

**DETEKSI EFEK FLARE SINAR-X PADA IONOSFER DARI DATA
TOTAL ELECTRON CONTENT YANG DITURUNKAN DARI
PENGAMATAN GPS
(DETECTION X-RAY FLARE EFFECT ON IONOSPHERE FROM
TOTAL ELECTRON CONTENT DATA DERIVED FROM
GPS OBSERVATION)**

Buldan Muslim

Peneliti Bidang Ionosfer dan Telekomunikasi, Pusat Sains Antariksa, Lapan

e-mail: mbuldan@gmail.com

ABSTRACT

X-ray flares can increase the density of the ionospheric D layer. The increasing of the ionospheric D layer density enhance HF radio wave energy absorption that may blackout HF radio communication. Hence the information of x-ray flare effect on ionosphere are important for mitigation of x ray flare effect on HF radio communication. To support the information services of radio communication disturbances, a detection method of x-ray flare effect on ionosphere has been developed from Global Positioning System (GPS) observations network. The number of the phase of the carrier wave signal received by the GPS stations can be used to estimate the ionospheric TEC (GPS TEC) precisely so that an increase in the density of the ionosphere that occur during X-ray flares can be detected. The method developed has been used to detect ionospheric disturbance occurrences caused by largest x-ray flares during solar cycle 23, on October 28, 2003 and the largest X-ray flare during solar cycle 24 on 8 November 2013. The x-ray flare effect on ionospheric detected by using GPS TEC data on two such cases in accordance with the time of occurrence of the X-ray flare observed from the GOES satellites.

Keywords: *Flare, X-ray, GPS, Ionosphere, Total electron content*

ABSTRAK

Flare sinar-x dapat meningkatkan kerapatan lapisan D ionosfer. Peningkatan kerapatan lapisan ionosfer tersebut dapat menyebabkan peningkatan serapan energi gelombang radio HF sehingga dapat terjadi *HF radio blackout* pada saat terjadi *flare* sinar-x. Oleh karena itu informasi efek *flare* sinar-x pada ionosfer penting diketahui untuk mitigasi efek *flare* sinar-x pada komunikasi radio HF. Untuk mendukung layanan informasi gangguan komunikasi radio tersebut, telah dikembangkan metode deteksi efek *flare* sinar-x pada ionosfer dari jaringan pengamatan sinyal *Global Positioning System* (GPS). Data GPS berupa jumlah fase gelombang pembawa sinyal yang diterima stasiun GPS dapat digunakan untuk estimasi *total electron content* ionosfer (TEC GPS) secara tepat sehingga peningkatan kerapatan ionosfer yang terjadi selama *flare* sinar-x dapat dideteksi. Dari data TEC GPS yang diturunkan dari data jaringan stasiun *International Global Navigation Satellite System* (IGS), telah dapat dideteksi anomali ionosfer yang disebabkan *flare* sinar-x terbesar pada siklus matahari 23 yang terjadi pada 28 Oktober 2003 dan *flare* sinar-x terbesar siklus 24 pada tahun 2013 yaitu tanggal 8 Nopember 2013. Waktu terdeteksinya efek *flare* sinar-x tersebut dari data TEC GPS pada dua kasus tersebut sesuai dengan waktu kejadian *flare* sinar-x yang teramati dari satelit GOES.

Kata kunci: *Flare, Sinar x, GPS, Ionosfer, Total electron content*

1 PENDAHULUAN

Ionosfer terdiri dari beberapa lapisan dengan komposisi ion dan proses pembentukan yang berbeda-beda, yaitu lapisan C, lapisan D, lapisan E, dan lapisan F. Lapisan D ionosfer memiliki karakteristik menyerap gelombang radio HF yang menjalar melaluinya. Lapisan D ionosfer merupakan lapisan ionosfer bagian bawah dan merupakan peralihan dari atmosfer netral dan terionisasi. Lapisan ini terletak pada ketinggian antara 60 – 90 km. Sumber ionisasi lapisan ini adalah radiasi matahari dalam spektrum Lyman-alpha Hidrogen (H) terutama pada saat aktivitas matahari sedang dan rendah, dan sinar-x terutama pada saat aktivitas matahari tinggi (Bowman et al., 2008). Radiasi Lyman-alpha H mengionisasi molekul NO, sedangkan sinar-x mengionisasi molekul N₂ dan O₂ (Opperman, 2007). Untuk daerah lintang tinggi radiasi partikel bermuatan dari matahari selama *Coronal Mass Ejection* (CME) juga merupakan sumber ionisasi yang signifikan. Adapun sinar kosmik merupakan sumber energi ionisasi lapisan di bawah lapisan D yang dikenal dengan lapisan C untuk membedakan lapisan ionosfer bawah yang dibentuk oleh radiasi matahari dengan yang dibentuk oleh radiasi sinar kosmik (Goodman, 2005).

Pada lapisan D ionosfer, frekuensi tumbukan antara partikel netral dan terionisasi tinggi, sehingga lapisan D ionosfer menyerap gelombang radio HF. Serapan total ionosfer lapisan D terjadi pada propagasi gelombang radio dengan frekuensi tertentu yang dapat diamati dengan ionosonda, yang diindikasikan dengan parameter frekuensi minimum ionosfer (*fmin*). Dengan meningkatnya serapan gelombang radio HF yang disebabkan oleh peningkatan kerapatan lapisan D ionosfer selama *flare* sinar x, frekuensi HF yang pada kondisi normal dapat digunakan untuk komunikasi HF bisa mengalami serapan lebih tinggi

sehingga dapat digunakan. Kejadian ini dikenal dengan *radio blackout*. Untuk meningkatkan layanan LAPAN tentang informasi gangguan komunikasi radio HF tersebut pada masyarakat diperlukan informasi pengaruh *flare* sinar-x pada ionosfer.

Penelitian pengaruh *flare* sinar-x tahun 2011 dengan menggunakan 10 data kejadian *flare* sinar-x, diperoleh bahwa peningkatan kerapatan elektron ionosfer tidak hanya terjadi di lapisan D ionosfer tetapi juga di lapisan F ionosfer (Tripathi et al., 2011). Peningkatan kerapatan ionosfer baik di lapisan D maupun lapisan F, secara keseluruhan meningkatkan *Total Electron Content* (TEC) pada lapisan D dan F yang dapat diestimasi dari data GPS (TEC GPS) yang mengukur jumlah elektron total mulai dari lapisan D sampai lapisan F bahkan sampai plasmafer (di atas lapisan F). Oleh karena itu data TEC GPS berpotensi dapat digunakan untuk deteksi efek *flare* sinar X pada lapisan ionosfer. Makalah ini menjelaskan pengembangan metode deteksi efek *flare* sinar X pada ionosfer dari data GPS untuk dua kejadian *flare* sinar X terbesar pada siklus 23 yaitu tanggal 28 Oktober 2003 dan selama siklus 24 tahun 2013 yaitu pada 8 Nopember 2013.

2 DATA DAN METODOLOGI

Data pengamatan GPS dari 6 stasiun *International Global Navigation Satellite System Services* (IGS) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2-1 telah digunakan untuk deteksi anomali ionosfer yang disebabkan oleh *flare* sinar-x. Untuk kasus *flare* sinar-x 28 Oktober 2003 telah digunakan data GPS dari pengamatan sinyal GPS yang dipancarkan oleh beberapa satelit GPS yang teramati di stasiun IGS BAKO. BAKO adalah kode identifikasi stasiun IGS yang terletak di Cibinong dan dioperasikan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG). Kode identifikasi

stasiun IGS terdiri dari empat huruf yang unik. Misalnya NTUS adalah kode stasiun GPS yang terletak di Nanyang Technology University Singapore. Status kode stasiun IGS sampai saat ini bisa diperoleh dari <http://igsceb.jpl.nasa.gov/network/list.html>. Adapun untuk kasus flare sinar-x pada 8 Nopember 2013 telah digunakan data pengamatan sinyal GPS yang dipancarkan dari satelit dengan *pseudorange code number* (PRN) 4 yang diamati dari 5 stasiun IGS yaitu NTUS, PIMO, PTAG, TNML dan CUSV.

Data GPS yang digunakan dalam penelitian ini adalah data fase yaitu jumlah siklus gelombang radio yang diterima *receiver* pada frekuensi L1 dan L2. Huruf L menunjukkan band L karena frekuensi yang digunakan oleh GPS berada dalam band L. Ada dua frekuensi sinyal GPS yang dapat diterima oleh stasiun IGS yaitu frekuensi 1.575,42 MHz (dikenal dengan frekuensi L1) dan frekuensi 1.227,60 MHz (dikenal dengan frekuensi L2). Jarak fase satelit ke *receiver* GPS dapat diperoleh dari data jumlah siklus yang teramati pada gelombang pembawa L1 dan L2 menggunakan persamaan

$$\Phi_{1,2} = \lambda_1 L_1 - \lambda_2 L_2 \quad (2-1)$$

Pada persamaan (2-1), λ_1 dan λ_2 masing-masing adalah panjang gelombang pada frekuensi L1 dan L2, L1 adalah pengamatan jumlah siklus yang diterima *receiver* pada frekuensi pertama (1.575,42 MHz), dan L2 adalah jumlah siklus yang teramati pada frekuensi L2 (1.227,60 MHz). Nilai TEC

dari data jarak fase GPS dapat diestimasi dengan

$$STEC_L = \frac{f_1^2 [(\lambda_1 \Phi_1 - \lambda_2 \Phi_2) - (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) - b_L - B_L]}{40,3(1-\gamma)} \quad (2-2)$$

Differential STEC_L (DSTEC_L) dapat diperoleh dari pengurangan data *STEC_L*(*t*) dengan *STEC_L*(*t*-1) sehingga dapat diperoleh DSTEC_L yang dapat disusun kembali menjadi

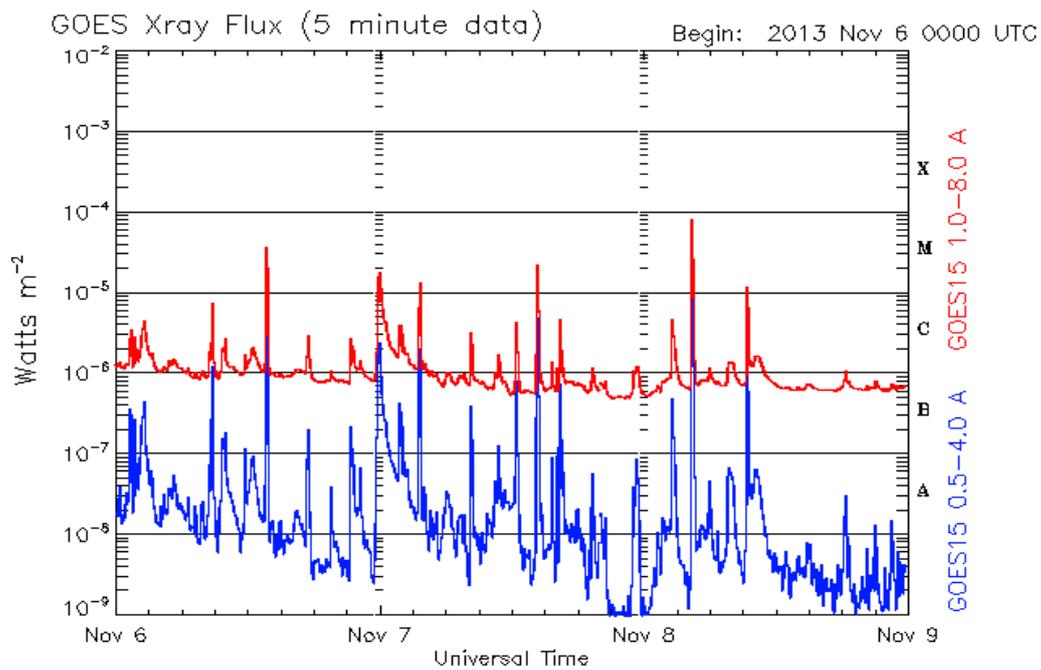
$$DSTEC_{L(t)} = \frac{f_1^2 [(\lambda_1 \Phi_1(t) - \lambda_2 \Phi_2(t)) - (\lambda_1 \Phi_1(t-1) - \lambda_2 \Phi_2(t-1))]}{40,3(1-\gamma)} \quad (2-3)$$

Pada persamaan (2-3) bias *receiver* (*b_L*), bias satelit (*B_L*), dan jumlah siklus ambiguitas (*N*) telah dapat dieliminir. Oleh karena itu data DSTEC_L telah siap digunakan untuk deteksi anomali ionosfer yang disebabkan oleh flare sinar-x tanggal 8 Nopember 2013 yang grafiknya ditunjukkan pada Gambar 2-1 (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov>, 2014).

Sumbu x Gambar 2-1 menunjukkan waktu pengamatan dengan skala terkecil 3 jam. Adapun sumbu y sebelah kiri menunjukkan intensitas sinar-x yang diamati dari satelit GOES 15 dan kesetaraannya dalam kelas A, B, C, M dan X ditunjukkan pada sumbu y sebelah kanan. Dari Gambar 2-1 tersebut dapat diketahui bahwa flare sinar x terbesar pada tanggal 8 Nopember 2013 teramati dari satelit GOES 15 terjadi mulai pukul 04:20 UT yang mencapai puncak pada pukul 04:26 UT dengan intensitas melebihi 10⁻⁵ watts/m² dan berakhir pada 04:29 UT (<ftp://ftp.ngdc.noaa.gov>, 2014).

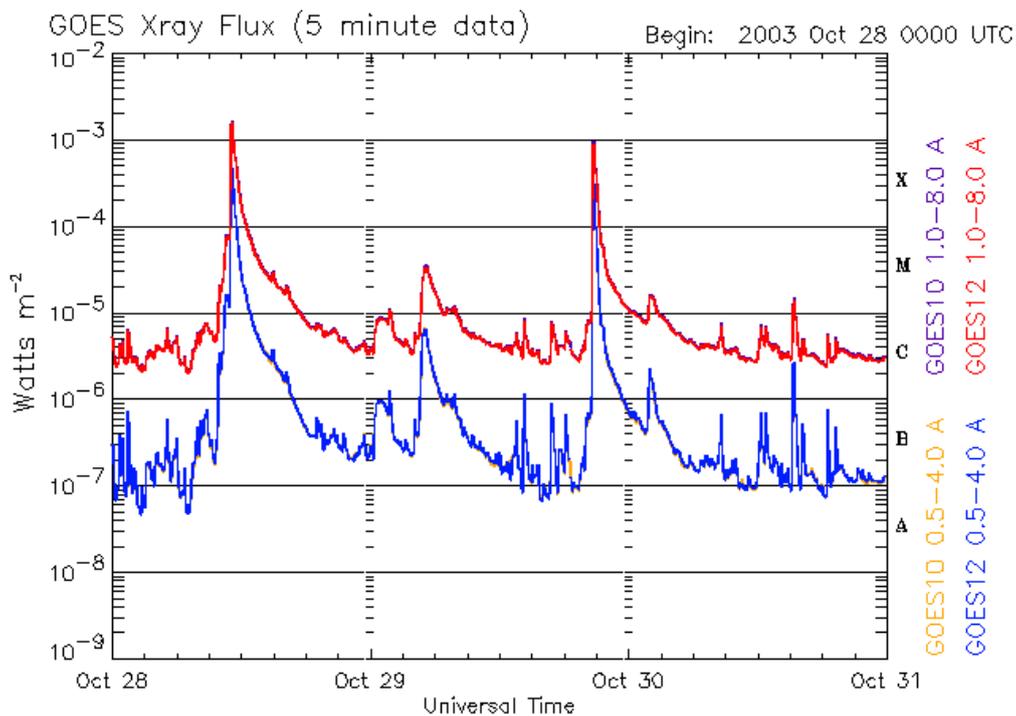
Tabel 2-1: KOORDINAT STASIUN IGS YANG DIGUNAKAN UNTUK DETEKSI EFEK FLARE SINAR-X

No.	Kode stasiun	Lintang (derajat)	Bujur (derajat)
1.	BAKO	-6.49	106.85
2.	NTUS	1.35	103.68
3.	PIMO	14.64	121.08
4.	CUSV	13.74	100.54
5.	TNML	24.80	120.99
6.	PTAG	14.54	121.04



Updated 2013 Nov 8 23:55:11 UTC NOAA/SWPC Boulder, CO USA

Gambar 2-1: Pengamatan sinar-x dari satelit GOES (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov>, 2014)



Updated 2003 Oct 30 23:56:05 UTC NOAA/SEC Boulder, CO USA

Gambar 2-2: Pengamatan X-ray dari satelit GOES 12 28 Oktober 2003 (<tp://ftp.swpc.noaa.gov>, 17 Juli 2014)

Pada Gambar 2-2 sumbu x menunjukkan waktu pengamatan dengan skala terkecil 3 jam, sumbu y sebelah kiri menunjukkan intensitas sinar x yang diradiasikan oleh matahari dan diamati dari satelit GOES 15

bervariasi dalam orde sekitar 10^{-8} sampai 10^{-2} watts/ m^2 , sumbu y sebelah kanan menunjukkan pengelompokkan besar sinar x berdasarkan intensitas sinar x menjadi kelas A, B, C, M dan X. Dari Gambar 2-2 diketahui bahwa *flare*

sinar x terbesar terjadi pada 28 Oktober 2003 sekitar pukul 11:00 UT. Kejadian flare sinar-x pada 28 Oktober 2003 mulai pukul 09:51 UT, mencapai maksimum pukul 11:10 UT dan berakhir pada 11:24 UT dari data pengamatan satelit GOES 15 (<ftp://ftp.ngdc.noaa.gov>, 2014).

Analisis spektrum $DSSTEC_L$ dapat dilakukan untuk memperjelas pengaruh flare sinar-x pada intensitas fluktuasi ionosfer dalam skala periode puluhan menit yang biasa muncul di ionosfer. Jika terjadi flare sinar-x, amplitudo fluktuasi dalam orde tersebut dapat meningkat tajam.

Indikasi lain terjadinya flare sinar-x adalah adanya kenaikan $DSSTEC_L$ dalam waktu yang simultan walaupun diamati dari stasiun GPS yang berbeda lokasinya. Kenaikan yang simultan ini menunjukkan bahwa anomali ionosfer tersebut bersifat global yang disebabkan oleh satu sumber yaitu dari flare sinar-x.

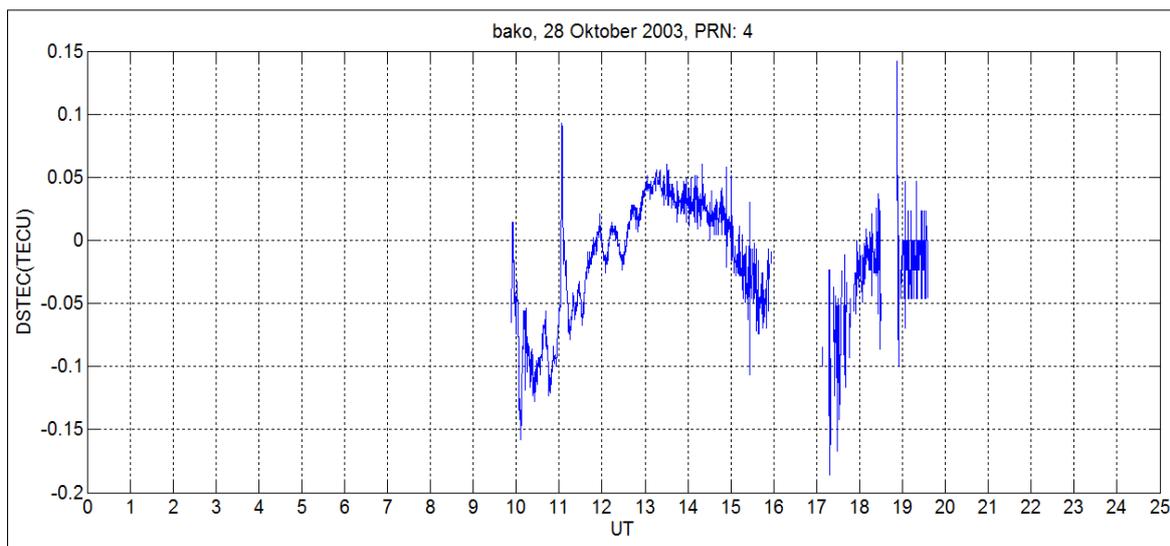
Untuk mengetahui bahwa kejadian anomali berupa kenaikan mendadak $DSSTEC_L$ adalah simultan dapat dilakukan dengan dua cara. Yang pertama menggunakan satu stasiun GPS untuk mengamati TEC dari beberapa satelit GPS secara simultan. Cara kedua dengan mengamati TEC dari satu satelit

GPS dari beberapa stasiun GPS secara simultan. Cara pertama diterapkan untuk kasus flare sinar-x 28 Oktober 2003 dan cara kedua diterapkan untuk flare sinar-x 8 Nopember 2013.

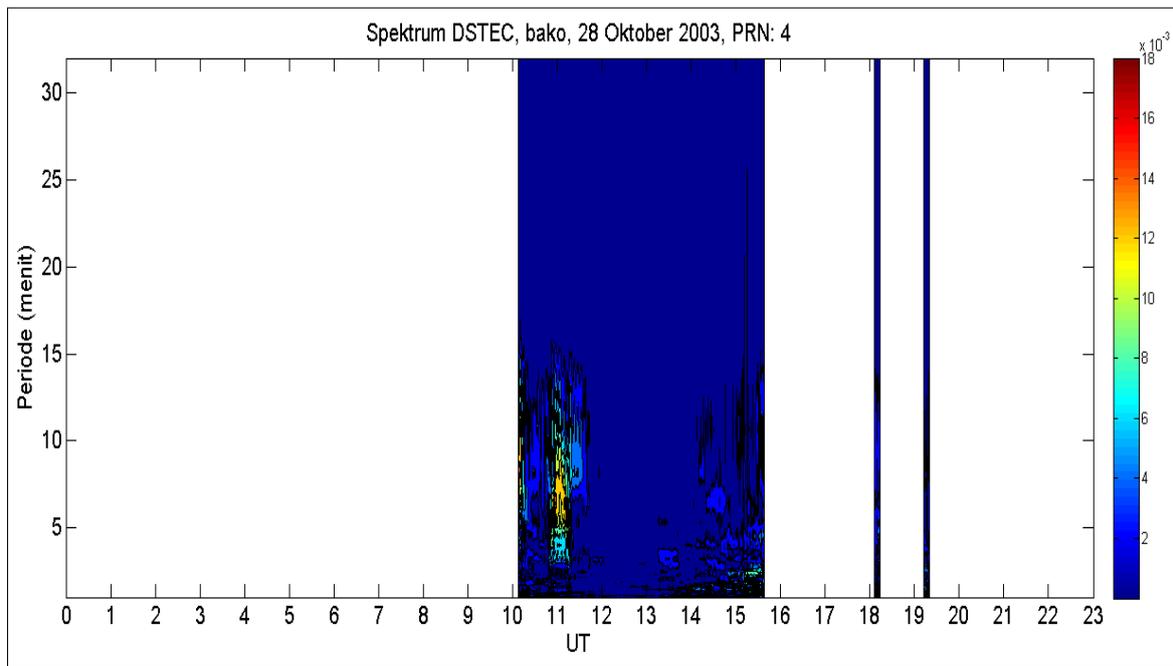
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Deteksi Efek Flare Sinar-X dengan Satu Stasiun GPS BAKO

Pada Gambar 3-1 (a) ditunjukkan $DSSTEC_L$ dari satelit GPS dengan *PseudoRange Number* (PRN) 4 yang diamati di stasiun BAKO pada 28 Oktober 2003. Telah terjadi peningkatan tajam $DSSTEC_L$ sekitar 0,2 TECU yaitu mulai -0,1 TECU sampai 0,1 TECU. Nilai maksimum peningkatan $DSSTEC_L$ terjadi pada pukul 11:03:30 UT. Gambar 3-1 (b) menunjukkan peningkatan amplitudo spektrum *Sliding Fast Fourier Transform* (SFFT) data $DSSTEC_L$ yang terjadi di sekitar pukul 11:00 UT. Spektrum SFFT dibuat dari 30 menit pengamatan TEC GPS mulai -15 menit sebelum dan +15 sesudah waktu pengamatan pada waktu t. Sehingga waktu kenaikan spektrum SFFT pada pukul 11:00 UT telah diamati karena pada waktu tersebut SFFT adalah untuk data mulai pukul 10:45 UT sampai 11:14 UT yang mencakup waktu puncak kenaikan $DSSTEC_L$ pada pukul 11:03:30 UT.

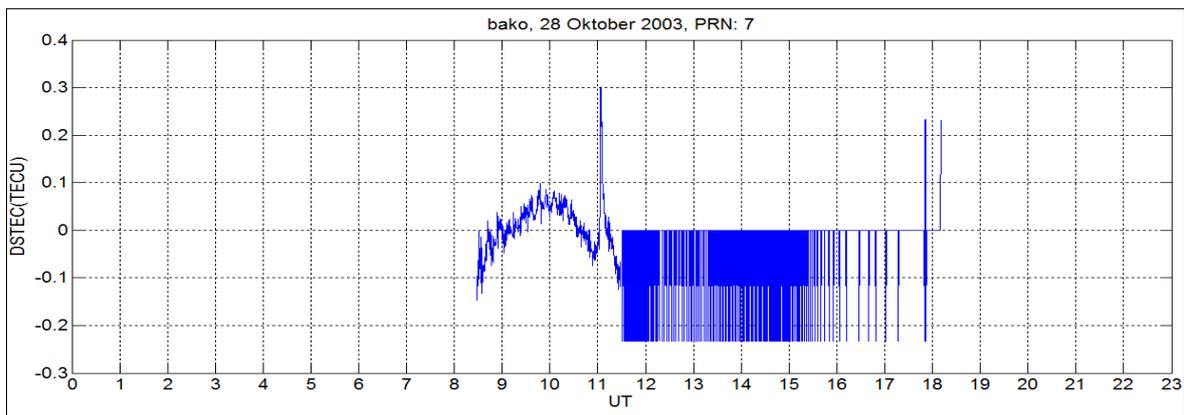


(a)

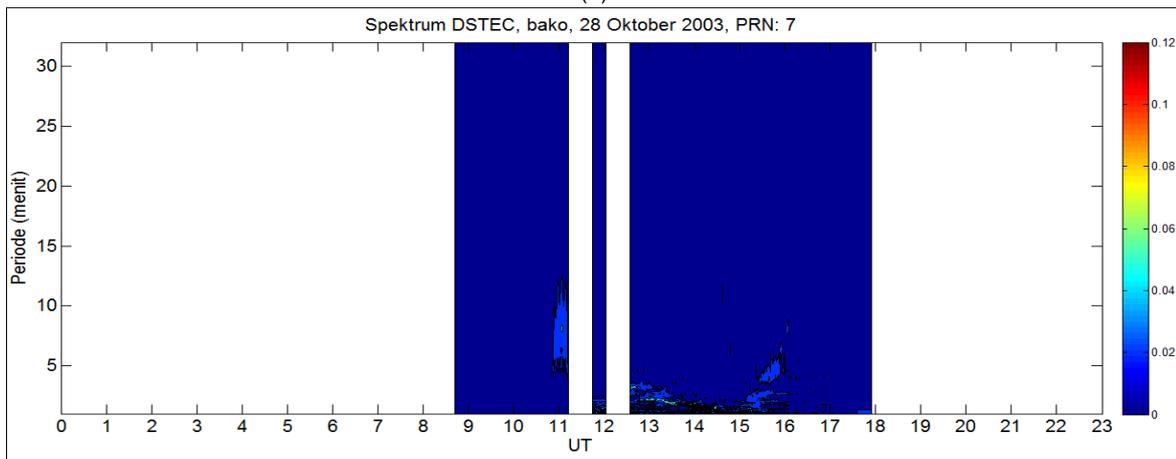


(b)

Gambar 3-1: Kenaikan $DSTECL$ teramati sekitar pukul 11:00 UT dengan nilai maksimum mendekati 0,1 TECU yang terjadi pada pukul 11:03:30 UT (a). Spektrum SFFT data $DSTECL$ tersebut menunjukkan adanya peningkatan spektrum amplitudo di sekitar pukul 11:00 UT (b)

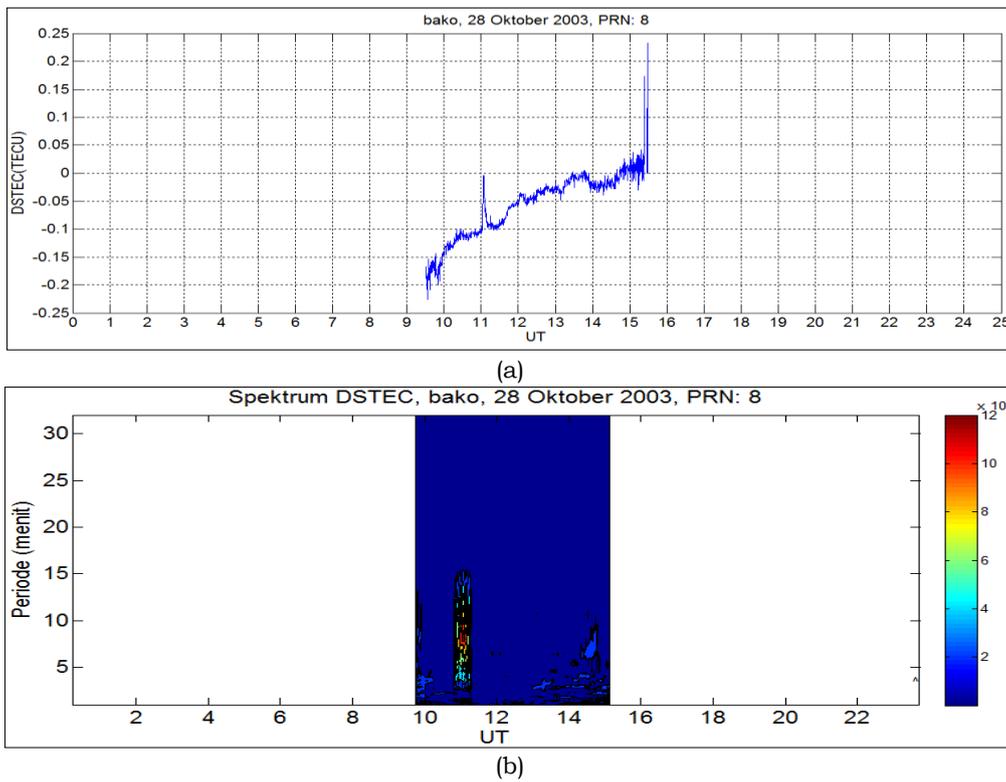


(a)

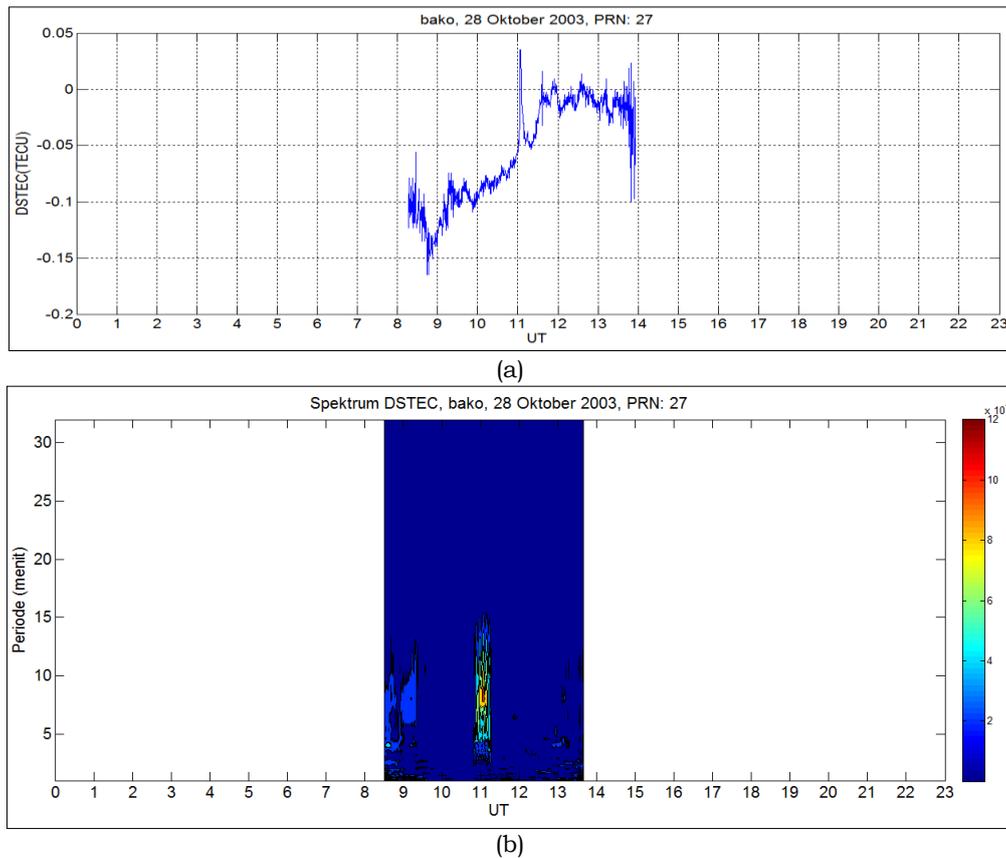


(b)

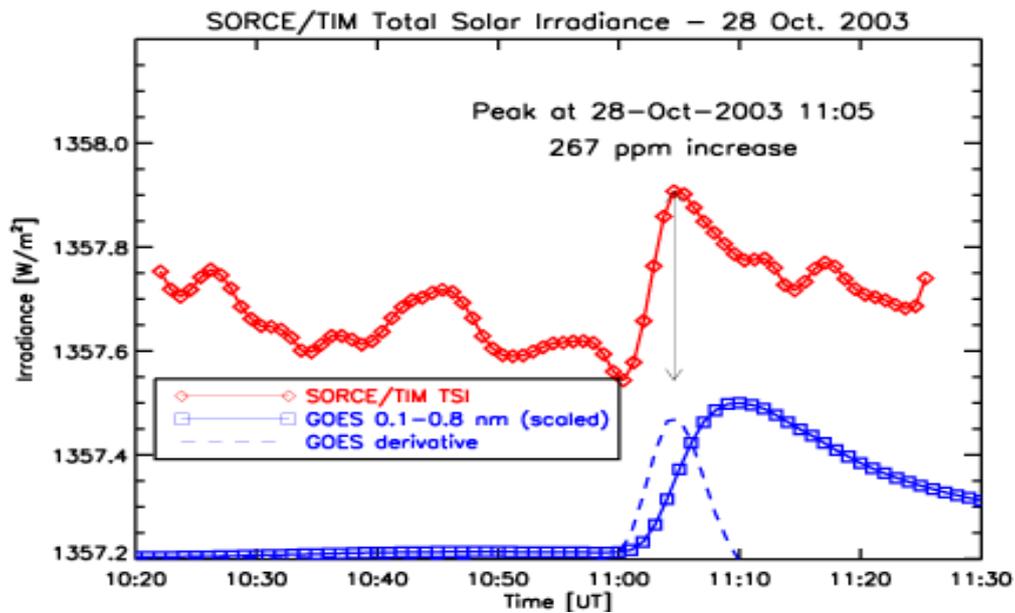
Gambar 3-2: Peningkatan $DSTECL$ dari pengamatan satelit GPS PRN 7 yang diterima di stasiun BAKO terjadi pada pukul 11:00 yang mencapai puncak pada pukul 11:04:30 UT (a) dan spektrumnya (b)



Gambar 3-3: Peningkatan $DSTECL$ dari pengamatan sinyal GPS PRN 8 yang diamati di Cibinong yaitu dari stasiun BAKO yang menunjukkan maksimum pada sekitar pukul 11:03:30 UT (a) dan spektrumnya (b)



Gambar 3-4: Peningkatan $DSTECL$ dari satelit GPS PRN 27 terjadi pada waktu yang sama dengan $DSTECL$ dari pengamatan satelit GPS PRN 4, dan 8 yaitu pukul 11:03:30 (b) dan spektrum SFFT dari data tersebut



Gambar 3-5: Peningkatan *total solar irradiance* (TSI) dan sinar-x saat terjadinya *flare* sinar-x 28 Oktober 2003 (Kopp, 2014)

Gambar 3-2, Gambar 3-3, dan Gambar 3-4 berturut-turut sama dengan Gambar 3-1 hanya saja untuk pengamatan satelit dengan PRN 7, 8, dan 27 masing-masing. Dengan demikian dari pengamatan satelit GPS dengan PRN 4, 7, 8, dan 27 yang diterima oleh stasiun BAKO dapat dideteksi adanya kenaikan mendadak dan tajam pada sekitar pukul 11:00 UT dan mencapai maksimum rata-rata pada sekitar pukul 11:03 UT.

Jika dibandingkan dengan data pengamatan *flare* sinar-x tanggal 28 Oktober 2003 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3-5, diketahui bahwa peningkatan $DSTEC_L$ ini bersesuaian dengan peningkatan *Total Solar Irradiance* (TSI) yang terjadi mulai pukul 11:00 UT dan mencapai maksimum pada pukul 11:05:00 UT. Terlihat bahwa peningkatan maksimum TEC yang diukur dengan $DSTEC_L$ beberapa menit lebih awal dari nilai maksimum TSI dan sinar-x. Padahal pengamatan TSI dan sinar-x dari ketinggian lebih besar dari titik ionosfer yang diamati di ketinggian sekitar 350 km. Ini bukan berarti kenaikan TEC terjadi lebih awal tetapi menunjukkan bahwa peningkatan nilai TEC yang diukur dengan $DSTEC_L$

mencapai maksimum lebih awal dari nilai maksimum TSI dan sinar-x. Selain itu variasi TEC juga dipengaruhi oleh variasi kerapatan atmosfer netral yang merupakan sumber dari elektron di ionosfer.

Dari Gambar 3-1 sampai Gambar 3-4 diketahui juga bahwa $DSTEC_L$ turun kembali setelah mencapai maksimum. Hal tersebut bukan berarti TEC turun dan bertentangan dengan peningkatan radiasi sinar-x saat *flare* masih terjadi, karena walaupun $DSTEC_L$ telah turun tetapi nilainya masih positif yang artinya TEC masih mengalami kenaikan beberapa detik atau menit setelah itu.

Kecenderungan peningkatan TEC atau penurunan TEC juga dipengaruhi oleh gerakan satelit GPS yang diamati dari stasiun GPS yang digunakan untuk estimasi TEC. Jika satelit menjauhi stasiun, sementara elevasi satelit makin rendah maka TEC arah satelit ($STEC_L$) juga akan cenderung meningkat. Sebaliknya jika satelit GPS mendekati stasiun GPS maka TEC akan cenderung turun.

Tetapi jika dibandingkan dengan waktu mulai terjadinya *flare* sinar-x dapat diketahui dari Gambar 3-1 sampai Gambar 3-5 bahwa kenaikan

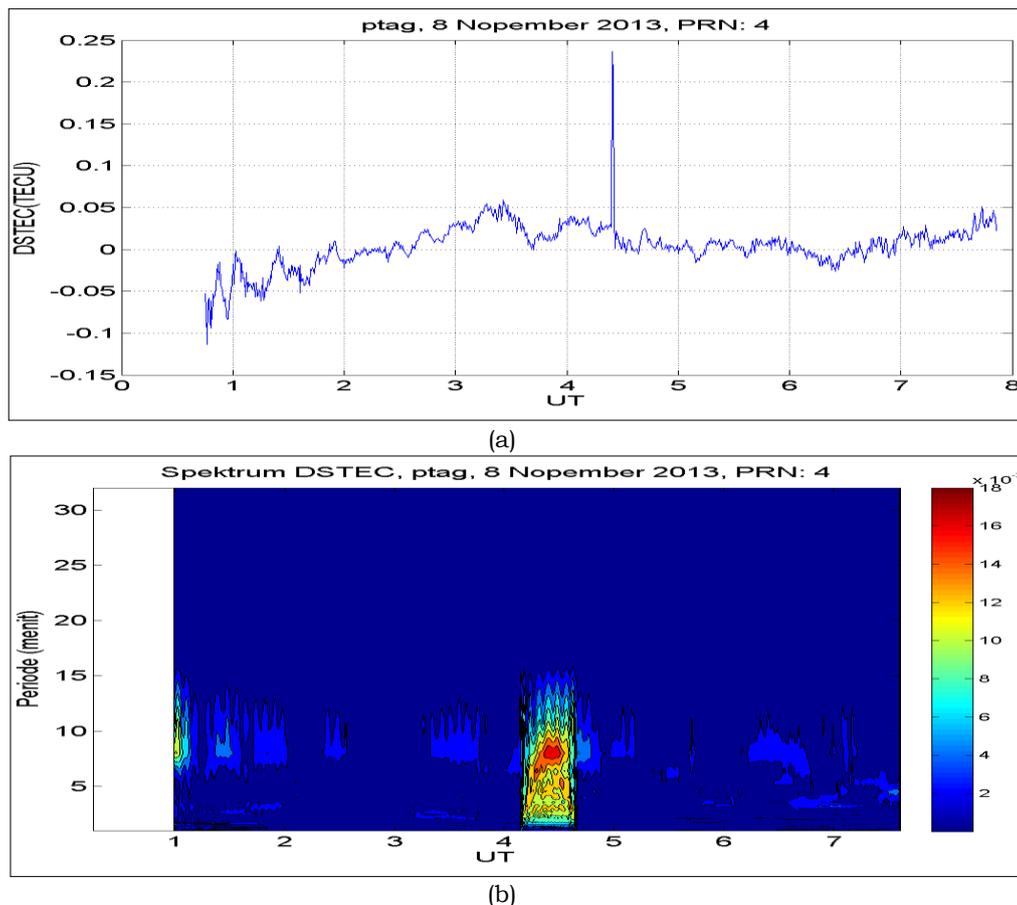
$DSTEC_L$ terjadi setelah kejadian *flare* sinar-x yang sudah mulai pada sekitar pukul 09:55 UT.

3.2 Deteksi Efek *Flare* Sinar-X dengan Beberapa Stasiun GPS

Deteksi pengaruh *flare* sinar-x juga bisa dilakukan dengan beberapa stasiun GPS yang beroperasi kontinyu. Untuk kasus *flare* sinar-x tanggal 8 Nopember 2013 telah diamati kejadian *flare* sinar-x tersebut mulai pukul 04:20 UT dan mencapai maksimum pada pukul 04:26 UT seperti dijelaskan pada bab data dan metodologi.

Gambar 3-6 (a) menunjukkan bahwa ada peningkatan TEC yang diukur dari $DSTEC_L$ hasil pengamatan stasiun GPS PTAG mencapai maksimum pada pukul 04:24:30 UT. Spektrum SFFT data pada gambar tersebut ditunjukkan pada Gambar 3-6 (b). Dari

lima stasiun GPS yang disebutkan pada Tabel 2-1, untuk pengamatan TEC dari satelit GPS dengan PRN 4 ini semuanya menunjukkan kejadian peningkatan TEC maksimum yang simultan yaitu pada pukul 04:24:30 seperti ditunjukkan pada Tabel 3-1. Sama dengan deteksi pengaruh *flare* 28 Oktober 2003, ada peningkatan maksimum TEC terjadi beberapa menit lebih awal dari nilai maksimum intensitas sinar-x matahari pada *flare* sinar-x tanggal 8 Nopember 2013. Tetapi yang perlu dicatat adalah bahwa meskipun $DSTEC_L$ sudah turun setelah mencapai maksimum sebelum intensitas radiasi matahari mencapai maksimum, bukan berarti TEC sudah turun saat radiasi matahari masih naik. Ini dapat dilihat dari nilai $DSTEC_L$ tetap positif yang artinya setelah mencapai maksimum nilai TEC tetap naik sampai beberapa menit kemudian.



Gambar 3-6: Peningkatan TEC yang diindikasikan dengan peningkatan $DSTEC_L$ dari pengamatan satelit GPS PRN 4 yang diamati dari stasiun PTAG (a) dan spektrumnya pada 8 Nopember 2013 (b)

Tabel 3-1: WAKTU TERJADINYA PENINGKATAN MAKSIMUM MENUNJUKKAN KEJADIAN YANG SIMULTAN PADA PUKUL 04:24:30 UT

Kode Stasiun	PRN	Waktu peningkatan DSTECL
NTUS	4	4:24:30 UT
PIMO	4	4:24:30 UT
CUSV	4	4:24:30 UT
PTAG	4	4:24:30 UT
TNML	4	4:24:30 UT

4 KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Data TEC ionosfer dari pengamatan jarak fase satelit GPS dapat digunakan untuk deteksi efek *flare* sinar-X pada ionosfer dengan kriteria ada peningkatan TEC secara mendadak yang melebihi kenaikan TEC rata-rata, dan terjadi secara simultan pada beberapa lokasi titik pengamatan ionosfer. Menggunakan data pengamatan TEC dari beberapa satelit GPS yang diterima oleh satu stasiun GPS, pengaruh *flare* sinar-x pada ionosfer dapat dideteksi dengan baik. Deteksi efek *flare* sinar-x pada ionosfer dapat juga dilakukan menggunakan data pengamatan TEC GPS dari satu satelit GPS yang diamati dari beberapa stasiun GPS. Waktu gangguan ionosfer sebagai indikasi efek *flare* sinar-x yang dideteksi dari TEC GPS bersesuaian dengan pengamatan kejadian *flare* sinar-x dari pengamatan satelit GOES.

Metode deteksi efek *flare* sinar-x dengan data TEC GPS dapat diimplementasikan secara optimum dalam monitoring gangguan ionosfer mendadak yang disebabkan oleh aktivitas matahari tersebut, jika tersedia data TEC GPS *real time* beresolusi tinggi minimal 1 Hz.

Dari hasil penelitian ini penulis merekomendasikan pengoperasian pengamatan TEC dengan GPS seperti dengan *Global Ionospheric Scintillation and TEC Monitoring* (GISTM) dapat diakses secara *real time* sehingga dapat dikombinasikan dengan jaringan pengamatan GPS lainnya yang sudah *online*. Dengan demikian implementasi monitoring gangguan komunikasi HF

yang disebabkan *flare* sinar-x dapat menghasilkan informasi gangguan komunikasi radio HF yang cepat dan akurat.

DAFTAR RUJUKAN

- Bowman, B. R., Tobiska, W. K., Marcos, F. A., Huang, C. Y., Lin, C. S., dan Burke, W. J., 2008. *A New Empirical Thermospheric Density Model JB2008 Using New Solar and Geomagnetic Indices*, AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference 18-21 August 2008, Honolulu, Hawaii.
- Goodman, J.M., 2005. *Space weather and telecommunications*, Springer, 2005 edition.
- Kopp, G., 2014. *Greg Kopp's TSI Page*, [Http://spot.colorado.edu/~kopp/TSI/](http://spot.colorado.edu/~kopp/TSI/), diakses 15 April 2014).
- Opperman, B.D.L., 2007. *Reconstructing Ionospheric TEC Over South Africa using Signals from a Regional GPS Network*, Doctoral Thesis, Rhodes University.
- Tripathi, S.C., Khan, P.A., Ahmad, A., Bhawre, P., Purohit, P.K., Gwal, A.K., 2011. *Effect of Enhanced X-Ray Flux on the D and F Layer Ionospheric Ionization during Extreme Solar Events*, Proceeding of the 2011 IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace) 12-13 July 2011, Penang, Malaysia.
- <http://igsb.jpl.nasa.gov/network/list.html>, akses 17 Juli 2014.
- <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov>, akses 17 Juli 2014.
- <ftp://ftp.swpc.noaa.gov>, akses 17 Juli 2014.

