

# **PENGARUH IONOSFER PADA AKURASI PENENTUAN POSISI ABSOLUT DENGAN GPS *SINGLE FREQUENCY* PADA SAAT TERJADI BADAI MATAHARI**

**Buldan Muslim**

Peneliti Pusat Sains Antariksa, LAPAN

e-mail: buldan@bdg.lapan.go.id

Diterima 27 Mei 2011; Disetujui 23 Agustus 2011

## **ABSTRACT**

The effect of the ionosphere on the propagation of signals emitted from GPS satellites at an altitude of about 20,000 km is in the form of code delay or carrier advance of the signal propagation time which depends on the Total Electron Content (TEC) and the GPS signals frequency. Coronal Mass Ejections (CMEs) occurred during October 28 and 29, 2003 solar storms have caused ionosphere disturbances called ionospheric storms. The ionospheric storms have degraded the accuracy of single frequency GPS absolute positioning to more than 400%. Mitigation of ionospheric storms effect on the single frequency GPS absolute positioning by using Klobuchar model can not produce a significant increase in accuracy. Hence during the ionospheric storms, the regional ionospheric TEC model is needed for ionospheric correction of single frequency GPS absolute point positioning.

Keywords: *Solar storm, Ionosphere, Radio wave, Propagation, Positioning, Accuration*

## **ABSTRAK**

Pengaruh ionosfer pada propagasi sinyal yang dipancarkan dari satelit GPS pada ketinggian sekitar 20.000 km adalah berupa penundaan waktu propagasi sinyal kode atau percepatan propagasi fase GPS yang tergantung pada *Total Electron Content* (TEC) dan frekuensi sinyal GPS. *Coronal Mass Ejections* (CMEs) yang terjadi selama badai Matahari pada tanggal 28 dan 29 Oktober 2003 telah menyebabkan gangguan ionosfer, disebut badai ionosfer. Badai ionosfer tersebut telah menyebabkan penurunan akurasi penentuan posisi absolut dengan GPS frekuensi tunggal sampai lebih dari 400%. Mitigasi efek badai ionosfer pada penurunan akurasi posisi tersebut menggunakan model Klobuchar tidak dapat menghasilkan peningkatan akurasi yang signifikan. Oleh karena itu pada saat ada badai ionosfer diperlukan model TEC ionosfer regional untuk koreksi posisi GPS frekuensi tunggal.

Kata kunci: *Badai Matahari, Ionosfer, Gelombang radio, Propagasi, Penentuan posisi GPS, Akurasi*

## 1 PENDAHULUAN

Ionosfer adalah bagian dari atmosfer atas yang berisi sejumlah elektron-elektron dan ion-ion yang terletak pada ketinggian sekitar 60-1000 km, dan dapat mempengaruhi propagasi gelombang radio. Ionosfer dihasilkan terutama oleh radiasi Matahari *Extreme Ultra Violet* (EUV). Medan magnet Bumi di daerah lintang rendah arahnya mendekati horizontal. Pada siang hari medan listrik di ionosfer arahnya ke timur. Oleh karena itu pada saat tersebut ionosfer di daerah ekuator terangkat ke atas, kemudian mengalami difusi karena gaya gravitasi Bumi ke bawah sepanjang garis gaya medan magnet Bumi, sehingga terjadi anomali ionisasi ionosfer di daerah lintang rendah.

TEC bervariasi baik secara spasial maupun temporal. Variasi spasial TEC di daerah lintang geomagnet rendah di mana Indonesia terletak di daerah tersebut adalah terbesar dibandingkan dengan variasi spasial TEC di daerah lintang tengah dan tinggi. Secara temporal TEC bervariasi mengikuti pola siklus aktivitas Matahari yang memiliki periode sekitar 11 tahun, mengikuti variasi musim (bulanan) karena variasi posisi orbit Matahari ditinjau dari Bumi dan bervariasi terhadap waktu lokal. Variasi temporal tersebut merupakan efek langsung dari variasi intensitas gelombang elektromagnetik Matahari yang masuk atmosfer atas yaitu *Extreme Ultra Violet* (EUV) dan sinar X. Selain jenis radiasi elektromagnetik tersebut, matahari juga memancarkan radiasi partikel. Pada saat terjadi badai matahari, baik intensitas radiasi elektromagnetik maupun partikel meningkat tajam. Jika badai Matahari mengarah ke Bumi dapat menimbulkan gangguan-gangguan ionosfer seperti badai ionosfer, *Traveling Ionospheric Disturbance* (TID) dan perubahan kerapatan elektron ionosfer.

*Global Positioning System* (GPS) adalah sistem penentuan posisi global berbasis satelit telah digunakan secara luas dalam penentuan posisi, navigasi dan transfer waktu. Setiap satelit GPS mentransmisikan dua gelombang pembawa pada L1 (1575,42 MHz) dan L2 (1227,6 MHz) berisi data *ephemiris* dan jarak setiap satelit ke receiver GPS. Dengan diperolehnya informasi posisi satelit dari data GPS dan data jarak beberapa satelit GPS, pengguna dapat menentukan posisi receiver GPS. Pengukuran GPS aktual adalah *pseudorange* karena adanya *offset* jam *receiver* dari waktu GPS sebenarnya. Oleh karena itu paling sedikit dibutuhkan empat pengamatan satelit GPS secara simultan untuk penentuan posisi *receiver* (X, Y, Z) dan kesalahan sinkronisasi jam *receiver* dan jam satelit.

Kesalahan pengukuran jarak dengan GPS tergantung secara langsung pada TEC dan berbanding terbalik dengan kuadrat frekuensi sinyal GPS. TEC dapat didefinisikan sebagai jumlah elektron pada

lintasan sinyal GPS dari satelit ke *receiver* yang ekuivalen dengan silinder dengan luas penampang 1 meter persegi. TEC dapat diukur dalam TEC unit (TECU). Satu TECU setara dengan  $10^{16}$  elektron/m<sup>2</sup>. Nilai TEC sebesar 1 TECU memberikan dampak pada kesalahan pengukuran GPS sebesar 0,162 m pada frekuensi L1.

TEC bervariasi dalam orde beberapa TECU sampai puluhan TECU dalam satu hari. Pada saat terjadi badai Matahari nilai TEC dapat naik menjadi beberapa ratus TECU dan menyebabkan kesalahan pengukuran GPS sampai 150 meter pada tengah hari dalam arah sinyal mendekati horison (El-Rabbany, 2001).

Tahun 2003 adalah periode aktivitas Matahari menurun (siklus 23), tetapi pada tanggal 28 dan 29 Oktober terjadi fenomena cuaca antariksa ekstrim. Rao et.al. (2010) menunjukkan bahwa efek cuaca antariksa ekstrim tersebut adalah berupa badai geomagnet diikuti dengan gangguan TEC. Gangguan TEC tersebut mempengaruhi kinerja sistem *Global Navigation Satellite System* (GNSS). Mitigasi dampak gangguan ionosfer tersebut pada GNSS tidak dapat dimitigasi dengan baik menggunakan model *International References Ionosphere* versi 2001 (IRI 2001). Sehingga disimpulkan bahwa pada saat terjadi badai geomagnet diperlukan model regional untuk estimasi TEC yang lebih akurat di daerah India. Tetapi Rao et.al. (2010) belum menunjukkan pengaruh cuaca antariksa ekstrim tersebut pada akurasi posisi GPS.

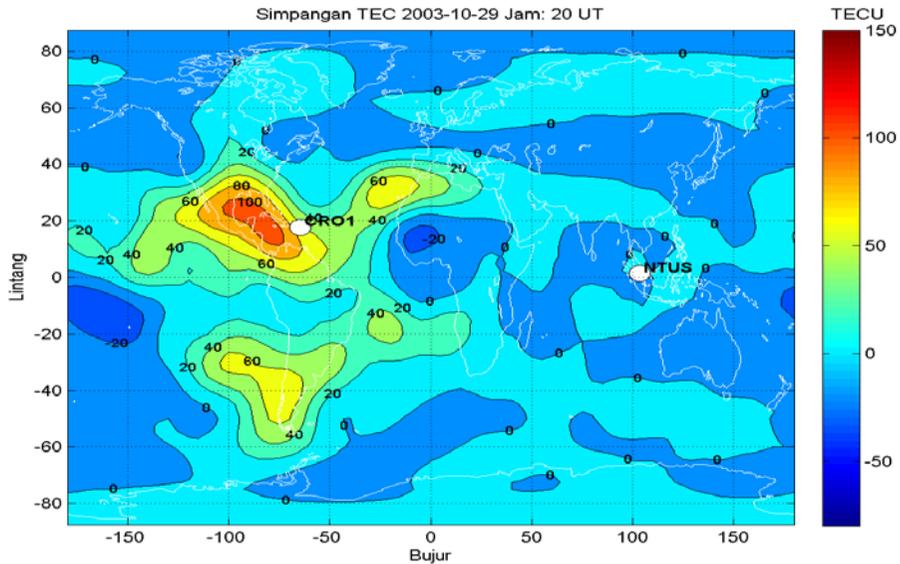
Pada makalah ini didiskusikan pengaruh badai ionosfer pada akurasi posisi GPS metode absolut pada saat terjadi badai Matahari pada tanggal 28 dan 29 Oktober 2003.

## 2 DATA OBSERVASI

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data pengamatan GPS yang sinyalnya terganggu oleh badai ionosfer positif besar yaitu dari stasiun CRO1 (17,6°LU, 64,6° BB). CRO1 adalah nama stasiun GPS yang terletak di Kota Christiansted, Virgin Islands, Amerika sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2-1.

Stasiun GPS tersebut menerima dua frekuensi L1 dan L2. Posisi absolut GPS dapat ditentukan dari data kode pada frekuensi L1. Hasil perhitungan posisi dengan satu frekuensi tersebut dibandingkan dengan posisi presisi dan akurat dapat diunduh dari internet (<ftp://garner.ucsd.edu/pub/timeseries>).

Penentuan posisi metode absolut ini dilakukan pada kondisi ionosfer terganggu saat terjadi CME pada tanggal 28 dan 29 Oktober 2003 dan satu hari sebelum badai (pada tanggal 27 Oktober) serta dua hari setelah badai tanggal 29 Oktober yaitu tanggal 30 dan 31 Oktober.



Gambar 2-1: Lokasi stasiun GPS yang digunakan adalah CRO1 (17,6°LU, 64.6°BB) mengalami badai ionosfer positif tanggal 29 Oktober 2003 pukul 20:00 UT

Dari data kode pada frekuensi L1 dapat ditentukan posisi GPS jika diketahui koordinat satelit GPS pada saat pengamatan GPS. Data koordinat satelit GPS ada dalam file brdcddd.yyn yang dapat diunduh dari <ftp://cdis.gsfc.nasa.gov/pub/>.

Selain data GPS untuk analisis pengaruh badai ionosfer pada akurasi posisi GPS, data TEC model *Global Ionospheric Map* (GIM) selama satu bulan telah digunakan untuk estimasi deviasi TEC (DSTEC) yaitu simpangan TEC pada jam tertentu dari nilai TEC rata-rata bulanan. Data TEC GIM dapat diunduh dari <ftp://cdis.gsfc.nasa.gov/CODE>.

### 3 METODOLOGI

Metode untuk mengetahui pengaruh ionosfer pada akurasi posisi absolut GPS dilakukan melalui tahap-tahap sebagai berikut:

- 3.1 Menghitung simpangan TEC pada jam tertentu selama 24 jam mulai tanggal 27 – 31 Oktober 2003 dari rata-rata TEC bulanan.
- 3.2 Menghitung posisi satelit pada saat sinyal dipancarkan dari satelit dari data navigasi.
- 3.3 Koreksi posisi satelit karena rotasi Bumi selama waktu propagasi sinyal dari satelit sampai *receiver* GPS.
- 3.4 Menghitung elevasi dan azimuth dari satelit dengan posisi awal dari data pengamatan GPS.

3.5 Menghitung posisi *receiver* dari data jarak yang dikoreksi dari pengaruh troposfer menggunakan model Saastamoinen.

Jika posisi satelit GPS sudah diketahui misal  $X_s, Y_s, Z_s$ , maka posisi *receiver* GPS dapat ditentukan dari dua data utama yaitu data jarak satelit dari *receiver* GPS  $C_r^s$ .

Dari 4 pengamatan simultan (pada koordinat  $X_s$ , indeks  $s = 1, 2, 3, 4$ ) dapat diselesaikan empat parameter yang tidak diketahui yaitu koordinat *receiver*  $X_r, Y_r, Z_r$  dan kesalahan sinkronisasi jam *receiver* dan satelit ( $dT_{rs}$ ). Hubungan antara besaran yang diketahui dan yang tidak diketahui diberikan dengan hukum *Pythagoras* yang dituliskan sebagai (McKessock, 2007)

$$C_r^s = \sqrt{(X_r - X_s)^2 + (Y_r - Y_s)^2 + (Z_r - Z_s)^2}, s = 1, 2, \dots, n \quad (3-1)$$

Keterangan:

- $C_r^s$  = data pengamatan jarak kode *C/A* pada frekuensi *L1* untuk satelit  $s$ ,
- $X_r, Y_r$  dan  $Z_r$  = koordinat *receiver* dalam kerangka koordinat terpusat yang dikenal dengan *ECEF* (*Earth-Centered Earth-Fixed*),
- $X_s, Y_s$  dan  $Z_s$  = koordinat satelit dalam sistem *ECEF*, untuk satelit  $s$ , dan
- $n$  = jumlah satelit yang teramati secara simultan.

Pengamatan jarak kode  $C_r^s$  mengandung beberapa kesalahan bersumber dari medium propagasi sinyal GPS yaitu bias troposfer ( $d_{trop}$ ) dan bias ionosfer ( $d_{ion}$ ), derau pengukuran pada data kode *C1* ( $e_{r(C1)}$ ), kesalahan jam *receiver*  $dt$ , kesalahan jam satelit  $dT$  dan kesalahan multipath ( $M$ ) serta kesalahan posisi orbit ( $d_{orb}$ ) sehingga persamaan pengamatan jarak kode GPS dan hubungannya dengan jarak satelit-*receiver* GPS sebenarnya  $R_r^s$  (disebut juga jarak geometri) dapat dituliskan sebagai (SamSul, 2000)

$$C_r^s = R_r^s + c(dt - dT) + d_{trop} + d_{ion} + d_{orb} + M + e_{r(C1)} \quad (3-2)$$

Dengan menggunakan model troposfer Saastamoinen (Saastamoinen, 1972; McCarthy dan Petit, 2004)  $d_{trop}$  dapat direduksi, dan dengan meringkas suku kedua sisi kanan sebagai  $dT_{rs}$  yaitu kesalahan sinkronisasi waktu GPS, maka setelah substitusi persamaan (3-1) dengan persamaan (3-2) diperoleh persamaan

$$\rho_r^s + dT_{rs} = \sqrt{(X_r - X_s)^2 + (Y_r - Y_s)^2 + (Z_r - Z_s)^2}, s = 1, 2, \dots, n \quad (3-3)$$

di mana

$$\rho_r^s = R_r^s + d_{ion} + E_s \quad (3-4)$$

dengan  $E_s$  adalah kesalahan total sisa-sisa koreksi yang tidak dapat dimodelkan pada pengamatan jarak seperti sisa kesalahan koreksi troposfer ( $e_{dtrop}$ ) dan sisa kesalahan koreksi orbit dengan data orbit ( $e_{dorb}$ ) yaitu

$$E_s = dT_{rs} + M + e_r + e_{dtrop} + e_{dorb} \quad (3-5)$$

Persamaan (3-3) dapat dilinierisasi menjadi (SamSvl, 1997)

$$\rho_r^s + dT_{rs} + E_s = R_r^s + \frac{(Xr-Xs)}{R_r^s} \Delta X + \frac{(Yr-Ys)}{R_r^s} \Delta Y + \frac{(Zr-Zs)}{R_r^s} \Delta Z \quad (3-6)$$

yang bisa ditulis dalam bentuk matrik menjadi

$$AX = b \quad (3-7)$$

dengan

$$A = \frac{(Xr-Xs)}{R_r^s} + \frac{(Yr-Ys)}{R_r^s} + \frac{(Zr-Zs)}{R_r^s}, \quad (3-8)$$

$$X = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \\ -dT_{rs} \end{bmatrix}, \quad (3-9)$$

$$b = \rho_r^s - R_r^s. \quad (3-10)$$

Dengan menentukan posisi awal *receiver* ( $X_r, Y_r, Z_r$ ),  $b$  bisa dihitung dari data pengamatan yang dikoreksi dan data orbit satelit ( $X_s, Y_s, Z_s$ ) sehingga  $X$  bisa diperoleh dengan metode inversi sebagai berikut,

$$X = \text{inv}(A' \cdot A) \cdot A \cdot b. \quad (3-11)$$

Dengan posisi awal *receiver* maka setelah simpangan posisi diperoleh dari persamaan (3-11) maka posisi *receiver* GPS awal dapat dihitung kembali dengan persamaan

$$\begin{aligned} X_r(\text{baru}) &= X_r + \Delta X \\ Y_r(\text{baru}) &= Y_r + \Delta Y \\ Z_r(\text{baru}) &= Z_r + \Delta Z \end{aligned} \quad (3-12)$$

3.6 Menghitung posisi receiver dari data jarak dengan koreksi ionosfer model Klobuchar (sama dengan langkah 3.4 tetapi  $d_{ion}$  diestimasi dengan model Klobuchar).

3.7 Menghitung simpangan posisi absolut GPS stasiun CRO1 setiap 30 detik hasil perhitungan 3.5 dan 3.6 dari posisi presisi dapat diperoleh dari <ftp://garner.ucsd.edu/pub/timeseries> tanggal 27 – 31 Oktober 2003 dimana terjadi badai Matahari tanggal 28 dan 29 Oktober sehingga dapat diketahui sejauh mana dampak badai

Matahari tersebut pada akurasi posisi absolut GPS frekuensi tunggal.

- 3.8 Menghitung kesalahan posisi absolut setiap jam dengan formulasi *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk posisi tanpa koreksi model Klobuchar dan untuk posisi dengan koreksi model Klobuchar.
- 3.9 Menghitung simpangan posisi kondisi tenang RMSEm dengan cara menghitung rata-rata bulanan RMSE pada jam 0 sampai 23.
- 3.10 Menghitung penurunan akurasi posisi dengan perbandingan RMSE mulai 27 – 31 Oktober 2003 terhadap rata-rata jam-an RMSEm.
- 3.11 Menghitung korelasi simpangan TEC yang diindikasikan dengan deviasi TEC (DTEC) dengan perubahan akurasi posisi GPS yang diindikasikan deviasi RMSE ( $DRMSE = RMSE_j - RMSE_m$ ).
- 3.12 Menghitung peningkatan akurasi posisi dengan rumus

$$PA = \left( \frac{RMSE_{non} - RMSE_{klob}}{RMSE_{non}} \right) \times 100\% \quad (3-13)$$

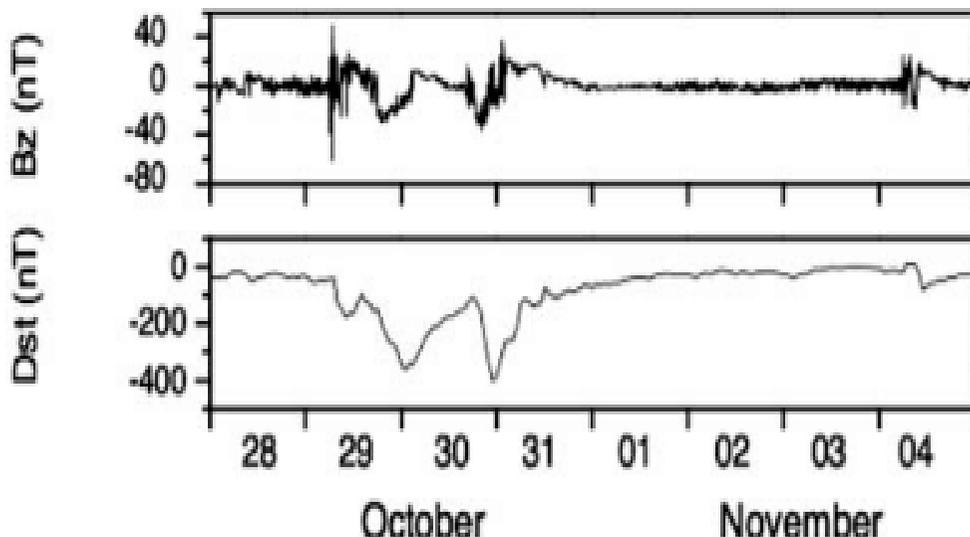
Di mana dalam persamaan tersebut  $RMSE_{non}$  adalah kesalahan posisi GPS CRO1 tanpa koreksi ionosfer model Klobuchar,  $RMSE_{klob}$  adalah kesalahan posisi dengan koreksi ionosfer model Klobuchar.

## 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Dampak Badai Matahari pada Lapisan Ionosfer

Berdasarkan analisis data magnetogram diketahui bahwa badai Matahari akibat flare kelas X17 terjadi pada tanggal 28 Oktober 2003 pukul 11:01 UT dan mencapai maksimum pada pukul 11:10 UT (Mandrini et.al., 2006). Flare tersebut disertai CME terdeteksi pada pukul 11:30:05 UT dengan kecepatan linier sekitar 2.459 km/s (SOHO LASCO CME catalog, 2003). Beberapa jam kemudian terlihat adanya permulaan badai geomagnet yang ditandai dengan *Sudden Storm Commencement* (SSC) yang jelas pada pukul 06:11 UT (atau pukul 13:11 WIB) pada tanggal 29 Oktober 2009 (Mandrini et.al., 2006). Gambar 4-1 menunjukkan waktu terjadinya gangguan medan magnet antariksa dan geomagnet sebagaimana diindikasikan oleh variasi *Interplanetary Magnetic Field* (IMF) dan indek gangguan geomagnet (Dst). Jika CME tersebut diasumsikan terjadi pada pukul 11:01 UT maka waktu penjarangan CME sampai magnetosfer Bumi sekitar 19,17 jam yang hampir sama dengan estimasi Plunkett (2005) yaitu sekitar 19 jam. Estimasi waktu penjarangan CME ini lebih lama dari hasil perhitungan dengan asumsi kecepatan linier CME sebesar 2.459 km/s dengan jarak tempuh  $1,5 \times 10^8$  km yang menghasilkan estimasi waktu

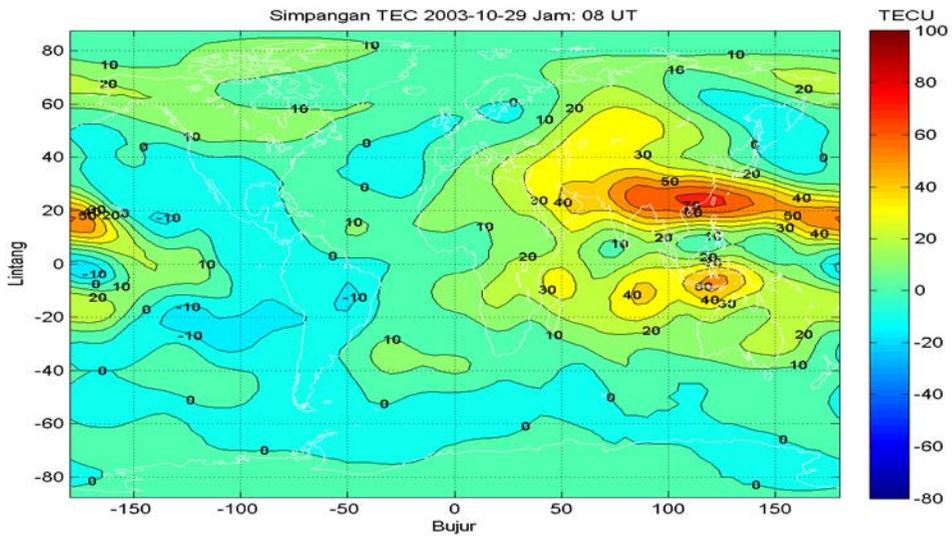
penjalaran sekitar 17 jam. Hal ini disebabkan oleh adanya perlambatan CME sehingga rata-rata kecepatan CME adalah sebesar 2.140 km/s sebagaimana dinyatakan oleh Pohjolainen (2007).



Gambar 4-1: Respon medan magnet magnetosfer dan gangguan geomagnet terhadap CME pada tanggal 28 dan 29 Oktober 2003 (Tsurutani et.al., 2006)

Pada tanggal 29 Oktober 2003 terjadi lagi flare sinar X kelas X11 teramati dari *GOES X-ray Flux*. Pada saat tersebut intensitas sinar X telah mencapai puncak pada pukul 20:48 UT. Flare ini disertai CME teramati pada pukul 20:54:05 UT (atau 30 Oktober pukul 03:54:05 WIB) dengan kecepatan sekitar 2029 km/s (dari SOHO LASCO CME catalog, 2003) yang mencapai magnetosfer Bumi (walaupun tidak terlihat jelas adanya SSC) pada tanggal 30 Oktober 2003 pukul 16:30 UT atau 23:30 WIB (Rosengvist et.al., 2005), sehingga waktu penjalaran CME kedua ini sampai magnetosfer Bumi sejak meletus adalah sekitar 19,5 jam. Jika kecepatan CME dianggap linier pada 2029 km/s seharusnya waktu kedatangan CME adalah sekitar 20,5 jam. Perbedaan estimasi dan pengamatan tersebut menunjukkan bahwa kecepatan CME dari Matahari sampai magnetosfer Bumi tidak linier.

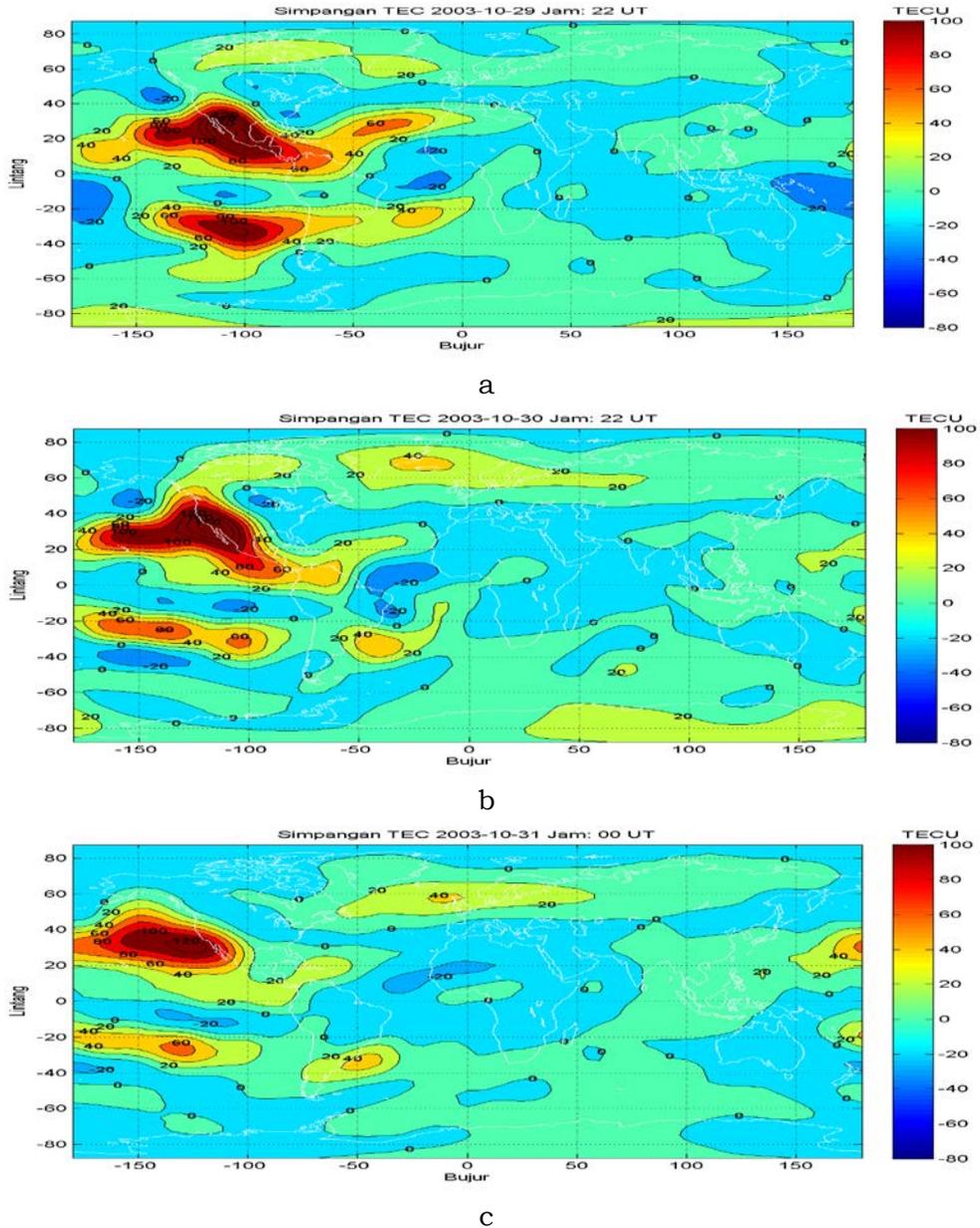
Kejadian CME pertama (28 Oktober 2003) menyebabkan badai geomagnet mulai pukul 06:11 UT pada tanggal 29 Oktober, kemudian diikuti badai ionosfer positif hampir dua jam kemudian dari awal badai geomagnet yang dideteksi pada pukul 08:00 UT dari peta TEC GIM sebagaimana terlihat pada Gambar 4-2.



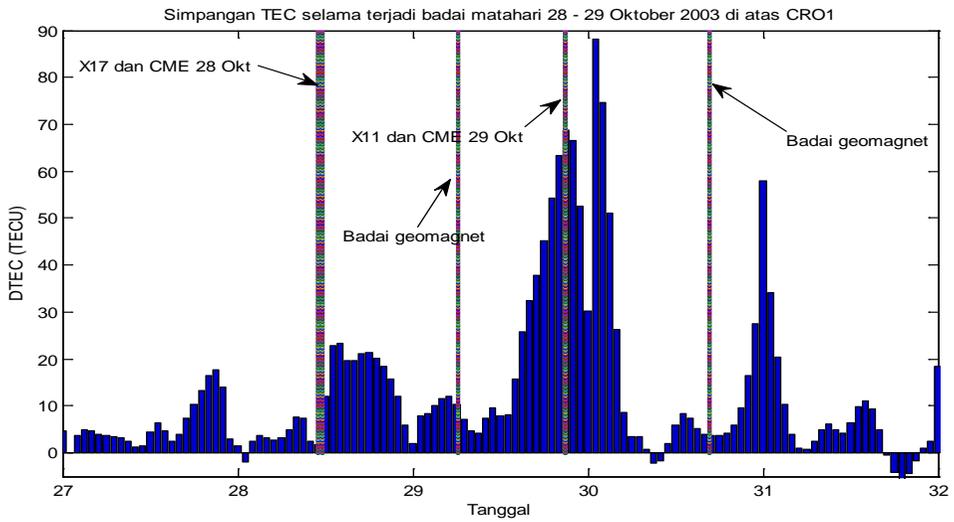
Gambar 4-2:Badai ionosfer positif mulai terlihat nyata pada pukul 08:00 UT tanggal 29 Oktober 2003. Badai ini disebabkan oleh CME tanggal 28 Oktober 2003 teramati secara penuh pada pukul 11:30 UT

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4-3, badai ionosfer terus berlanjut di daerah anomali ionisasi dengan peningkatan TEC bervariasi mulai tanggal 29 sampai 30 Oktober pada pukul 22:00 UT dan masih berlanjut sampai 31 Oktober pada pukul 00:00 UT. Peningkatan TEC di belahan Bumi utara lebih besar dari belahan Bumi selatan. Badai ionosfer terbesar terjadi di wilayah Amerika. Besarnya badai ionosfer di wilayah ini pada pukul 22:00 UT tanggal 29 Oktober merupakan kombinasi dampak CME 28 Oktober dan flare X11 29 Oktober 2003.

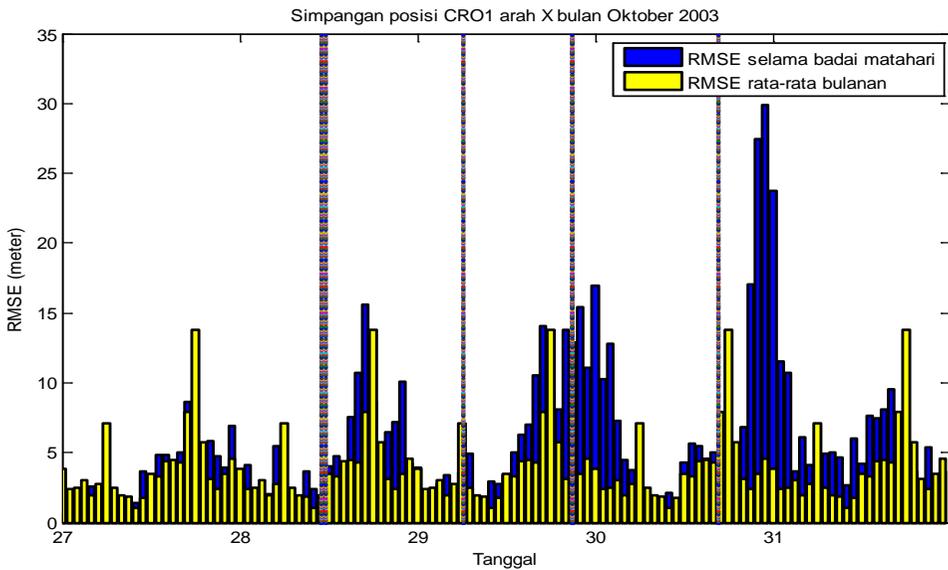
Nilai TEC hasil interpolasi TEC GIM di atas CRO1 pada lintang dan bujur (17,5°LU, 65°BB) dari tanggal 27-31 Oktober 2003 ditunjukkan pada Gambar 4-4a.



Gambar 4-3:Badai ionosfer positif yang terjadi pada tanggal 29 dan 30 Oktober 2003 pada pukul 22:00 UT paling intensif terjadi di sektor Amerika (a dan b) berada dalam rentang bujur -150° sampai -100°. Badai masih berlanjut sampai pukul 00:00 UT pada tanggal 31 Oktober 2003 (c)

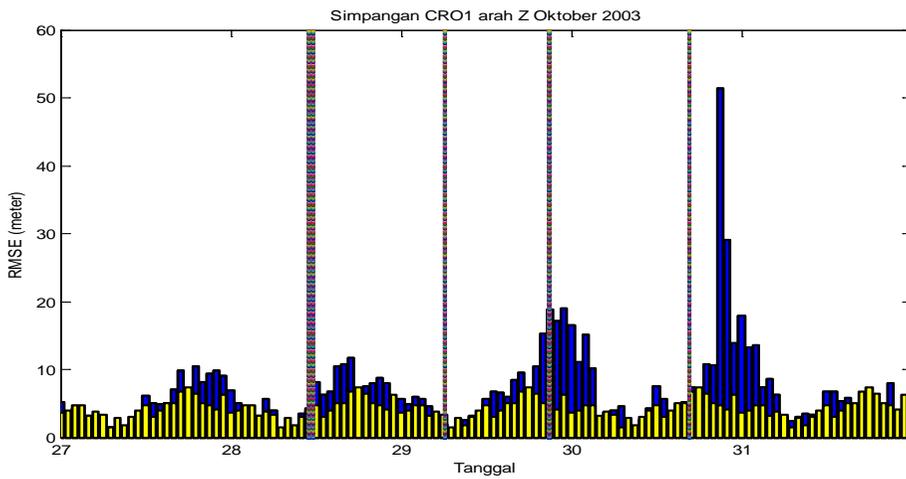
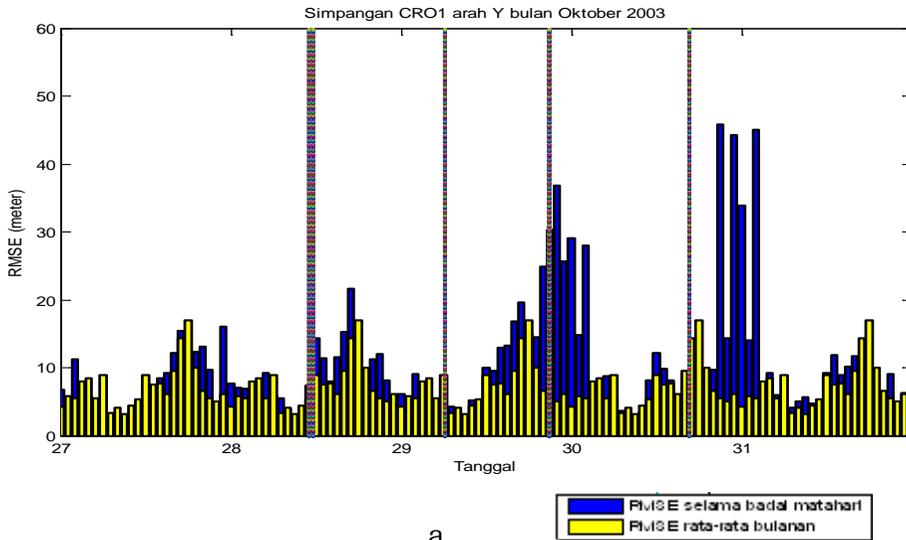


A



B

Gambar 4-4: Badai ionosfer tanggal 29 dan 30 Oktober yang disebabkan oleh CME tanggal 28 dan 29 Oktober 2003 di atas stasiun GPS CRO1 (a) dan simpangan posisi GPS CRO1 pada saat badai ionosfer dibandingkan dengan rata-rata simpangan posisi pada bulan Oktober 2003 (b)



Gambar 4-5: Nilai simpangan TEC ionosfer tanggal 27-31 Oktober 2003 memperlihatkan adanya pengaruh CME tanggal 28 Oktober 2003 pukul 11:10 dan 29 Oktober 2003 pukul 20:50 UT pada ionosfer berupa badai ionosfer di atas CRO1 (a) dan pengaruh badai ionosfer tersebut pada kesalahan penentuan posisi absolut di stasiun CRO1 (b)

Gambar 4-4a memperlihatkan bahwa dampak flare pada tanggal 28 Oktober 2003 yang sudah terdeteksi sekitar pukul 11:01 UT berupa peningkatan simpangan TEC (DTEC) segera setelah flare karena adanya peningkatan radiasi EUV. Peningkatan DTEC ini mencapai sekitar 20 TECU selama sekitar 10 jam. Kemudian dampak CME pertama pada ionosfer di atas CRO1 terjadi sekitar 27 jam kemudian yaitu sekitar pukul 14:00 UT tanggal 29 Oktober 2003 berupa badai ionosfer yang

meningkat secara bertahap mulai 18 TECU sampai mencapai puncak pertama sebesar 68 TECU (lebih dari tiga kali lipat dampak flare X-ray X17 sebesar 20 TECU) pada pukul 21:00 UT yaitu beberapa saat setelah flare X11, kemudian disusuli dengan puncak kedua badai ionosfer sebesar 88 TECU pada 30 Oktober pukul 01:00 UT.

Dampak CME Oktober kedua yaitu tanggal 29 Oktober pukul 20:50 UT adalah badai geomagnet pada tanggal 30 Oktober pukul 16:30 UT. Beberapa jam kemudian terjadi lagi badai ionosfer positif mulai pukul 21:00 UT (atau sekitar 4,5 jam kemudian) tetapi hanya dalam waktu singkat sampai 31 Oktober pukul 03:00 UT selama 6 jam.

Perbedaan dampak CME dan flare X-ray pada ionosfer pada saat tersebut adalah bahwa dampak CME mengakibatkan penyimpangan TEC dari nilai rata-rata tertunda sampai lebih dari 19 jam dengan simpangan yang jauh lebih besar dari simpangan TEC karena flare X-ray. Sedangkan dampak flare pada ionosfer tidak sebesar dampak CME tetapi hanya terjadi dalam selang waktu beberapa menit setelah meletusnya flare. Karena data TEC yang digunakan adalah data jam-an maka dampak flare teramati pada jam yang sama dengan jam saat kejadian flare.

#### **4.2 Dampak Badai Matahari pada Akurasi Posisi GPS**

Menggunakan persamaan (3-11) dan (3-12) dapat diperoleh posisi 3 dimensi arah X, Y dan Z dalam sistem koordinat *Earth Centered Earth Frame* (ECEF). Jika dibandingkan dengan koordinat presisi yang telah dihitung dengan GPS frekuensi ganda maka dapat diperoleh simpangannya dengan cara mengurangi posisi absolut dengan posisi presisi. Dari data simpangan posisi setiap 30 detik dapat dihitung *Root Mean Square Error* (RMSE) setiap jam. Dampak badai ionosfer ini pada posisi GPS arah X dari pusat Bumi ke lintang dan bujur (0,0) diperlihatkan pada Gambar 4-4b. Gambar tersebut diperoleh dengan cara mengurangi RMSE setiap jam dari rata-rata RMSE bulanan pada jam tertentu. Sehingga dapat dibandingkan dengan simpangan TEC (DTEC) dari nilai TEC bulanan. Peningkatan DTEC saat badai ionosfer dari TEC bulanan jam tertentu kemudian dapat dihubungkan dengan peningkatan RMSE (DRMSE) dari nilai bulanan pada jam tertentu.

Dari Gambar 4-4b diketahui bahwa dampak flare X17 yang terjadi pada tanggal 28 Oktober 2003 pada akurasi posisi adalah berupa peningkatan kesalahan posisi arah X mulai pukul 15:00 UT sampai 17:00 UT pada saat DRMSE mencapai sekitar 16 meter. Jika dibandingkan dengan DRMSE pada kondisi tenang yang nilainya sekitar 8 meter maka dampak flare X17 tersebut adalah berupa penurunan akurasi posisi sampai 200%. Penurunan akurasi ini tidak

terjadi segera setelah flare tetapi tertunda dua jam setelah meletusnya flare.

Jika dibandingkan dengan peningkatan TEC hanya sekitar 20 TECU setara dengan 3,2 meter maka peningkatan kesalahan posisi sampai 8 meter menunjukkan bahwa peningkatan TEC arah vertikal berpengaruh pada penurunan akurasi GPS lebih besar. Hal ini disebabkan karena dalam penentuan posisi, pengaruh TEC pada pengukuran jarak satelit GPS adalah dalam arah sepanjang lintasan dari satelit ke *receiver* GPS. Di samping itu tidak hanya dari satu pengamatan satelit GPS tetapi minimal 4 pengamatan jarak satelit GPS yang mungkin sinyal satelit GPS lainnya melewati ionosfer mengalami badai ionosfer lebih besar dari 20 TECU.

Dampak CME pada tanggal 28 Oktober pada ionosfer dalam bentuk badai ionosfer seperti ditunjukkan pada Gambar 4-4a dapat menyebabkan penurunan akurasi posisi GPS arah X dalam bentuk peningkatan kesalahan posisi seperti dapat dilihat pada Gambar 4-4b. Peningkatan DTEC sampai 32 TECU tanggal 30 Oktober pada pukul 00:00 UT setara dengan 5,2 meter telah menyebabkan peningkatan kesalahan sebesar 14 meter (dari kesalahan RMSE 4 meter menjadi 18 meter) atau terjadi penurunan akurasi sebesar 450% seperti ditunjukkan pada Gambar 4-4b.

Dampak CME pada tanggal 29 Oktober pada akurasi posisi GPS arah X mencapai puncak pada tanggal 31 Oktober tepatnya pada pukul 00:00 UT. Pada saat itu RMSE meningkat dari 4 meter menjadi 24 meter (berarti terjadi penurunan akurasi posisi sampai 600 %) atau terjadi peningkatan kesalahan sebesar 20 meter. Peningkatan DTEC pada saat tersebut sekitar 54 TECU setara dengan 8,8 meter. Ini menunjukkan bahwa TEC vertikal di atas pengguna (*receiver*) mempengaruhi akurasi posisi dengan tidak linier dan ada pengaruh lain dari lingkungan ionosfer di lokasi lain yang dilewati sinyal GPS berkontribusi pada akurasi posisi absolut GPS. Hal ini disebabkan oleh karena dalam penentuan posisi GPS diperlukan minimal 4 satelit GPS dapat diamati dimana posisi satelit-satelit tersebut tidak tepat berada di atas CRO1 melainkan pada koordinat yang mana lintasan sinyal GPS melewati tidak tepat di atas CRO1.

Adapun dampak badai ionosfer pada akurasi posisi absolut GPS frekuensi tunggal arah X, Y dan Z yang terbesar ditunjukkan pada Tabel 4-1.

Tabel 4-1: DAMPAK IONOSFER SAAT BADAI MATAHARI PADA AKURASI POSISI GPS CRO1

Tanggal (Oktober 2003)	Pukul (UT)	Penurunan akurasi arah X (%)	Penurunan akurasi arah Y (%)	Penurunan akurasi arah Z (%)	Besar badai ionosfer (TECU)	Penyebab
28	17:00	200 (16/8)	157 (22/14)	127 (12/7)	20 (3.2 m)	Flare X17
30	00:00	450 (18/4)	725 (29/4)	400 (16/4)	32 (5.2 m)	CME 28 dan X11
31	00:00	600 (24/4)	850 (34/4)	450 (18/4)	58 (9.4 m)	CME 29

Tabel 4-1 memperlihatkan bahwa pengaruh ionosfer pada saat badai Matahari pada akurasi posisi absolut GPS frekuensi tunggal adalah berupa penurunan akurasi posisi arah X sebesar 200% yang disebabkan oleh flare X17 dan penurunan akurasi posisi arah X lebih dari 400% karena CME. Badai Matahari jenis CME telah menyebabkan badai ionosfer sehingga menurunkan akurasi posisi di CRO1 terbesar dalam arah Y. Hal ini disebabkan karena proyeksi TEC ke arah Y adalah yang terbesar dibandingkan dengan proyeksi TEC ke arah X dan Z mengingat posisi CRO1 pada bujur 64,6 BB sehingga lebih dekat ke sumbu Y.

#### 4.3 Korelasi Simpangan TEC Setelah Badai Matahari dengan Penurunan Akurasi Posisi

Korelasi peningkatan simpangan TEC (diindikasikan dengan deviasi TEC DTEC) dengan penurunan akurasi posisi (diindikasikan dengan peningkatan kesalahan posisi DRMSE) ditunjukkan pada Tabel 4-2. Tabel tersebut memperlihatkan bahwa peningkatan simpangan TEC dan penurunan akurasi posisi GPS memiliki korelasi sekitar 0,6. Ini berarti akurasi posisi GPS absolut tidak semata-mata dipengaruhi oleh TEC GPS walaupun pengaruh ionosfer adalah paling dominan, diindikasikan dengan korelasi lebih dari 0,6.

Pengaruh lain bisa bersumber dari geometri satelit yang tergantung pada jumlah pengamatan satelit GPS dan distribusi satelit GPS dipandang dari *receiver*. Badai ionosfer dapat menyebabkan iregularitas ionosfer seperti *spread F* yang dapat menurunkan kualitas sinyal GPS. Jika *spread F* besar maka penurunan intensitas sinyal GPS bisa menyebabkan tidak teramatinya beberapa satelit GPS, berakibat pada turunnya kekuatan geometri satelit yang memberi pengaruh pada hasil akhir akurasi posisi GPS.

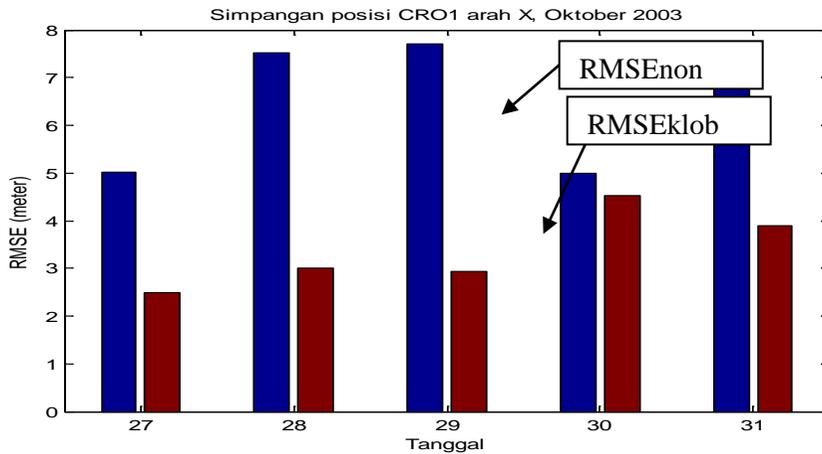
Tabel 4-2: KORELASI PENINGKATAN TEC (DTEC) DENGAN PENINGKATAN KESALAHAN POSISI GPS (DRMSE)

<b>Korelasi</b>	<b>Koefisien korelasi</b>
DTEC vs DRMSE X	0,61
DTEC vs DRMSE Y	0.65
DTEC vs DRMSE Z	0.61

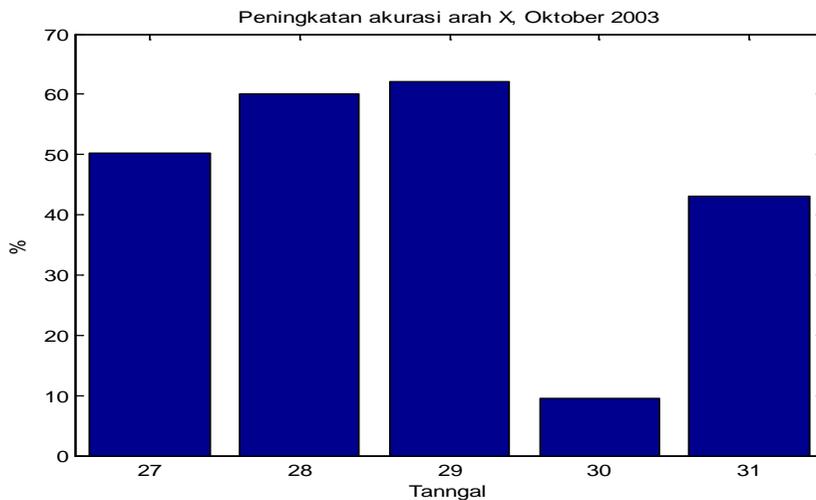
#### **4.4 Mitigasi Dampak Ionosfer pada Penurunan Akurasi Posisi Setelah Badai Matahari**

Pengaruh ionosfer pada saat terjadi badai Matahari dapat dimitigasi dengan model Klobuchar. Gambar 4-6a menunjukkan perbedaan simpangan posisi CRO1 arah X pada tanggal 27–31 Oktober 2003 tanpa koreksi model Klobuchar (RMSE<sub>non</sub>) dan dengan koreksi model Klobuchar (RMSE<sub>klob</sub>). Gambar 4-6b menunjukkan peningkatan akurasi arah X sebagaimana dihitung dengan persamaan (3-13). Peningkatan akurasi dihitung dari selisih antara RMSE<sub>non</sub> (sebelum koreksi Klobuchar) dengan setelah koreksi Klobuchar (RMSE<sub>klob</sub>) dibagi dengan RMSE<sub>non</sub> yaitu simpangan sebelum koreksi Klobuchar dikalikan dengan 100%. Peningkatan akurasi didefinisikan sebagai prosentasi penurunan simpangan posisi CRO1 dengan koreksi Klobuchar terhadap simpangan sebelum koreksi Klobuchar. Jika simpangan posisi setelah koreksi Klobuchar nilainya sama dengan atau lebih besar dari simpangan tanpa koreksi Klobuchar maka peningkatan akurasi adalah 0 %.

Dapat dilihat dari Gambar 4-6b bahwa setelah terjadi badai ionosfer peningkatan akurasi posisi absolut GPS arah X cenderung menurun dari sekitar 50% - 60% menjadi sekitar 9% pada tanggal 30 Oktober dan sekitar 43% pada tanggal 31 Oktober 2003. Peningkatan akurasi 9% ini sangat kecil dibandingkan peningkatan akurasi model Klobuchar pada kondisi tenang tanggal 27 Oktober 2003 sebesar 50% yaitu kurang dari seperlimanya.



A

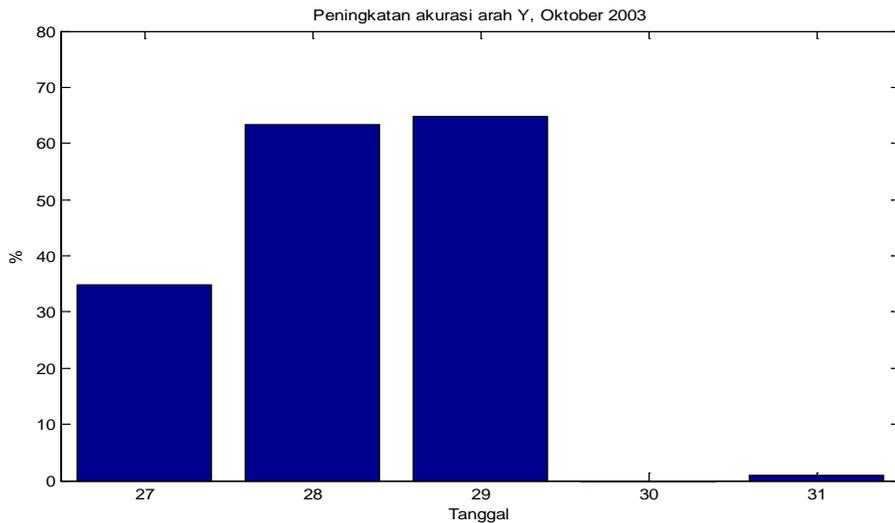


B

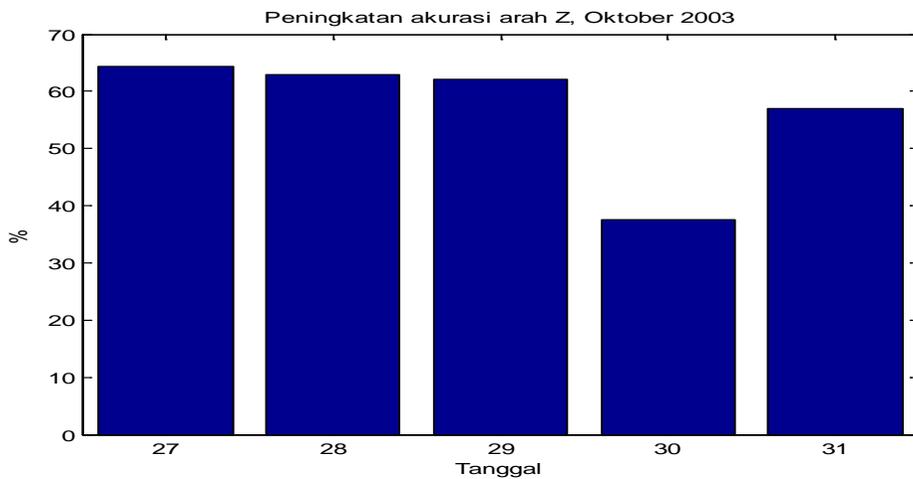
Gambar 4-6: Pebandingan simpangan posisi absolut GPS frekuensi tunggal untuk stasiun CRO1 tanpa koreksi ionosfer model Klobuchar (biru) dan dengan koreksi Klobuchar (coklat) [a], dan peningkatan akurasi posisi setelah diterapkan koreksi ionosfer model Klobuchar [b]

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4-7a untuk arah Y peningkatan akurasi posisi setelah mitigasi dampak ionosfer dengan model Klobuchar adalah 0% (tidak ada peningkatan akurasi) pada tanggal 30 Oktober dan 1% pada tanggal 31 Oktober 2003. Peningkatan akurasi ini sangat kecil dibandingkan peningkatan akurasi saat kondisi ionosfer tenang pada tanggal 27 Oktober 2003 adalah sekitar 35%. Untuk arah Z (Gambar 4-7b) peningkatan akurasi posisi tanggal 30 dan 31 Oktober 2003 masing masing adalah sekitar 38% dan 58%. Pada

kondisi normal tanggal 27 Oktober peningkatan akurasi posisi model Klobuchar adalah sekitar 64 %.



A



B

Gambar 4-7: Peningkatan akurasi posisi GPS koordinat Y dalam % (a) dan arah Z dalam % (b) stasiun CRO1 yang dihitung dengan koreksi ionosfer model Klobuchar

Dengan demikian pada saat terjadi badai Matahari berupa CME yang mengarah ke Bumi dan menyebabkan badai ionosfer dapat menyebabkan tidak efektifnya mitigasi dampak ionosfer pada penentuan posisi absolut. Dengan demikian pada saat badai ionosfer yang disebabkan oleh CME diperlukan model TEC regional untuk mereduksi kesalahan pengukuran posisi absolut dengan GPS frekuensi tunggal. Tetapi walaupun terjadi flare kelas X17 mitigasi dampak

ionosfer pada akurasi posisi dengan model Klobuchar cukup efektif karena dapat mereduksi pengaruh ionosfer yang hampir sama dengan kondisi tanpa badai Matahari jenis X-ray.

## 5 KESIMPULAN

Badai Matahari berupa flare kelas X17 pada tanggal 28 dan kelas X11 pada tanggal 29 Oktober 2003, masing-masing disertai CME telah menyebabkan badai ionosfer secara global. Dari TEC GIM diketahui bahwa flare X17 telah menyebabkan peningkatan simpangan TEC (DTEC) segera setelah meletusnya flare sebesar 20 TECU selama beberapa jam di atas stasiun CRO1. Sedangkan CME tanggal 28 Oktober telah menyebabkan badai ionosfer di atas CRO1 berupa peningkatan DTEC yang mulai terdeteksi setelah 27 jam sejak meletusnya CME, mencapai maksimum sebesar 88 TECU pada 30 Oktober pada pukul 01:00 UT. Dampak CME tanggal 29 Oktober pada ionosfer adalah badai ionosfer yang mencapai puncak sebesar 58 TECU pada 31 Oktober 2003 pukul 00:00 UT.

Pengaruh badai ionosfer yang disebabkan flare kelas X17 tanggal 28 Oktober 2003 pada akurasi posisi absolut GPS dengan frekuensi tunggal berupa penurunan akurasi posisi sampai 200%. Sedangkan badai ionosfer yang disebabkan oleh CME 28 dan 29 Oktober 2003 telah menyebabkan penurunan akurasi posisi mencapai lebih dari 400%. Berdasarkan analisis korelasi diketahui bahwa pengaruh ionosfer pada saat badai Matahari hanya memberikan kontribusi pada penurunan akurasi posisi GPS sekitar 60%.

Mitigasi efek ionosfer saat badai menggunakan model Klobuchar tidak dapat mereduksi dampak badai ionosfer yang disebabkan oleh CME secara signifikan sehingga model ionosfer regional dibutuhkan untuk peningkatan akurasi posisi GPS pada saat tersebut.

## DAFTAR RUJUKAN

- El-Rabbany, A., 2001. *“Introduction to GPS: The Global Positioning System”*, Artech House Publishers, Boston, USA.
- Mandrini, C.H., Demoulin, P., Schmieder, B., Deluca, E., Pariat E., Uddin W., 2006. *Comparison Event and Precursor of the X17 flare on 28 October 2003*, Solar Physics 238:293–312 DOI:10.1007/s11207-006-0205-3.
- McCarthy, D.D. and Petit, G. (editors), 2004. IERS Conventions (2003), Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, *IERS Technical Note No.32*.
- McKessock, G., 2007. *A Comparison of Local and Wide Area GNSS Differential Corrections Disseminated using the Network Transport*

- of RTCM via Internet Protocol (NTRIP), Senior Technical Report, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 249, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada.
- Plunkett, S.P., 2005. *The Extreme Solar Storms of October to November 2003*, NRL Reviews, OMB., 0704-0188.
- Pohjolainen, S., van Driel-Gesztelyi, L., Culhane, J.L., Manoharan, P.K., and Elliott, H.A., 2007. *CME Propagation Characteristics from Radio Observations*, Solar Physics (Topical Issue), Vol. 244, p. 167-188.
- Rao, N.V., Madhu, T., dan Kishore, K. Lal., 2010. *Geomagnetic Storm Effects on GPS Aided Navigation over Low Latitude South Indian Region*, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.10 No.3, March 2010.
- Rosenqvist, L., Opgenoorth, H., Buchert, S., McCrea, I., Amm, O., dan Lathuillere, C., 2005. *Extreme Solar-terrestrial Events of October 2003: High-latitude and Cluster Observations of the Large Geomagnetic Disturbances on 30 October*, Journal of Geophysical Research, VOL.101, doi:10.1029/2004JA010927.
- Saastamoinen, J., 1972. *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.
- SamSvl, 1997. *Calculate the Receiver Position from Corrected Pseudoranges and Satellite Positions*, <http://home.tiscali.nl/samsvl/software.htm> diakses tanggal 20 Desember 2010.
- SamSvl, 2000. *Some Theory on Raw Data, Single Differences and Double Differences*, <http://home.tiscali.nl/samsvl/index.htm> diakses tanggal 20 Desember 2010.
- SOHO LASCO CME Catalog, 2003. [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/) diakses 22 Agustus 2011.
- Tsurutani. B.T., Guarnieri, F.L., Fuller-Rowell, T., Mannucci, A.J., Iijima, B., Gonzalez, W.D., Judge, D.L., Gangopadhyay, P., Saito, A., Tsuda, T., Verkhoglyadova, O.P., dan Zambon, G.A., 2006. *Extreme Solar EUV Flares and ICMEs and Resultant Extreme Ionospheric Effects: Comparison of the Halloween 2003 and the Bastille Day Events*, Radio Science, VOL. 41, RS5S07, doi: 10.1029/2005RS003331,2006