

Penentuan TEC Dengan Menggunakan Data Kode Dan Data Fase Dari Satelit GPS

Sarmoko Saroso*)

ABSTRACT

GPS (Global Positioning System) is a highly accurate global navigation service available for all-weather precision navigation by land, sea and air to anyone to use. Recently GPS is valuable tool for many purposes such as for TEC (Total Electron Content) measurements. Since the GPS Satellites broadcast signals in two frequencies, TEC determination is possible analyzing the different path delays undergone by the signals in both frequencies. This paper will present an algorithm for TEC determination using dual frequencies GPS pseudorange and carrier phase.

RINGKASAN

GPS (*Global Positioning System*) merupakan suatu sistem navigasi untuk penentuan posisi secara akurat yang memiliki keunggulan dapat diamati oleh banyak orang di setiap saat dan di segala kondisi cuaca. Saat ini GPS telah digunakan untuk berbagai aplikasi diantaranya untuk mengamati salah satu parameter dari lapisan ionosfer, yaitu TEC (*Total Electron Content*). Penentuan nilai TEC dengan GPS pada dasarnya dilakukan dengan menggunakan ukuran jarak pada dua frekuensi yang berbeda. Karena besarnya jarak bias ionosfer tergantung pada frekuensi, maka dengan menggunakan formulasi matematik tertentu nilai TEC dapat ditentukan. Pada paper ini akan dibahas mengenai metode penentuan TEC dengan menggunakan data kode dan data fase serta analisis data dari hasil yang diperoleh dari pengamatan satelit GPS.

1. PENDAHULUAN

GPS (*Global Positioning System*) adalah sistem radio navigasi dan penentuan posisi menggunakan satelit yang dimiliki dan dikelola oleh Amerika Serikat. Sistem ini didesain untuk memberikan posisi dan kecepatan tiga-dimensi serta informasi waktu, di mana saja di dunia ini tanpa tergantung waktu dan cuaca. Saat ini GPS sudah sangat banyak digunakan dalam berbagai bidang aplikasi dan juga semakin banyak diintegrasikan dengan teknologi-teknologi lainnya, seperti Sistem Informasi Geografis (SIG) dan penginderaan jauh. Salah satu aplikasi GPS yang cukup berkembang dewasa ini dan cukup punya potensi adalah penentuan TEC (*Total Electron Content*) di ionosfer, dalam rangka mengamati dan mempelajari karakteristik dari lapisan tersebut. Pengetahuan tentang TEC ini akan

sangat berguna untuk berbagai keperluan seperti penentuan posisi dalam sistem navigasi berbasis satelit, telekomunikasi dan aplikasi-aplikasi ruang angkasa lainnya.

Dibandingkan dengan teknologi-teknologi lain yang telah digunakan, misalnya radiosonde, teknologi GPS memiliki potensi besar untuk menentukan nilai TEC terutama untuk wilayah yang cukup luas dan banyak tertutup air seperti Indonesia. Selain itu, karena GPS dapat dimanfaatkan secara kontinyu tanpa tergantung waktu, tempat, dan cuaca, maka penentuan TEC dengan GPS dapat dilakukan secara intensif, mudah, efisien, dan juga ekonomis. Selanjutnya dalam paper ini akan dibahas mengenai metode penentuan TEC dengan menggunakan data kode dan data fase serta analisis data dari hasil yang diperoleh dari pengamatan satelit GPS di LAPAN Bandung.

*) Peneliti Bidang Dinamika Ionosfer, Puslitbang PI, LAPAN

2. IONOSFER DAN PENJALARAN

SINYAL GPS

Ionosfer adalah bagian dari lapisan atas atmosfer dimana terdapat sejumlah elektron dan ion bebas yang mempengaruhi penjalaran gelombang radio. Jumlah elektron dan ion bebas ini tergantung pada besarnya intensitas sinar EUV (*Extreme Ultra Violet*) serta densitas gas pada lapisan tersebut. Lapisan ionosfer ini terletak kira-kira antara 60 sampai 1000 km di atas permukaan bumi.

Setiap satelit dari 24 satelit GPS secara kontinu memancarkan sinyal-sinyal gelombang pada 2 frekuensi L-band yang dinamakan L1 dan L2. Sinyal L1 berfrekuensi 1575.42 Mhz dan sinyal L2 berfrekuensi 1227.60 Mhz. Sinyal L1 membawa 2 buah kode biner yang dinamakan kode-P (P-code, Precise or Private code) dan kode C/A (C/A-code, Clear Access or Coarse Acquisition), sedangkan sinyal L2 hanya membawa kode-C/A. Sinyal-sinyal dari satelit GPS tersebut, yang terletak kira-kira 20.000 km di atas permukaan bumi akan melalui lapisan ionosfer untuk sampai ke antena penerima (receiver) di permukaan bumi.

Ion-ion bebas (elektron) di ionosfer akan mempengaruhi penjalaran sinyal GPS. Dalam hal ini ionosfer akan mempengaruhi kecepatan, arah, polarisasi dan kekuatan dari sinyal GPS yang melaluinya. Efek dari ionosfer yang terbesar adalah pada kecepatan sinyal yang langsung mempengaruhi ukuran jarak dari pengamat ke satelit. Besarnya efek ionosfer tersebut tergantung pada konsentrasi elektron sepanjang lintasan sinyal serta frekuensi sinyal yang bersangkutan. Sedangkan konsentrasi elektron sendiri akan tergantung pada beberapa faktor, terutama aktivitas matahari dan medan magnet bumi yang keduanya juga akan tergantung pada lokasi geografis, musim dan waktu. Nilai TEC biasanya dinyatakan dalam TECU, dimana 1 TECU adalah sama dengan 10^{16} elektron/m². Nilai TEC ionosfer pada umumnya berkisar antara 1 sampai 200 TECU.

Pada pengamatan satelit GPS, pengaruh kesalahan jarak yang disebabkan oleh refraksi ionosfer merupakan suatu kesalahan yang cukup besar dibandingkan dengan jenis kesalahan lainnya, seperti kesalahan orbit, kesalahan akibat refraksi troposfer, dan

multipath. Besarnya kesalahan jarak (bias) ionosfer ini tergantung pada jumlah elektron sepanjang lintasan sinyal GPS serta frekuensi dari sinyal. Seandainya jumlah elektron sepanjang lintasan dinamakan STEC (Slant TEC) dan frekuensi dari sinyal adalah f , maka besarnya bias ionosfer orde-pertama (d_{ion}) dapat dirumuskan sebagai (Seeber, 1989) :

$$d_{ion} = 40.28 \cdot \frac{STEC}{f^2}, \text{ dalam unit meter ... (2-1)}$$

dengan STEC dinyatakan dalam unit elektron/m² dan frekuensi dalam unit Hertz. Pada frekuensi sinyal GPS, bias ionosfer pada jarak ukuran bisa lebih dari 150 m sampai kurang dari 5 m. Besarnya bias ionosfer tersebut didominasi oleh orde pertama bias ionosfer. Sedangkan orde kedua (fungsi dari $1/f^3$) dan orde ketiga (fungsi dari $1/f^4$) secara total hanya akan mencapai level maksimum sebesar beberapa desimeter [Wubbena, 1991].

3. DATA DAN METODE

3.1 Data Pengamatan GPS

Untuk mengamati TEC ionosfer, LAPAN telah mengoperasikan peralatan penerima GPS frekuensi ganda (Dual frequency GPS receiver) Ashtec Z-12 di Bandung sejak bulan Juni 1997. Data pengamatan penerima GPS ini adalah waktu tempuh (Δt) dari kode-kode P dan C/A serta fase (carrier phase, ϕ) dari gelombang pembawa L1 dan L2, yang selanjutnya dapat dikonversikan menjadi jarak dari antena ke satelit GPS. Hasil pengamatan ini terkait dengan posisi pengamat (x, y, z) serta parameter-parameter lainnya melalui hubungan yang dapat diformulasikan secara umum berikut ini :

$$P_i = \rho + d\rho + dtrop + dion_i + (dt - dT) + MP_i + \theta P_i \dots \dots (3-1)$$

$$L_i = \rho + d\rho + dtrop - dion_i + (dt - dT) + MC_i - \lambda_i N_i + \theta C_i \dots (3-2)$$

dengan :

$$P_i = c \cdot \Delta t_i = \text{pseudorange pada frekuensi } f_i \text{ (m)}, (i=1,2)$$

$$L_i = \lambda_i \cdot \phi_i = \text{jarak fase (carrier range) pada frekuensi } f_i \text{ (m)}, (i=1,2)$$

$$\rho = \text{jarak geometris antara pengamat (x,y,z) dengan satelit (m)}$$

$$c = \text{kecepatan cahaya dalam vakum (m/s)}$$

$$\lambda = \text{panjang gelombang dari sinyal (m)}$$

- dp = kesalahan jarak yang disebabkan oleh kesalahan ephemeris (orbit)
- dtrop = bias yang disebabkan oleh refraksi troposfer (m)
- dion_i = bias yang disebabkan oleh refraksi ionosfer (m) pada frekuensi f_i (m)
- dt, dT = kesalahan dan offset dari jam GPS receiver dan jam satelit (m)
- MP_i, MC_i = efek dari multipath pada hasil pengamatan P_i dan L_i (m)
- N₁, N₂ = ambiguitas fase dari pengamatan fase sinyal-sinyal L1 dan L2
- 9P_i, 9C_i = gangguan (noise) pada hasil pengamatan P_i dan L_i (m)

3. 2 Penentuan STEC Dengan Data Kode

Berdasarkan persamaan (2-1), persamaan untuk data kode (*pseudorange*) pada frekuensi L1 dan L2 masing-masing adalah :

$$P_1 = \rho + dp + dtrop + dion_1 + (dt - dT) + MP_1 + 9P_1, \quad (3-3)$$

$$P_2 = \rho + dp + dtrop + dion_2 + (dt - dT) + MP_2 + 9P_2, \quad (3-4)$$

Dari persamaan di atas terlihat bahwa jarak geometrik dari antenna GPS ke satelit, kesalahan ephemeris (orbit), dan bias troposfer akan sama untuk kedua *pseudorange*. Dengan mengurangi persamaan (3-3) dengan (3-4), maka akan didapatkan persamaan berikut :

$$P_1 - P_2 = (dion_1 - dion_2) + (MP_1 - MP_2) + (9P_1 - 9P_2), \quad (3-5)$$

Persamaan di atas dapat dituliskan sebagai :

$$(dion_1 - dion_2) = (P_1 - P_2) - (MP_1 - MP_2) - (9P_1 - 9P_2), \quad (3-6)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2-1) ke persamaan (3-6) maka akan diperoleh persamaan :

$$40.28 \left(\frac{STEC}{f_1^2} - \frac{STEC}{f_2^2} \right) = (P_1 - P_2) - (MP_1 - MP_2) - (9P_1 - 9P_2) \quad (3-7)$$

sehingga harga STEC dapat diformulasikan sebagai berikut :

$$STEC = \frac{(P_1 - P_2) - (MP_1 - MP_2) - (9P_1 - 9P_2)}{40.28 \cdot \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)} \quad (3-8)$$

dalam penentuan STEC dengan menggunakan data kode, efek dari kesalahan *multipath* dan *noise* pada data pengamatan umumnya diasumsikan telah diminimalkan dengan

strategi pengamatan tertentu ataupun dengan strategi pengolahan data seperti *smoothing* dan *filtering*, sehingga persamaan (3-8) di atas umumnya dapat disederhanakan menjadi :

$$STEC = \left(\frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{40.28(f_1^2 - f_2^2)} \right) \cdot (P_1 - P_2) \quad (3-9)$$

3.3 Penentuan STEC Dengan Data Fase

Berdasarkan persamaan (2-3), persamaan untuk data fase pada frekuensi L1 dan L2 masing-masing adalah :

$$L_1 = \rho + dp + dtrop - dion_1 + (dt - dT) + MC_1 - \lambda_1 \cdot N_1 + 9C_1, \dots \quad (3-10)$$

$$L_2 = \rho + dp + dtrop - dion_2 + (dt - dT) + MC_2 - \lambda_2 \cdot N_2 + 9C_2, \dots \quad (3-11)$$

Dengan mengurangkan kedua persamaan di atas, maka akan diperoleh persamaan :

$$(dion_1 - dion_2) = (L_1 - L_2) + (\lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2) - (MC_1 - MC_2) + (9C_1 - 9C_2) \dots \quad (3-12)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2-1) ke persamaan (3-12), maka akan diperoleh persamaan :

$$40.28 \left(\frac{STEC}{f_1^2} - \frac{STEC}{f_2^2} \right) = (L_1 - L_2) + (\lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2) - (MC_1 - MC_2) - (9C_1 - 9C_2) \dots \quad (3-13)$$

Seandainya efek dari kesalahan *multipath* dan *noise* pada data pengamatan diasumsikan telah diminimalkan dengan strategi pengamatan tertentu ataupun dengan strategi pengolahan data seperti *smoothing* dan *filtering*, maka persamaan (3-13) dapat disederhanakan menjadi :

$$STEC = \left(\frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{40.28(f_1^2 - f_2^2)} \right) \cdot [(L_1 - L_2) + (\lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2)] \quad (3-14)$$

Dengan mengasumsikan tidak terjadinya *cycle slip* antara epok-epok yang berurutan (t₁ dan t₂), sehingga N₁(t₁) = N₁(t₂) dan N₂(t₁) = N₂(t₂), maka persamaan (3-14) dapat dituliskan dalam bentuk :

$$\delta STEC = \left(\frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{40.28(f_1^2 - f_2^2)} \right) \cdot [(\delta L_1 - \delta L_2)] \quad (3-15)$$

dengan $\delta STEC$, δL_1 dan δL_2 adalah selisih nilai STEC, jarak fase L1 dan jarak fase L2 antara dua epok yang berurutan, yang dapat diformulasikan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta STEC &= STEC(t_2) - STEC(t_1) \\ \delta L_1 &= L_1(t_2) - L_1(t_1) \dots\dots\dots (3-16) \\ \delta L_2 &= L_2(t_2) - L_2(t_1) \end{aligned}$$

3.4. Penentuan VTEC Dari STEC

Untuk mendapatkan nilai VTEC dari nilai STEC di titik ionosfer tertentu (i) pada suatu epok tertentu (t) seperti yang terlihat pada Gambar 3-1, maka dapat digunakan formulasi berikut ini :

$$VTEC_i(t) = STEC_i(t) \cdot \cos z'_i(t) \dots\dots\dots (3-17)$$

dengan z' adalah sudut zenith ke satelit di titik ionosfer. Sudut zenith satelit di titik ionosfer (z') dapat dihitung dari sudut zenith (z) atau sudut elevasi (e) di titik pengamat, sebagai berikut :

$$z' = \sin^{-1} \left(\frac{R_e}{R_e + h_m} \sin(z) \right) = \sin^{-1} \left(\frac{R_e}{R_e + h_m} \cos(e) \right) \quad (3-18)$$

dengan R_e adalah radius bumi rata-rata (≈ 6378 km) dan h_m adalah ketinggian lapisan ionosfer yang dianggap representatif, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-2. Untuk harga h_m , (Gervaise et al., 1985) menggunakan 300 km, (Wild et al., 1989) menggunakan 350 km seperti yang digunakan dalam paper ini, (Finn dan Matthewman, 1989) menganjurkan 400 km.

Pada persamaan (3-16) di atas, sudut elevasi (e) atau sudut zenith (z) satelit di titik pengamat dapat dihitung jika koordinat satelit (X^s, Y^s, Z^s) dan koordinat pengamat yaitu (X_r, Y_r, Z_r) dan (L_r, B_r) diketahui. Untuk menghitung sudut elevasi (e) dan sudut zenit (z) dari satelit dilihat dari titik pengamat, dapat digunakan formulasi berikut :

$$e = \sin^{-1} \left[\frac{\cos L_r \cdot \cos B_r \cdot \Delta X_r^s + \cos L_r \cdot \sin B_r \cdot \Delta Y_r^s + \sin L_r \cdot \Delta Z_r^s}{\sqrt{(\Delta X_r^s)^2 + (\Delta Y_r^s)^2 + (\Delta Z_r^s)^2}} \right] \quad (3-19)$$

dan $z = 90^\circ - e, \dots\dots\dots(3-20)$

$$\Delta X_r^s = X^s - X_r$$

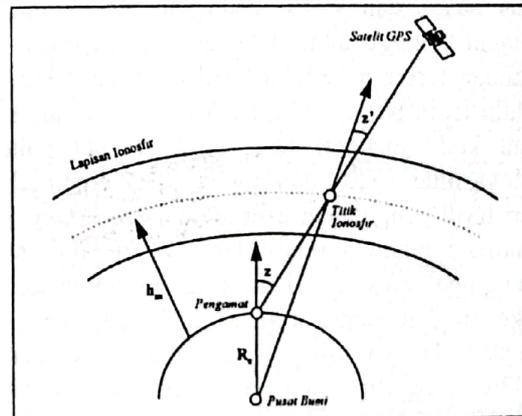
$$\Delta Y_r^s = Y^s - Y_r$$

dengan : $\dots\dots\dots (3-21)$

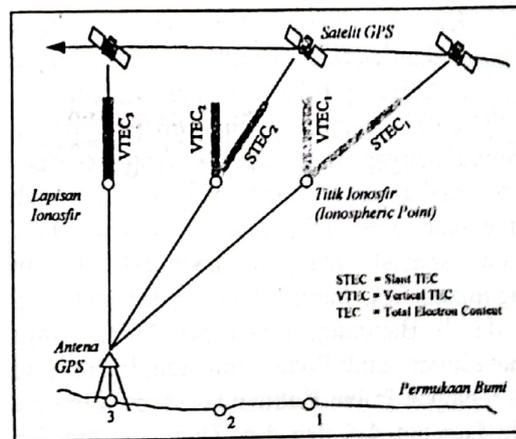
$$\Delta Z_r^s = Z^s - Z_r$$

L_r, B_r = lintang dan bujur pengamat

Dalam kasus GPS, koordinat satelit dapat dihitung dengan menggunakan data-data elemen orbitalnya yang terdapat dalam *broadcast ephemeris* yang merupakan salah satu komponen data GPS yang diterima oleh pengamat pada saat mengamati satelit. Koordinat pengamat dapat dibaca dari peta topografi ataupun dari data sebelumnya kalau seandainya sudah ada.



Gambar 3-1 : PENENTUAN STEC DAN VTEC DENGAN GPS



Gambar 3-2 : GEOMETRI MODEL IONOSFER LAPISAN TUNGGAL

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

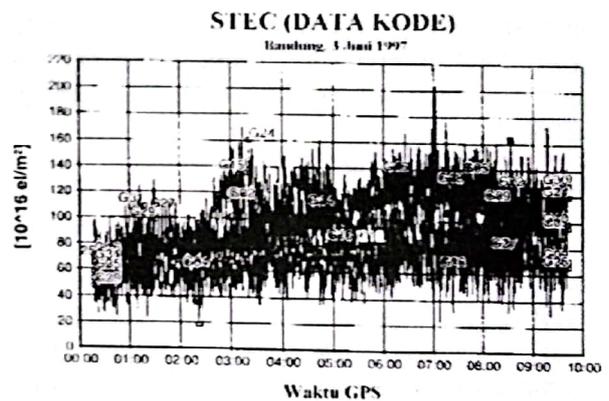
Karena satelit GPS bergerak dalam orbitnya, maka secara teoritis yang dihitung dari pengamatan GPS pada dasarnya adalah nilai TEC pada titik-titik ionosfer (*ionospheric point*) yang berbeda dengan titik lokasi antena GPS. Karena umumnya yang banyak digunakan untuk merepresentasikan TEC adalah VTEC (Vertical TEC), maka setelah nilai STEC dihitung dengan menggunakan data kode (persamaan 3-9) dan data fase (persamaan 3-15), selanjutnya ditentukan pula nilai VTEC dengan menggunakan persamaan (3-17) untuk masing-masing data kode dan data fase.

Gambar 4-1 dan 4-2 menunjukkan salah satu contoh hasil perhitungan nilai STEC dan VTEC, yaitu hasil pengamatan pada tanggal 3 Juni 1997, dengan menggunakan data kode. Sedangkan Gambar 4-3 dan 4-4 menunjukkan nilai STEC dan VTEC pada hari yang sama, dengan menggunakan data fase. Dari gambar-gambar tersebut terlihat bahwa nilai STEC selalu lebih besar dari nilai VTEC, baik untuk data kode maupun fase. Juga terlihat pula bahwa nilai STEC dan VTEC yang diperoleh dari hasil pengolahan data kode (*pseudorange*) fluktuasi nilainya relatif lebih besar. Hal ini mengingat efek dari kesalahan *multipath* dan juga tingkat derau (*noise*) dari data pengamatan. Hanya saja karena nilai STEC dan VTEC yang diperoleh dari data fase sifatnya relatif, maka untuk menentukan harga STEC dan VTEC absolut digunakan hasil pengamatan dengan menggunakan data kode.

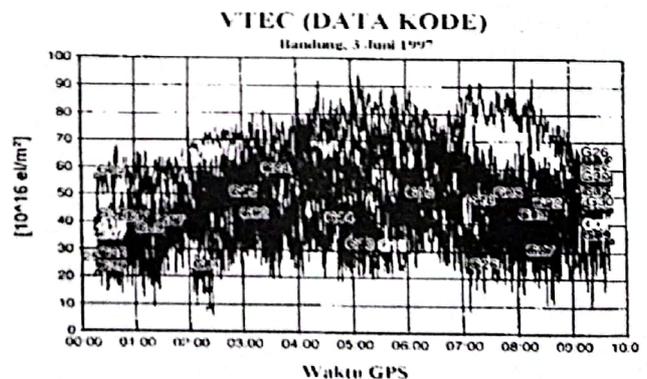
Karena pengamatan TEC dengan menggunakan penerima GPS dapat dilakukan sekaligus terhadap beberapa satelit, dan satelit-satelit GPS tersebut selalu bergerak dalam orbitnya dengan sudut elevasi yang berubah-ubah, maka GPS dapat digunakan untuk memetakan nilai TEC disuatu wilayah, baik secara spasial maupun temporal. Dalam pengamatan ini, karena lokasi penerima GPS berada di Bandung, maka peta TEC hanya dapat dibuat untuk Pulau Sumatera, Pulau Jawa dan sebagian Pulau Kalimantan, seperti terlihat pada Gambar 4-5 dan 4-6. Dari peta tersebut terlihat bahwa nilai VTEC di Bandung pada bulan September lebih besar dari nilai VTEC pada bulan Juni. Hal ini disebabkan karena posisi matahari pada bulan September adalah

berada di atas ekuator. Demikian juga Nilai VTEC pada tengah hari (12 LT) akan jauh lebih besar daripada sore (18 LT) maupun malam hari (0 LT).

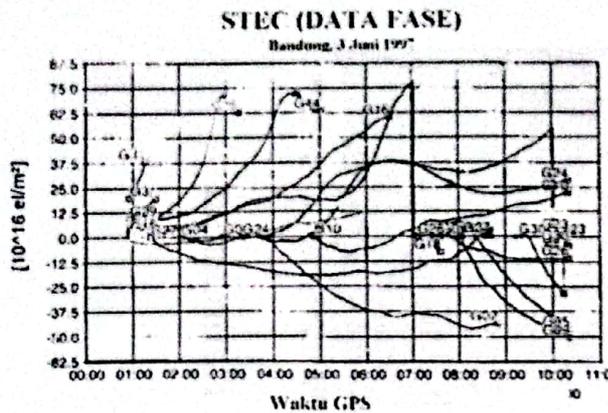
Pembuatan peta TEC tersebut dilakukan dengan menggunakan analisis grid, dengan ukuran grid sebesar $4^\circ \times 4^\circ$. Untuk membuat peta TEC yang mencakup seluruh wilayah Indonesia masih diperlukan sebuah penerima GPS dengan tipe yang sama dan dipasang disalah satu tempat di Indonesia bagian timur. Dengan dapat dibuatnya peta TEC ionosfer untuk wilayah Indonesia, maka selanjutnya akan dapat digunakan untuk menentukan koreksi delay ionosfer yang mencakup seluruh wilayah Indonesia. Koreksi delay ionosfer ini sangat diperlukan untuk penentuan posisi yang lebih akurat dalam sistem navigasi berbasis satelit, diantaranya untuk keperluan pendaratan pesawat terbang, karena kontribusi kesalahan posisi penerima GPS oleh ionosfer dapat mencapai lebih dari 100 meter, tergantung pada situasi dan kondisi ionosfer.



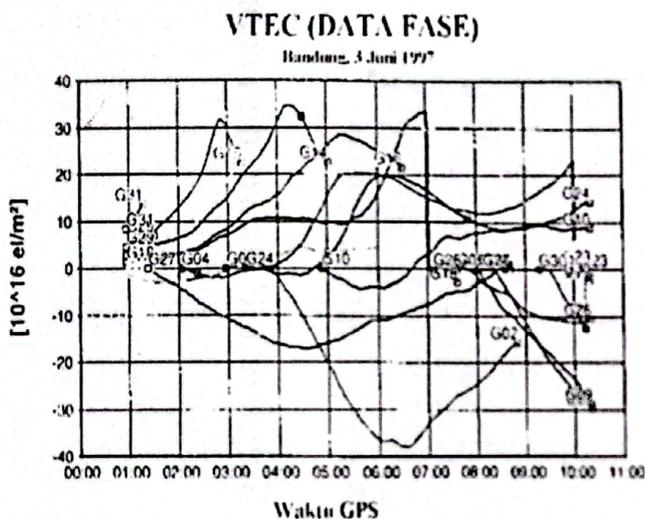
Gambar 4-1 : STEC (DATA KODE) DI BANDUNG, 3 JUNI 1997



Gambar 4-2 : VTEC (DATA KODE) DI BANDUNG, 3 JUNI 1997



Gambar 4-3 : STEC (DATA FASE) DI BANDUNG, 3 JUNI 1997



Gambar 4-4 : VTEC (DATA FASE) DI BANDUNG, 3 JUNI 1997

5. KESIMPULAN

Dari proses penentuan nilai TEC dengan menggunakan data kode dan data fase dari satelit GPS yang diamati di Bandung, ada beberapa hal yang dapat disimpulkan, yaitu sebagai berikut :

- a. Nilai STEC dan VTEC yang diperoleh dari hasil pengolahan data kode relatif kurang presisi dibandingkan dengan yang diperoleh dari data fase. Namun untuk menentukan nilai absolut dari STEC dan VTEC perlu digunakan hasil pengolahan data kode, karena dari hasil pengolahan data fase hanya menunjukkan harga relatif dari STEC dan VTEC.

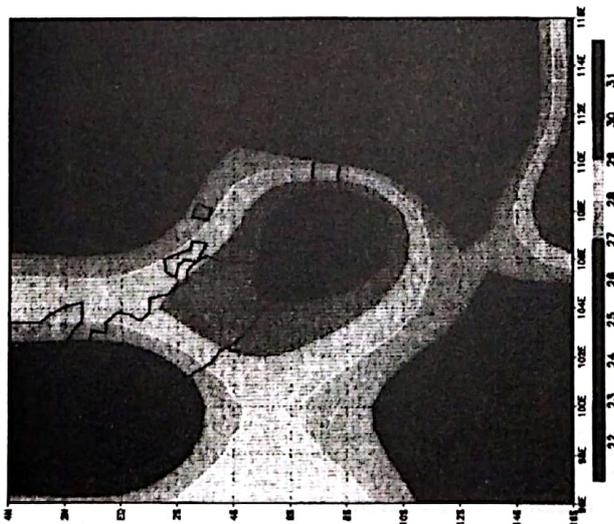
- b. Karena pengamatan GPS dapat dilakukan sekaligus terhadap beberapa satelit dan satelit-satelit GPS tersebut selalu bergerak dalam orbitnya dengan sudut elevasi yang berubah-ubah, maka GPS dapat digunakan untuk memetakan nilai TEC di suatu wilayah. Hanya saja untuk wilayah yang sangat luas seperti Indonesia, diperlukan lebih dari satu pesawat penerima GPS.

DAFTAR PUSTAKA

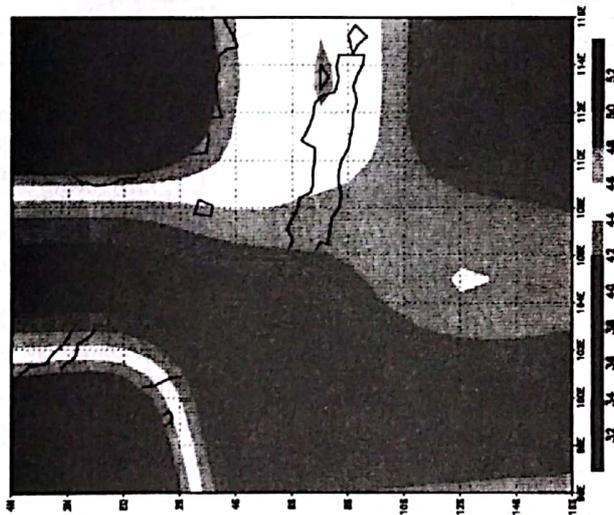
1. Finn, A. and J. Matthewman (1989), A single frequency ionospheric refraction correction algorithm for Transit and GPS, Proc. of the Fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Las Cruces, New Mexico, March 13-17, Vol 2, pp. 737-756.
2. Gervaise, J., M. Mayoud, G. Beutler, W. Gurtner (1985), Test of GPS on the CERNLEP control network, Proc. of the Joint Meeting of FIG Study Groups 5B and 5C on Inertial Doppler, and GPS Measurements for National and Engineering Survey, Munich, July 1-3, Vol. 20-2, pp. 337-358.
3. Seeber, G (1989), Satellitengeodasie : Grundlagen, Methoden und Anwendungen, Walter de Gruyter, Berlin, New York, p. 50.
4. Wild, U., G. Beutler, W. Gurtner, M. Rothacher (1989), Estimating the ionosphere using one or more dual frequency GPS receivers, Proc. of the Fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Las Cruces, New Mexico, March 13-17, Vol. 2, pp. 724-736.
5. Wubbena, G (1991), GPS-techniques applied to geodesy and surveying, Springer, Berlin, New York, pp. 381-392.

JUNI 1997

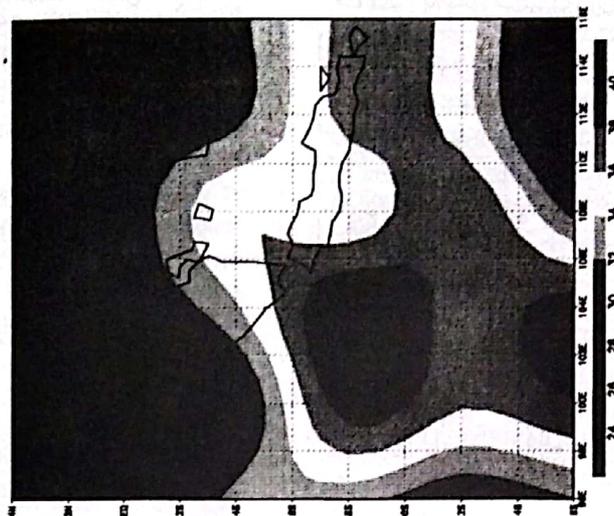
00.00 LT



12.00 LT

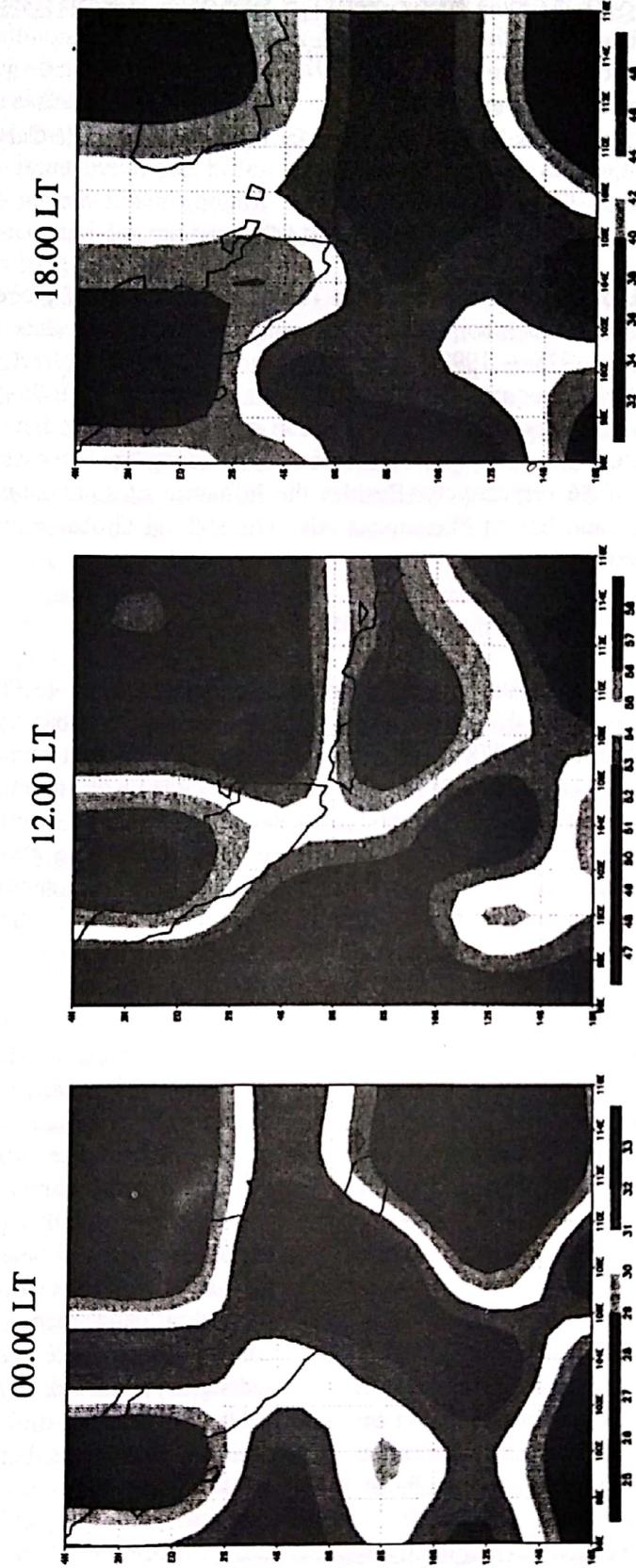


18.00 LT



Gambar 4-5 : Peta TEC P. Sumatera, P. Jawa, dan sebagian P. Kalimantan

SEPTEMBER 1997



Gambar 4-6 : Peta TEC P. Sumatera, P. Jawa, dan sebagian P. Kalimantan