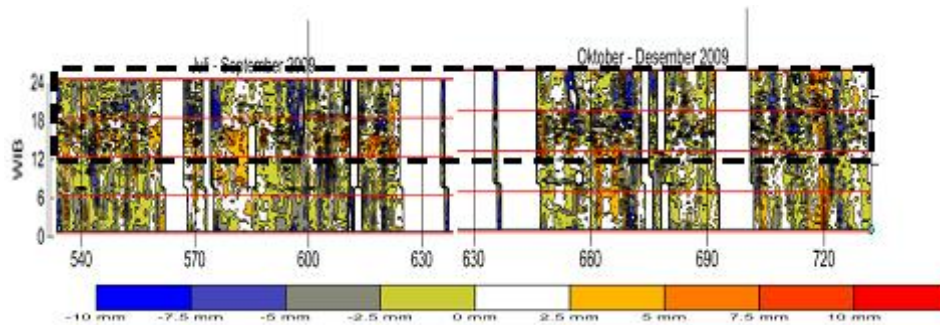
Gambar 4(a) Nilai PWV bulan Januari – Juni 2008



Gambar 4(b) Nilai PWV bulan Juli – Desember 2008



Gambar 4(c) Nilai PWV bulan Januari – Juni 2009



Gambar 4(d) Nilai PWV bulan Juli – Desember 2009

Pada **gambar 4(a)** dapat diketahui adanya perubahan nilai PWV yang cukup tegas pada pertengahan Januari 2008 dan bulan Maret 2008 (nilai PWV yang tinggi) pada akhir bulan dan nilai PWV yang cenderung rendah selama sebulan penuh pada Februari 2008 (nilai PWV rendah) yang sulit teramati bila melihat **gambar 3(a)**. Mengacu pada nilai rata-rata PWV, perubahan nilai PWV tidak teratur terjadi pada hari ke 90 hingga 170 (bulan April-Juni 2008) yang disebabkan adanya fenomena yang memiliki karakteristik perubahan cuaca yang tidak teratur dengan nilai PWV berubah tidak teratur dari -10 mm hingga 10 mm (perubahan harian 20 mm) yang dimulai nilai PWV tinggi kemudian cenderung rendah pada hari-hari berikutnya.

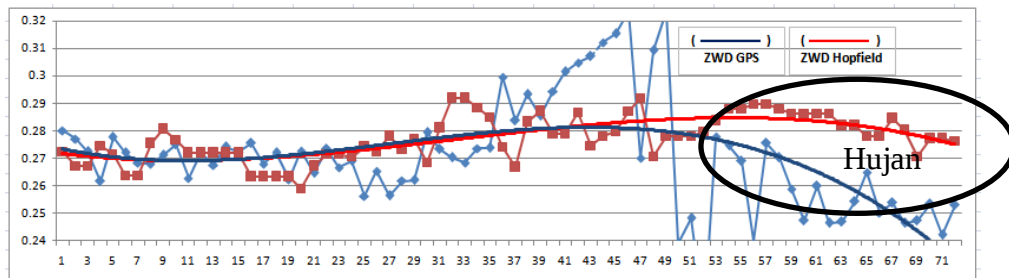
Pada **gambar 4(b)** dapat diketahui adanya kecenderungan nilai PWV yang tinggi antara pukul 12.00 WIB hingga 18.00 WIB yang menunjukkan adanya penguapan (keadaan normal) tetapi pada **gambar 4(d)**, di bulan September 2008, nilai PWV yang umumnya tinggi pada tengah siang menjadi rendah (penguapan kecil) selama 1 bulan penuh dan menjadi naik selama beberapa hari di awal bulan Oktober 2008 sebelum kembali ke keadaan normal. Anomali yang terjadi di akhir tahun mempunyai nilai PWV naik dan turun cukup signifikan hingga 20 mm dari nilai rata-rata (selisih maksimum dan minimum hingga 50 mm).

Pada **gambar 4(c)** pola yang terjadi cenderung kering (PWV rendah) dengan nilai perubahan PWV yang tidak teratur yang terjadi pada bulan Maret 2009 pada tengah hari hingga malam hari yang menunjukkan pola akibat perubahan musim yang terjadi di tahun 2009 (hal ini tidak dapat teramati bila hanya menggunakan data awal). Di bulan Mei 2009 dapat diketahui dengan jelas naik turunnya PWV yang terjadi secara berurutan (beberapa hari naik kemudian beberapa hari turun dan kemudian normal kembali) dengan selisih perubahan kurang lebih 20 mm.

Gambar 4(d) menunjukkan perubahan nilai PWV yang tidak teratur pada malam hingga dini hari dan kecenderungan nilai PWV rendah hingga 7.5 mm pada bulan Agustus - September 2009. Adanya perubahan nilai PWV dengan nilai selisih PWV hingga 10 mm yang terjadi selama Oktober - Desember 2009 di waktu siang hari hingga malam hari dimana pola umum seharusnya adalah waktu yang memiliki penguapan cukup tinggi seperti ditunjukkan oleh gambar-gambar sebelumnya.

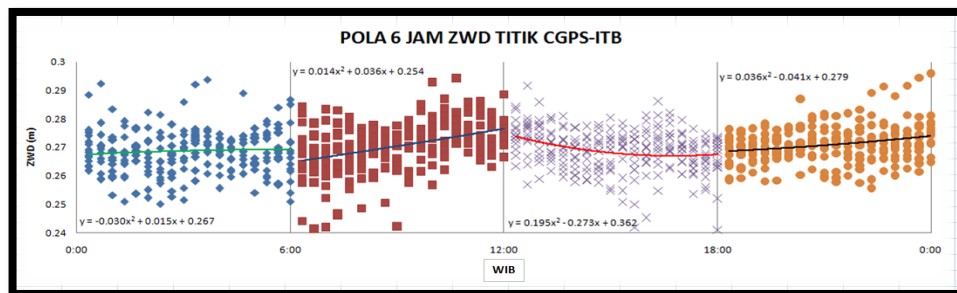
4.3 Perbandingan dengan model ZWD

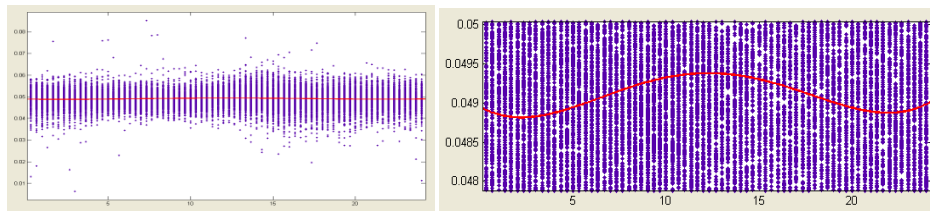
Proses *fitting* model menggunakan persamaan interpolasi 3 derajat untuk melihat pola secara sederhana antara data GPS dan data meteorologi seperti pada **Gambar 5** sebagai berikut,



Gambar 5 Fitting model menggunakan Interpolasi 3 derajat (GPS dan Hopfield)

Kualitas hasil ZWD pengolahan data menunjukkan pola yang sama dengan nilai ZWD lebih tersebar dan nilai dari pengamatan menggunakan model Hopfield lebih smooth dan pola yang didapatkan berubah saat fenomena di atmosfer terjadi (hujan). Hasil pengolahan data sampel juga menunjukkan adanya pola 6 jam yang terjadi tiap hari yang berarti adanya pola semidiurnal dan diurnal, seperti pada **Gambar 6**,





Gambar 6 Pola 6 jam ZWD di titik CGPS – ITB

Pada **Gambar 6** dapat diketahui bahwa nilai PWV akan meningkat dari pagi hingga tengah hari dan menunjukkan pola turun saat sore hari serta meningkat kembali pada malam hari, sehingga dapat dikatakan atmosfer memiliki pola secara temporal harian, sedangkan pola pada **Gambar 6** memiliki pola cenderung sama dengan pola PWV harian (24 jam data selama 2 tahun pengamatan) dengan menggunakan polinomial orde 3 yang menunjukkan kecenderungan yang sama dengan pola pada **Gambar 5**.

5 Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan data serta analisis, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Kualitas data dan strategi mempengaruhi hasil pengolahan data. Data yang baik dan strategi yang tepat membantu analisis. Penggunaan bantuan perangkat lunak yang tepat juga dapat meminimalisir kesalahan tersebut tetapi tidak berarti nilai ZTD menjadi lebih baik akibat kurangnya data pengamatan yang hilang dalam proses “*cleaning*” data. Penggunaan data *final ephemeris* dan strategi di statik diferensial dianjurkan untuk digunakan. Sedangkan peningkatan interval lama waktu pengamatan memberikan variasi penentuan nilai ZTD yang cenderung sama pada penentuan ZTD menggunakan final ephemeris. Penentuan ZTD setiap 20 menit menunjukkan adanya perubahan kondisi atmosfer tiap 20 menit sesuai dengan pengamatan meteorologis secara langsung.
- Pengamatan menggunakan data selama 2 tahun menunjukkan nilai PWV maksimum adalah 85.2 mm, minimum 6.4 mm, dan nilai rata-rata PWV (2 tahun adalah 49.1 mm).
- Penguapan tertinggi yang terjadi selama 2 tahun umumnya terjadi pada waktu 12.00 - 18.00 WIB yang menunjukkan kondisi normal atmosfer. Beberapa anomali perubahan muncul yang ditandai perubahan nilai PWV secara signifikan dan tidak teratur.

- Mapping PWV secara temporal dapat membantu untuk mengetahui kondisi basah dan kondisi kering yang terjadi selama 2 tahun pengamatan dan anomali yang terjadi. Umumnya pukul 12 – 18 siang nilai PWV akan naik yang menunjukkan adanya penguapan yang cukup tinggi pada waktu tersebut.
- Terjadi pola perubahan tidak teratur yang berkisar 20 mm (terhadap rata-rata) dan 50 mm (data awal) yang terjadi pada bulan Maret – Mei baik tahun 2008 dan 2009, sedangkan anomali yang terjadi pada akhir tahun 2008 belum diketahui secara pasti penyebabnya.

5.2 Saran

Berdasarkan analisis serta hasil pengolahan data, maka untuk pengamatan delay troposfer di masa akan datang diperlukan beberapa langkah sebagai berikut :

- Pemilihan strategi pengamatan dan strategi pengolahan data hendaknya disesuaikan dengan kondisi titik pengamatan untuk mendapatkan hasil penentuan ZTD yang optimal disertai data pengamatan langsung kondisi meteorologis untuk verifikasi data.
- Diperlukan pengamatan secara spasial (selain temporal) dapat membantu dalam proses mendapatkan model yang mewakili keadaan saat pengamatan. Hal ini berdasarkan pada perubahan yang terjadi pada atmosfer khususnya troposfer yang menunjukkan perubahan kondisi meteorologis secara spasial dan temporal.
- Diperlukan pengamatan lebih lanjut (secara kontinyu dan berkesinambungan) untuk mendapatkan pola periodik yang lebih akurat sehingga dapat dikembangkan model koreksi lokal untuk peningkatan kualitas ukuran GPS mengingat keterbatasan akurasi model global yang digunakan.

6 Daftar Pustaka

- [1] Abidin, H. Z., *Penentuan Posisi dan Aplikasinya*, P.T. Pradnya Paramita, 2006.
- [2] 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.
- [3] Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., Meindl, M., Beutler, G., Bock, H., Gade, A., Jaggi, A., Mervart, L., Prange, L., Schaer, L., Springer, T., Urschl, C., Walser, P., *Bernese GPS Software Version 5.0.*, Astronomical Institute, University of Bern., 2007.

- [4] Hoffman-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J., *GPS Theory and Practice Second Edition*, Springer-Verlag Wien, 1992.
- [5] Kruczyk, M., Liwosz, T., Rogowski, B., *Some Remarks on GPS Tropospheric Delay Products and Their Usefulness*, Research Communications, 2004.
- [6] Mendes, V. B., Langley R. B., *Revised Refractive Index Formulae and Their Effect in Zenith Delay Prediction and Estimation*, Position Location and Navigation Symposium 2002, Palm Springs, 2002.
- [7] Shrestha, S.M., *Investigation Into the Estimation of Tropospheric Delay and Wet Refractivity Using GPS Measurements*, M.Sc.E. thesis, Department of Geomatics Engineering, University Calgary, Alberta, 2003.
- [8] Tregoning, P., Boers, R., O'Brien, D., Hendy, M., *Accuracy of Absolute Precipitable Water Vapor Estimates from GPS Observations*, Journal of Geophysical Research, Vol. 103 No. D22:28.701 – 28.710, 1998.
- [9] Wedyanto, K., Permana, D. S., Setyadji, B., Dudy, D., Andreas, H., Abidin, H. Z., Dupe, Z. L., *Pemanfaatan Koreksi Bias Troposfer Untuk Pemantauan dan Pemetaan Wet Delay Dengan Teknik GPS di kota Bandung*, Research Communications, ITB – Bandung, 2004.

Acknowledgement

Terima kasih kepada BAKOSURTANAL yang telah mengizinkan penggunaan data CGPS untuk penelitian ini.