

**RESPON TEC IONOSFER DI ATAS BANDUNG DAN MANADO
TERKAIT *FLARE* SINAR-X MATAHARI KELAS M5.1 DAN M7.9 TAHUN
2015
(IONOSPHERIC TEC RESPONSE OVER BANDUNG DAN MANADO
ASSOCIATED WITH M5.1 AND M7.9 CLASSES OF SOLAR FLARE
XRAYS IN 2015)**

Sri Ekawati*

Pusat Sains Antariksa

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

*e-mail : sri.ekawati@lapan.go.id

Diterima 8 Mei 2016; Direvisi 19 September 2017; Disetujui 22 September 2017

ABSTRACT

The solar flare is potential to cause sudden increase of the electron density in the ionosphere, particularly in D layer, known as Sudden Ionospheric Disturbances (SID). This increase of electron density occurs not only in the ionospheric D layer but also in the ionospheric E and F layers. Total Electron Content (TEC) measured by GPS is the total number of electrons from D to F layer. The aim of this research is to study the effect of solar flare x-rays, greater than M5 class in 2015, on ionospheric TEC over Bandung and Manado. This paper presents the preliminary result of ionospheric TEC response on solar flare occurrence over Indonesia. The ionospheric TEC data is derived from GPS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor (GISTM) receiver at Bandung (-6.90° S; 107.6° E geomagnetic latitude 16.54° S) and Manado (1.48° N; 124.85° E geomagnetic latitude 7.7° S). The solar x-rays flares classes analyzed were M5.1 on 10 March 2015 and M7.9 on 25 June 2015. Slant TEC (STEC) values were calculated to obtain Vertical TEC (VTEC) and the Differential of the VTEC (DVTEC) per PRN satellite for further analysis. The results showed that immediately after the flare, there were sudden enhancement of the VTEC and the DVTEC (over Bandung and Manado) at the same time. The time delay of ionospheric TEC response on M5.1 flare was approximately 2 minutes, then the VTEC increased by 0.5 TECU and the DVTEC rose sharply by 0.5 – 0.6 TECU/minutes. Moreover, the time delay after the M7.9 flare was approximately 11 minutes, then the VTEC increased by 1 TECU and the DVTEC rose sharply by 0.6 – 0.9 TECU/minutes.

Keywords: Ionosphere, TEC, flare, GPS, SID

ABSTRAK

Flare matahari berpotensi meningkatkan kerapatan elektron ionosfer secara mendadak, khususnya di lapisan D, yang dikenal sebagai *Sudden Ionospheric Disturbances* (SID). Peningkatan kerapatan elektron tersebut terjadi tidak hanya di lapisan D, tetapi juga di lapisan E dan F ionosfer. *Total Electron Content* (TEC) dari GPS merupakan jumlah banyaknya elektron total dari lapisan D sampai lapisan F. Penelitian ini bertujuan mengetahui efek *flare*, yang lebih besar dari kelas M5 tahun 2015, terhadap TEC ionosfer di atas Bandung dan Manado. Makalah ini merupakan hasil awal dari respon TEC ionosfer terhadap fenomena *flare* di atas Indonesia. Data TEC ionosfer diperoleh dari penerima *GPS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor* (GISTM) di Bandung ($-6,90^{\circ}$ S; $107,60^{\circ}$ E lintang geomagnet $16,54^{\circ}$ LS) dan Manado ($1,48^{\circ}$ LU; $124,85^{\circ}$ BT lintang geomagnet $7,7^{\circ}$ LS) dikaitkan dengan kejadian *flare* kelas M5.1 pada tanggal 10 Maret 2015 dan kelas M7.9 pada tanggal 25 Juni 2015. Nilai Slant TEC (STEC) dihitung untuk memperoleh nilai Vertical TEC (VTEC), kemudian nilai *Differential of VTEC* (DVTEC) per PRN satelit diperoleh untuk analisis selanjutnya. Hasil menunjukkan segera setelah terjadi *flare*, terjadi peningkatan VTEC dan DVTEC (di atas Bandung dan Manado) secara mendadak pada waktu yang sama. Waktu tunda dari respon TEC ionosfer setelah terjadi *flare* M5.1 adalah sekitar 2 menit, kemudian VTEC meningkat sebesar 0,5 TECU dan DVTEC meningkat secara tajam sebesar 0,5 – 0,6 TECU/menit. Sedangkan, waktu tunda setelah terjadi *flare* M7.9 adalah 11 menit, kemudian VTEC meningkat sebesar 1 TECU dan DVTEC meningkat secara tajam sebesar 0,6 – 0,9 TECU/menit.

Kata kunci: *Ionosfer, TEC, Flare, GPS, SID*

1. PENDAHULUAN

Pemahaman interaksi aktivitas Matahari dengan ionosfer Bumi perlu ditingkatkan untuk optimalisasi layanan Pusat Sains Antariksa, sebagai *center of excellence* sains antariksa, terhadap *local space weather communities* di Indonesia. Sebab ionosfer, yang sangat rentan dipengaruhi oleh aktivitas matahari, merupakan salah satu faktor keberhasilan komunikasi radio, komunikasi satelit dan sistem navigasi berbasis satelit. Penjalaran sinyal satelit ke antena di bumi dapat terganggu bila medium ionosfer yang dilaluinya terganggu.

Ionosfer terbentuk disebabkan proses ionisasi dari sinar *Extreme Ultraviolet* (EUV) dan sinar-X Matahari. Ionosfer adalah lapisan plasma (elektron dan ion) yang melingkupi bumi yang terbentuk karena mendapat energi radiasi matahari (Kelley, 1989). Pada siang hari

terjadi proses ionisasi dan ionosfer akan terbagi menjadi lapisan D (70 – 90 km), E (90 – 150 km), F1 (150 – 200 km) dan F2 (200 – 300 km). Sedangkan pada malam hari terjadi proses rekombinasi dan lapisan-lapisan tersebut akan menghilang menyisakan satu lapisan yaitu lapisan F dan pada suatu kondisi tertentu akan muncul pula lapisan Es (Sporadis). Pembentukan lapisan-lapisan di ionosfer diilustrasikan pada Gambar 1-1.

Ketika terjadi peristiwa *flare* sinar-x, berupa peningkatan intensitas sinar-x yang kuat dan mendadak, maka akan mengakibatkan peningkatan densitas elektron di lapisan ionosfer. Gangguan secara mendadak di ionosfer tersebut dikenal dengan istilah *Sudden Ionospheric Disturbances* (SID). Penelitian tentang pengaruh *flare* terhadap ionosfer di atas Indonesia dari data ionosonda menunjukkan bahwa fenomena peristiwa *flare* sinar-x dari matahari, yang

merupakan radiasi elektromagnetik pengionisasi, merupakan kategori dampak langsung terhadap struktur dan dinamika ionosfer dengan waktu tunda sekitar 8,3 menit (Suratno dan Suhartini, 2011). *Flare* sinar-x juga menyebabkan peningkatan frekuensi minimum (*fmin*) dari data ionosonda, sehingga anomali ini menyebabkan kegagalan komunikasi yang menggunakan frekuensi di bawah (*fmin*) (Suratno dan Suhartini, 2011). Komunikasi radio HF yang pada kondisi normal dapat digunakan untuk komunikasi, ketika terjadi *flare* sinar-x, mendadak tidak bisa berkomunikasi karena gelombang tersebut memperoleh serapan lebih tinggi oleh lapisan D. Adapun ilustrasi terjadinya SID diilustrasikan pada Gambar 1-2. Peristiwa SID oleh komunitas pengguna radio HF lebih dikenal dengan sebutan fenomena *Short Wave Fadeout* (SWF).

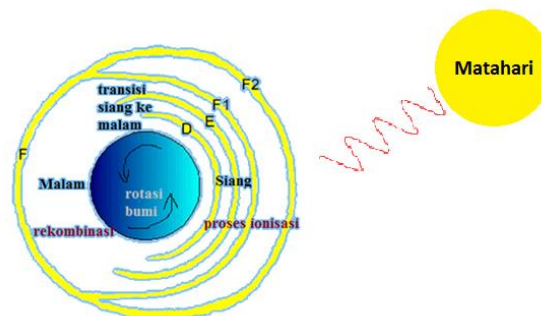
Penelitian tentang pengaruh *flare* terhadap ionosfer di atas Indonesia dari data ionosonda telah lebih dahulu diteliti. Namun, penelitian anomali ionosfer diatas Indonesia dari data *Total Electron Content* (TEC) yang diperoleh dari penerima *Global Positioning System* (GPS) masih perlu

penelitian lebih dalam. Padahal, data TEC yang mengukur kerapatan elektron dari lapisan D sampai dengan lapisan F ionosfer dapat digunakan untuk mendeteksi pengaruh *flare* sinar-x terhadap anomali ionosfer.

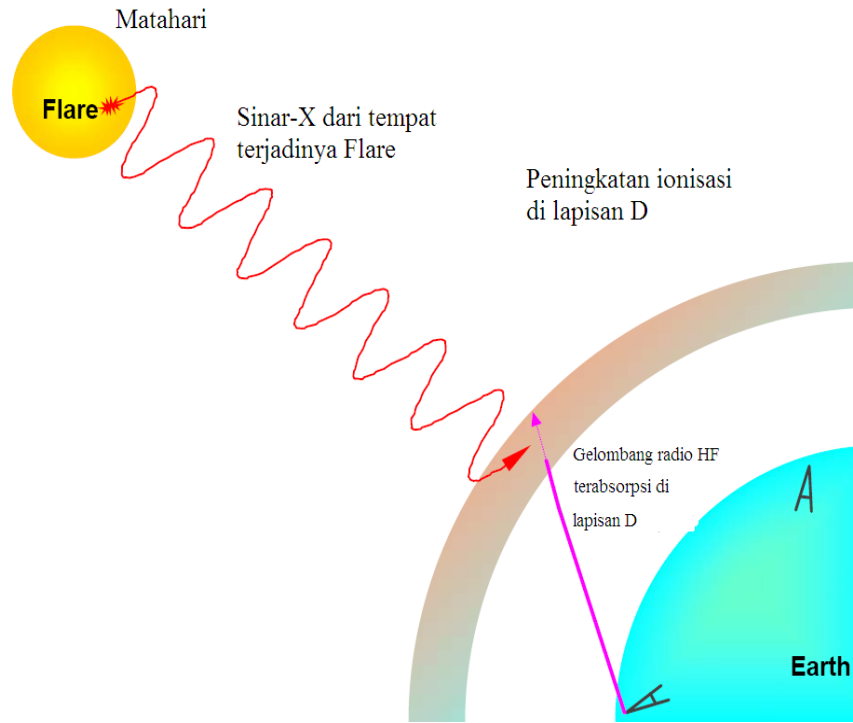
Peningkatan kerapatan elektron ionosfer yang disebabkan *flare* sinar-x tidak hanya terjadi di lapisan D ionosfer tetapi juga terjadi di lapisan E ionosfer (Xiong, 2011) dan terjadi juga di lapisan F ionosfer (Tripathi et al, 2011). Peningkatan kerapatan elektron di lapisan D, lapisan E dan lapisan F ionosfer akan meningkatkan juga nilai Total Electron Content (TEC) (Muslim, 2014). Nilai TEC adalah integral dari densitas elektron sepanjang garis lurus *line of sight* antara satelit dengan penerima yang dapat dituliskan pada Persamaan (1-1).

$$STEC = \int Ne dl \dots (1-1)$$

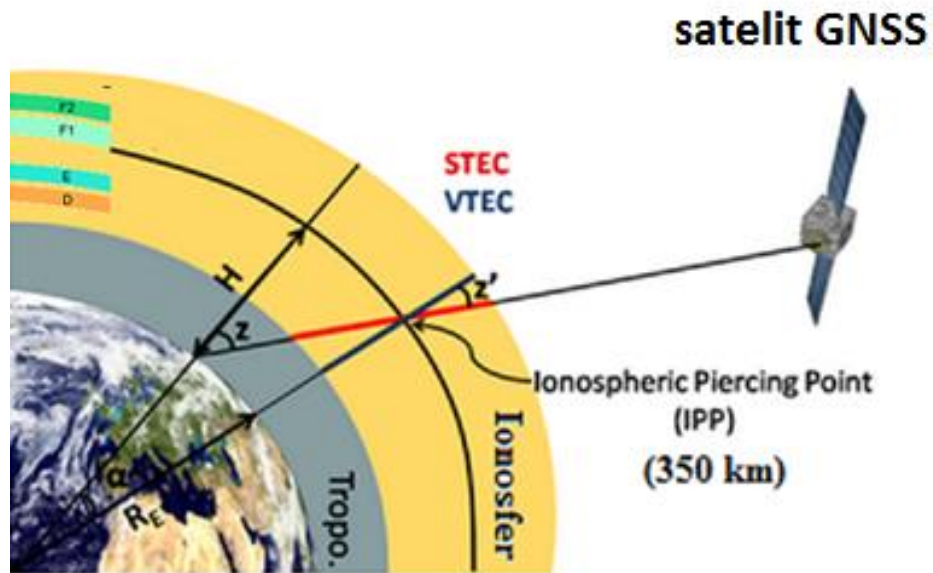
dengan *Ne* adalah densitas elektron dalam satuan elektron/m³, dan satuan TEC adalah TEC Unit (1 TECU = 10¹⁶ elektron/m²).



Gambar 1-1. Ilustrasi pembentukan lapisan Ionosfer pada siang dan malam



Gambar 1-2.: Ilustrasi kegagalan komunikasi radio HF akibat *flare* sinar-x Matahari (IPS,2015)



Gambar 1-3: Ilustrasi pengukuran STEC dan VTEC (courtesy: ROB)

Nilai TEC yang diperoleh dari pengukuran penerima GNSS merupakan *Slant Total Electron Content* (STEC). Sedangkan pada makalah ini akan digunakan nilai vertical TEC. Gambar 1-3 menunjukkan ilustrasi pengukuran STEC dan VTEC oleh satelit GNSS. STEC ditunjukkan dengan garis warna merah pada ionosfer. STEC menunjukkan banyaknya elektron per m^2 secara “*line of sight*” antara satelit GNSS dengan penerima GNSS di bumi. Sedangkan VTEC ditunjukkan dengan garis biru pada ionosfer. VTEC mengadaptasi model lapisan tipis ionosfer yang menganggap ionosfer berada pada ketinggian 350-kilometer dari permukaan bumi (Klobuchar, 1986; Asnawi, 2011). Ketinggian tersebut dipilih karena konsentrasi elektron di ionosfer, paling tinggi pada ketinggian tersebut.

Anomali peningkatan nilai VTEC akibat *flare* matahari sinar-x paling besar (X-rays class X17.2) pada tanggal 28 Oktober 2003 telah dilaporkan (Sahai, 2007). Peningkatan nilai VTEC sangat intensif dan mendadak sesaat setelah terjadinya *flare*, yang diamati oleh empat penerima GPS di Brazil, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2-4. Dibandingkan dengan hari sebelumnya, maka anomali VTEC meningkat secara mendadak sekitar 25 TECU dan kembali normal setelah tiga jam kemudian. Beberapa penelitian anomali TEC di atas Indonesia telah dilakukan dengan mengamati median TEC harian (Ekawati dan Srigutomo, 2013) dan *Differential of STEC* (DSTEC) dari *International GNSS Service* (IGS) (Muslim, 2014). Muslim (2014) memperoleh hasil waktu terjadinya gangguan ionosfer dari 6 stasiun GPS yang berbeda, berkaitan erat dengan peristiwa *flare* kelas X. Liu, et al (2006) menyebutkan bahwa anomali pada TEC

terdeteksi untuk peristiwa *flare* kelas M atau kelas X.

Penelitian pada makalah ini bertujuan untuk mengetahui peningkatan nilai TEC ionosfer di atas Bandung dan Manado dikaitkan dengan peristiwa *flare* sinar-x matahari dengan kelas lebih besar dari 5 yaitu kelas M5.1 pada tanggal 10 Maret 2015 dan kelas M7.9 tanggal 25 Juni 2015.

2. DATA DAN METODOLOGI

Data yang digunakan pada makalah ini meliputi data ionosfer dan *flare* sinar-x matahari. Data *Total Electron Content* (TEC) ionosfer diperoleh dari penerima *GPS Ionospheric Scintillation and TEC Monitoring* (GISTM) diatas untuk Bandung Bandung ($-6,90^{\circ}$ S; $107,60^{\circ}$ E lintang geomagnet $16,54^{\circ}$ LS) dan Manado ($1,48^{\circ}$ LU; $124,85^{\circ}$ BT lintang geomagnet $7,7^{\circ}$ LS). Sedangkan data *flare* sinar-x matahari diperoleh dari web SWPC di http://www.polarlicht-vorhersage.de/goes_archive seperti yang ditunjukkan Gambar 2-1 dan data *flare* sinar-x matahari berupa plot image 3-harian dapat diunduh di alamat ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2015/2015_plots .Sedangkan data yang lebih detail mengenai kejadian *flare* matahari (*event*) dapat diunduh di <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2015/>. Pada makalah ini, *flare* yang akan dianalisis adalah kejadian *flare* sinar-x matahari yang lebih besar dari kelas M5 selama tahun 2015.

Data TEC dari GISTM merupakan data STEC, kemudian data tersebut dikonversi terlebih dahulu menjadi VTEC dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Klobuchar, 1986):

$$VTEC = STEC \cos \left[\arcsin \left(\frac{R \cos \theta}{R_e + h_{max}} \right) \right] \dots (2-1)$$

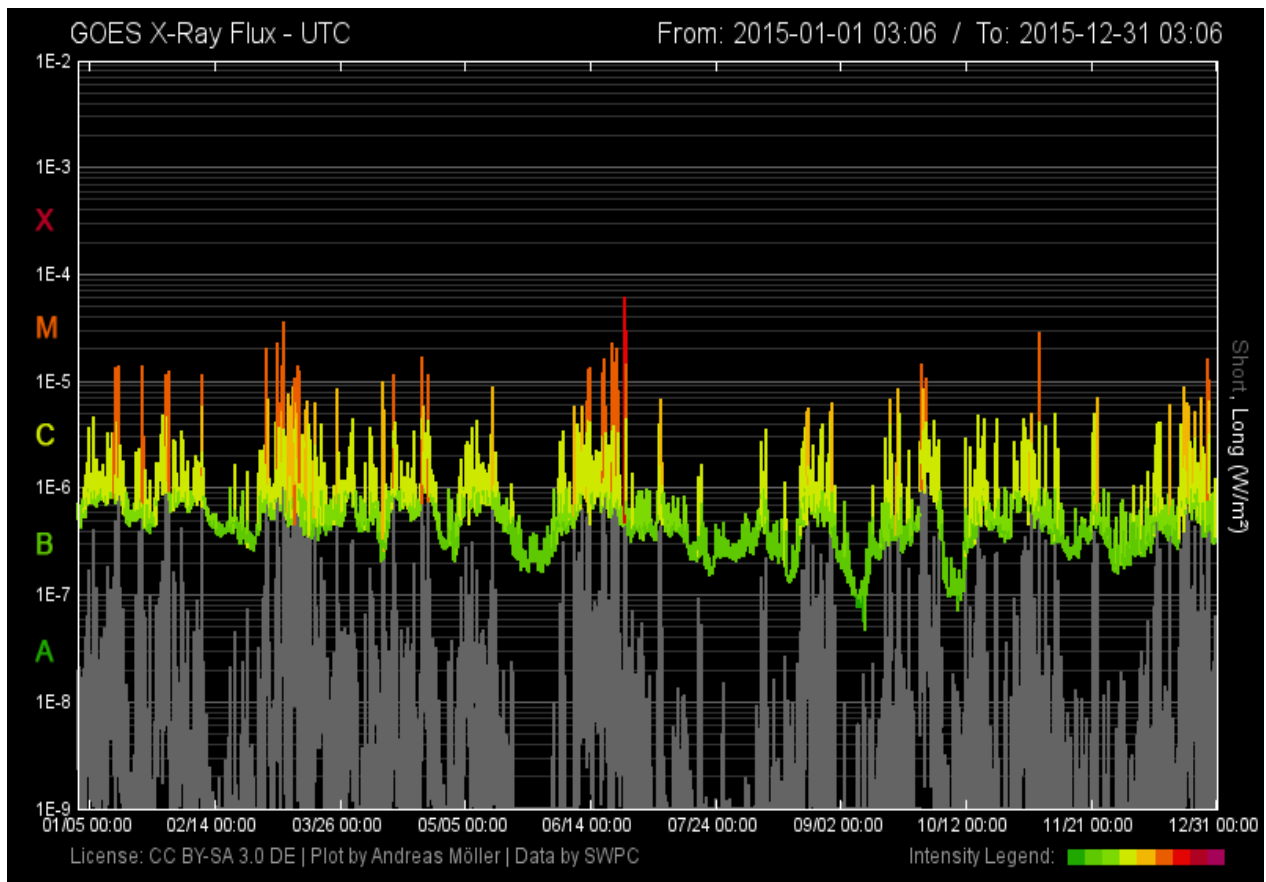
dengan R_e adalah jejari bumi (6378 km), h_{max} adalah ketinggian lapisan ionosfer yaitu 350 km dan θ adalah sudut elevasi posisi satelit terhadap antena penerima GNSS di bumi.

Selama satu menit, nilai TEC diperoleh lebih dari 11 nilai dari PRN (*Pseudo-Random Noise/Number*) satelit yang berbeda secara simultan. Kemudian, data-data VTEC tersebut dipilih pada waktu sekitar peristiwa *flare*. Selanjutnya dipilih kembali berdasarkan PRN satelit

yang mengukur nilai TEC pada waktu yang ditetapkan (waktu sekitar terjadinya *flare*). Terakhir, dilakukan perhitungan *differensial of VTEC* (DVTEC) dan dilakukan perbandingan nilai DVTEC pada saat terjadi dengan *flare* dengan DVTEC pada saat kondisi aktivitas matahari dan geomagnet dalam kondisi tenang. Adapun perhitungan DVTEC dilakukan seperti pada Persamaan (2-2) berikut:

$$DVTEC = VTEC(t) - VTEC(t - 1) \dots (2-2)$$

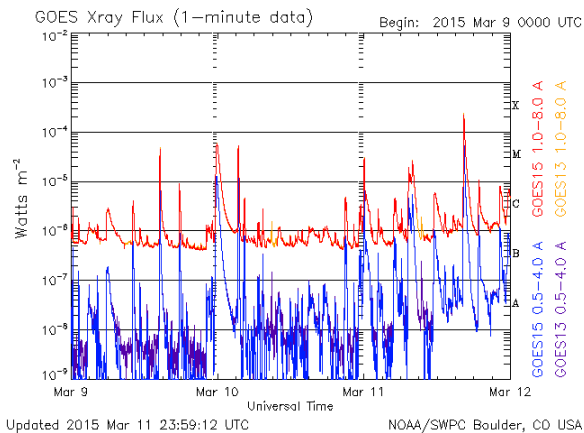
dengan t adalah waktu.



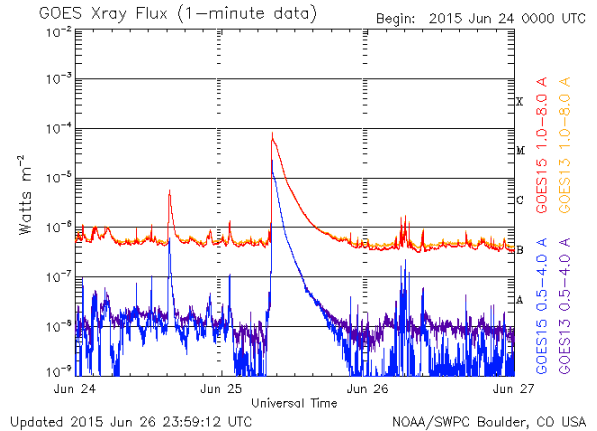
Gambar 2-1 : GOES X-rays flux dari tanggal 1 Jan – 31 Desember 2015 (http://www.polarlicht-vorhersage.de/goes_archive diunduh bulan Januari 2017)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 3-1 menunjukkan hasil identifikasi kemunculan *flare* sinar-x matahari di atas kelas M5 selama tahun 2015. Tabel tersebut menunjukkan terdapat dua kejadian *flare* yang mungkin berdampak pada ionosfer di atas Indonesia, karena terjadi pada siang hari untuk wilayah Indonesia, yaitu *flare* kelas M5.1 pada tanggal 10 Maret 2015 (Gambar 3-1) dan *flare* kelas M7.9 pada tanggal 25 Juni 2015 (Gambar 3-2).



Gambar 3-1: Plot *flare* tanggal 09 – 11 Maret 2015 (sumber:ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2015/2015_plots diunduh Maret 2016)



Gambar 3-2: Plot *flare* tanggal 24 – 26 Juni 2015 (sumber:ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2015/2015_plots diunduh Maret 2016)

Tabel 3-1 juga menunjukkan waktu awal, waktu puncak dan waktu akhir kemunculan *flare*. *Flare* M5.1 mulai terjadi pada pukul 03.19 UT (10.19 WIB atau 11.19 WITA), mencapai waktu puncak pada pukul 03.24 UT dan berakhir pada pukul 03.28 UT. Sedangkan, *flare* M7.9 mulai terjadi pada pukul 08.02 UT (15.02 WIB atau 16.02 WITA), mencapai puncak pada pukul 08.16 UT dan berakhir pada pukul 09.05 UT.

Tabel 3-1. Kemunculan *Flare* di atas M5 selama tahun 2015 (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2015/> diunduh bulan April 2016)

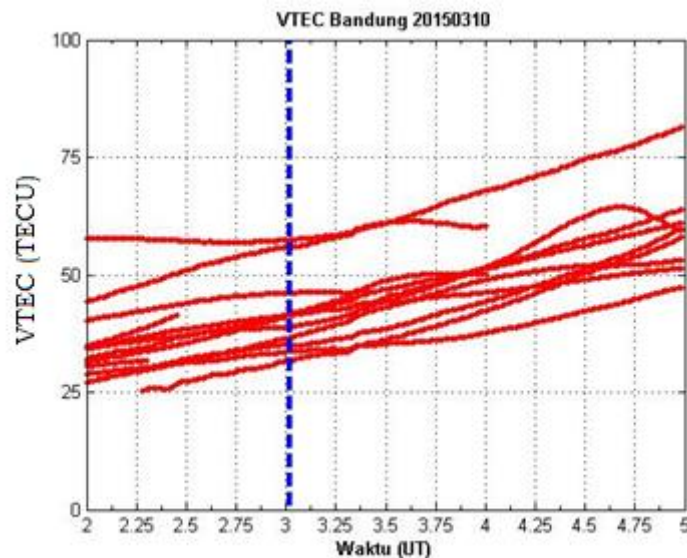
Tanggal	Kelas <i>flare</i>	Mulai (UT)	Maks. (UT)	Selesai (UT)	Keterangan
07 Mar 2015	M9.2	21.45	22.22	22.58	malam
09 Mar 2015	M5.8	23.29	23.53	00.12	malam
10 Mar 2015	M5.1	03.19	03.24	03.28	siang
11 Mar 2015	X2.1	16.11	16.22	16.29	malam
05 Mei 2015	X2.7	22.05	22.11	22.15	malam
22 Jun 2015	M6.5	17.39	18.23	18.51	malam
25 Jun 2015	M7.9	08.02	08.16	09.05	siang

3.1. TEC pada tanggal 10 Maret 2015 (*flare* M5.1)

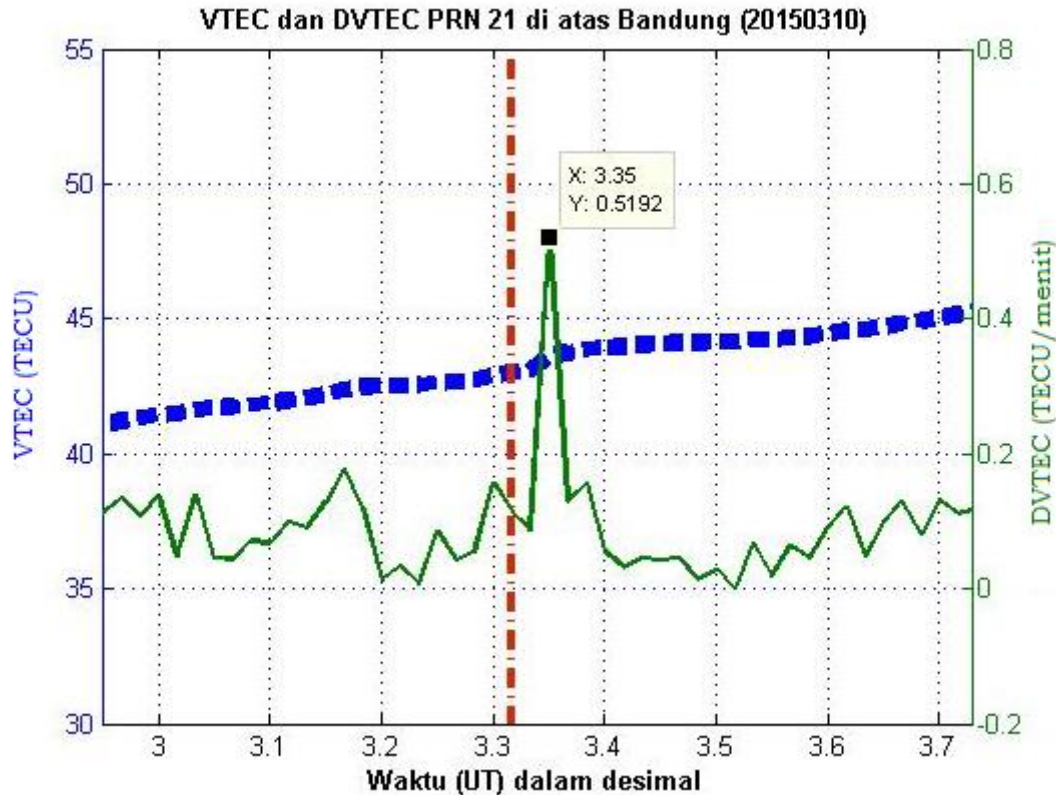
Gambar 3-3 menunjukkan data VTEC di atas Bandung pada tanggal 10 Maret 2015. Data TEC yang ditampilkan pada Gambar 3-3 adalah data dari pukul 02.00 UT sampai dengan 05.00 UT, karena TEC yang akan dianalisis adalah nilai TEC yang terjadi sekitar waktu terjadinya *flare* (siang hari). Adapun, garis putus-putus secara vertikal berwarna biru menunjukkan waktu kejadian *flare* M5.1. Bila melihat secara sepintas, nilai VTEC meningkat setelah terjadi *flare* tersebut. Namun, sedikit sulit untuk menentukan waktu mulai peningkatan VTEC, yang disebabkan oleh *flare*, beserta nilai peningkatannya disebabkan waktu *flare* M5.1 tersebut terjadi pada fase naik menuju nilai maksimum ionisasi pada siang hari. Oleh karena itu, dihitung nilai DVTEC per PRN satelit untuk melihat perubahan TEC per menit.

Gambar 3-4 menunjukkan VTEC dan DVTEC dari PRN 21 pada tanggal 10 Maret 2015 di atas Bandung. Garis putus-

putus (*dash-dot line*) vertikal berwarna merah menunjukkan waktu awal terjadinya *flare* yaitu pukul 03.19 UT atau 03.3167 UT (dalam desimal). Selanjutnya, waktu menit dihitung menggunakan sistem desimal untuk memudahkan *plotting* dan perhitungan. Grafik putus-putus berwarna biru adalah nilai VTEC dengan nilai sumbu-y di sebelah kiri, satuannya adalah TECU. Grafik garis berwarna hijau adalah DVTEC dengan nilai sumbu-y di sebelah kanan, satuannya adalah TECU/menit atau 10^{16} elektron/m²/menit. Secara fisis DVTEC adalah perubahan peningkatan densitas elektron per satuan waktu. Nilai DVTEC meningkat sangat tajam segera setelah peristiwa *flare* M5.1, yaitu pada pukul 3.35 UT dengan nilai DVTEC sebesar 0,5192 TECU/menit. Data peningkatan DVTEC dan VTEC terkait *flare* M5.1 secara terperinci ditunjukkan pada Tabel 3-2. Peningkatan DVTEC bukan hanya ditunjukkan oleh data dari PRN21, tetapi hampir serentak oleh PRN satelit lainnya yang melintas di atas Bandung pada saat terjadi *flare* M5.1.



Gambar 3-3: VTEC di atas Bandung pada tanggal 10 Maret 2015 sekitar terjadinya *flare* M5.1



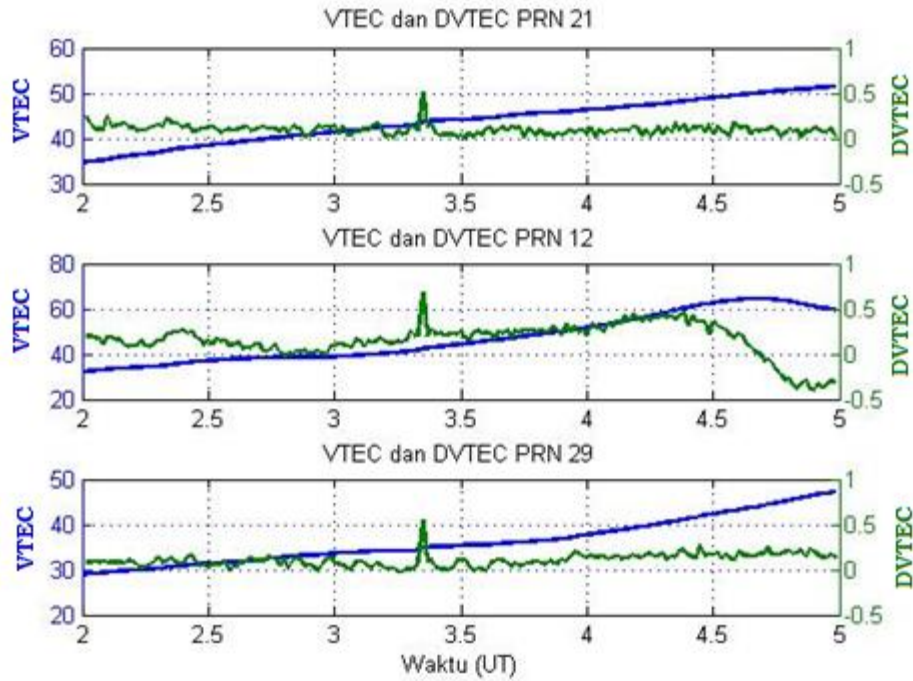
Gambar 3-4: VTEC dan DVTEC dari PRN 21 di atas Bandung pada tanggal 10 Maret 2015

Tabel 3-3. Peningkatan nilai DVTEC dan TEC satelit PRN 21 di atas Bandung terkait dengan flare M5.1

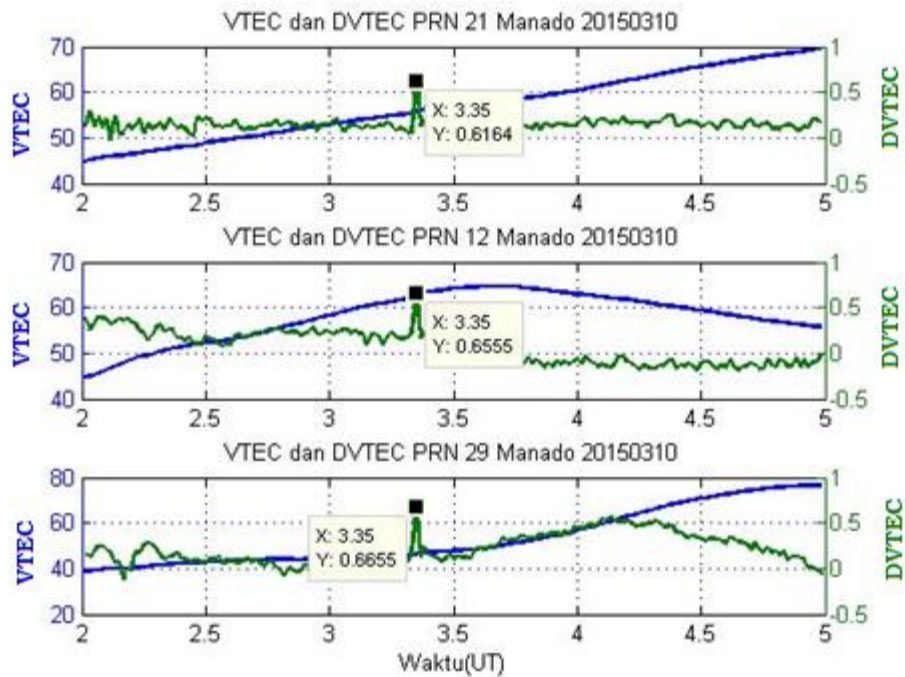
	Waktu (dalam desimal)		Waktu Tunda		Nilai	
	Flare	DVTEC	tDVTEC -Flare_awal	DVTEC	VTEC	
Mulai (UT)	3.3167	3.3330	0.0163 (58 detik)	0,08751	43,0800	
Puncak (UT)	3.4000	3.3500	0.0333 (1 menit 59 detik)	0,51920	43,6000	
Akhir (UT)	3.4667	3.4170	0.1003 (6 menit 6 detik)	0,03243	43,9800	

Gambar 3-5 menunjukkan peningkatan VTEC dan DVTEC yang diperoleh dari GPS PRN 21, PRN 12 dan PRN 29. Nilai DVTEC dari semua PRN tersebut menunjukkan peningkatan yang tajam setelah peristiwa flare M5.1. Adapun waktu tundanya adalah sekitar 2-menit dengan nilai DVTEC sekitar 0,5-TECU/menit. Hal yang sama ditunjukkan

oleh Gambar 3-6 yang diperoleh dari data GPS TEC dari stasiun di Manado. Waktu tunda respon TEC ionosfer adalah sebesar 2 menit dengan DVTEC sekitar 0,6 TECU/menit. Peningkatan DVTEC tersebut ditunjukkan secara serentak dan mendadak oleh semua PRN satelit GPS yang melintas di atas Bandung dan Manado.



Gambar 3-5: Peningkatan DVTEC dan VTEC di atas Bandung, segera setelah peristiwa flare M5.1, dari data PRN 21, PRN12 dan PRN 29



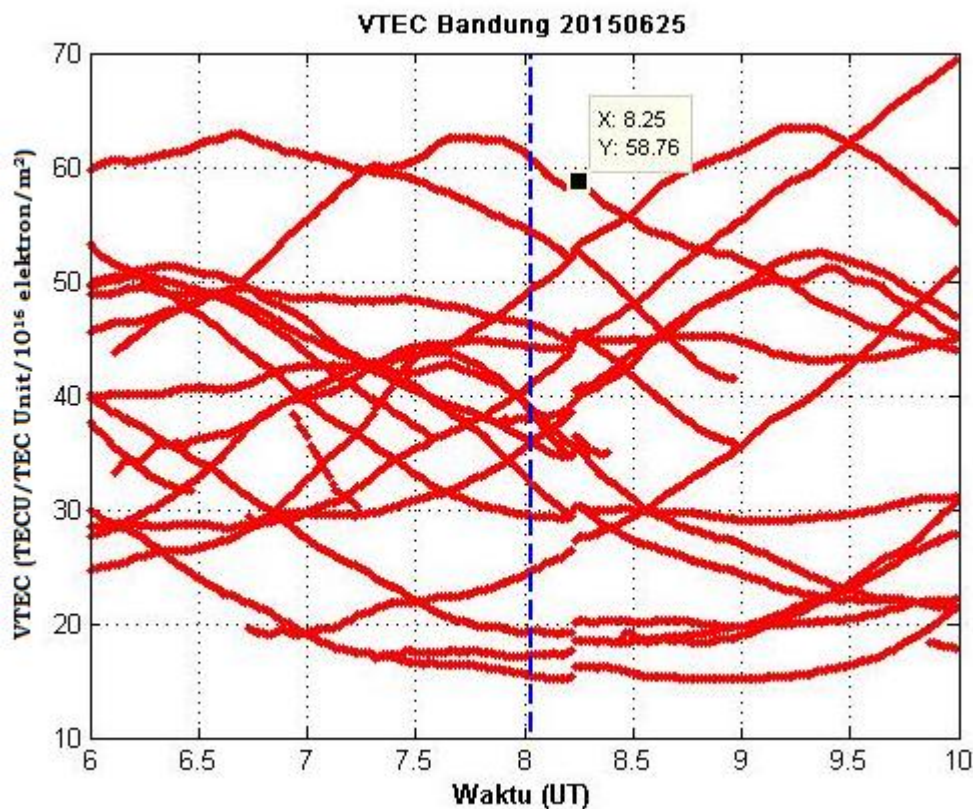
Gambar 3-6: Peningkatan DVTEC dan VTEC di atas Manado, segera setelah peristiwa flare M5.1, dari data PRN 21, PRN12 dan PRN 29

3.2. TEC pada tanggal 25 Juni 2015 (flare M7.9)

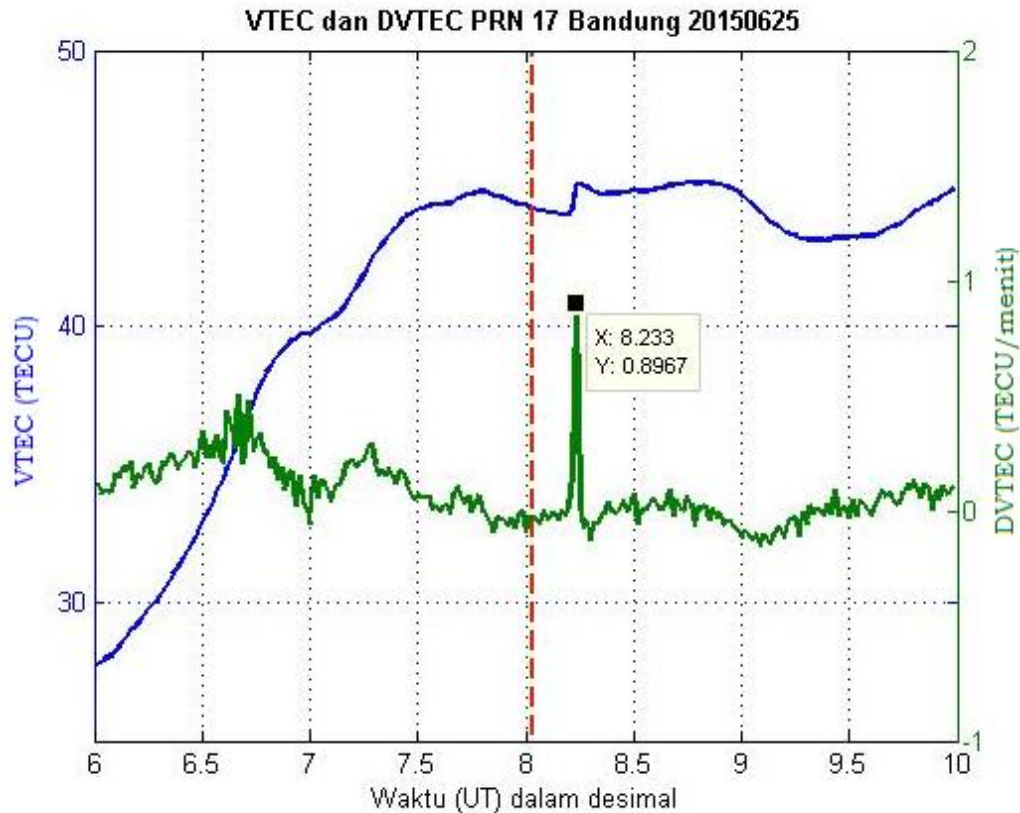
Gambar 3-7 menunjukkan nilai VTEC di atas Bandung dari pukul 06.00 UT sampai dengan 10.00 UT. Garis putus-putus berwarna biru adalah waktu awal peristiwa flare M7.9. Setelah terjadi flare, peningkatan nilai VTEC secara mendadak dapat terlihat pada grafik ini, yaitu pada pukul 08.25 UT. Nilai VTEC dari semua PRN satelit terlihat tidak simultan, tidak kontinu dan terlihat seperti “melompat” secara tajam. Untuk analisis lebih mendalam, maka akan dihitung nilai DVTEC dari masing-masing PRN satelit tersebut.

Gambar 3-8 menunjukkan nilai VTEC dan DVTEC dari satelit PRN 17 di

atas Bandung. Nilai VTEC ditunjukkan garis berwarna biru sedangkan dengan nilai sumbu-y di sebelah kiri, satuannya TECU. Sedangkan, nilai DVTEC ditunjukkan dengan garis berwarna biru dengan nilai sumbu-y sebelah kanan, satuannya adalah TECU/menit. Peningkatan DVTEC meningkat secara tajam pada pukul 8.2330 UT (dalam desimal) dengan waktu tunda sebesar 11-menit 58 detik dari waktu awal terjadinya flare M7.9. Peningkatan VTEC, secara mendadak, sebesar 1,1 TECU ($1,1 \times 10^{16}$ elektron/m²) selama 57 detik. Respon VTEC ionosfer tidak hanya ditunjukkan oleh satelit PRN 17 saja, tetapi ditunjukkan oleh semua satelit PRN yang melintas di atas Bandung di sekitar waktu peristiwa flare M7.9.



Gambar 3-7: VTEC di atas Bandung pada tanggal 25 Maret 2015 sekitar terjadinya flare M7.9.



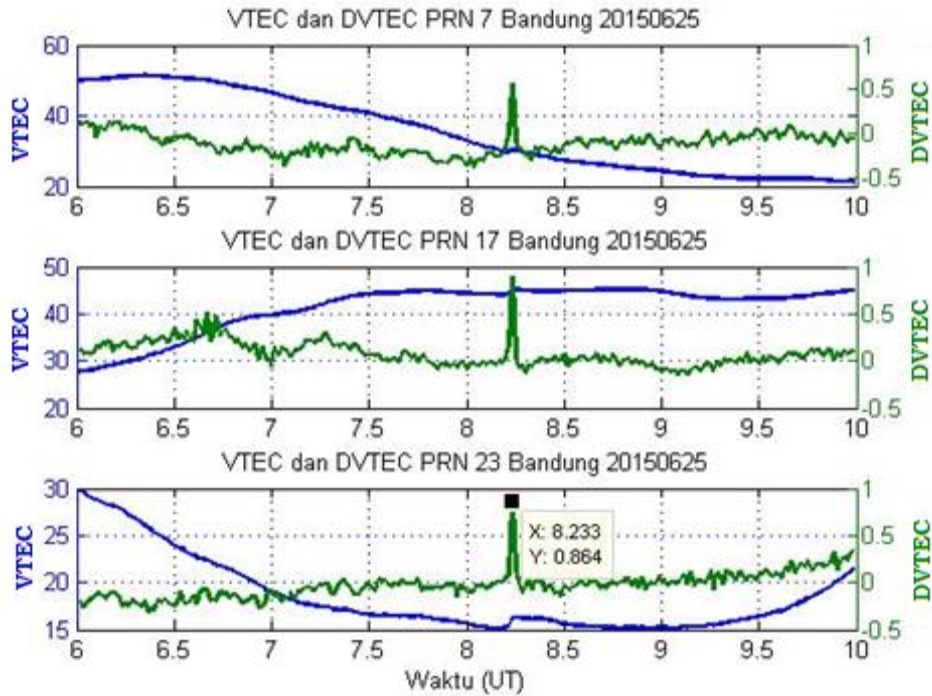
Gambar 3-8: VTEC dan DVTEC dari PRN 17 di atas Bandung pada tanggal 25 Juni 2015

Tabel 3-3. Peningkatan nilai DVTEC dan TEC satelit PRN 17 di atas Bandung terkait dengan *Flare* M7.9

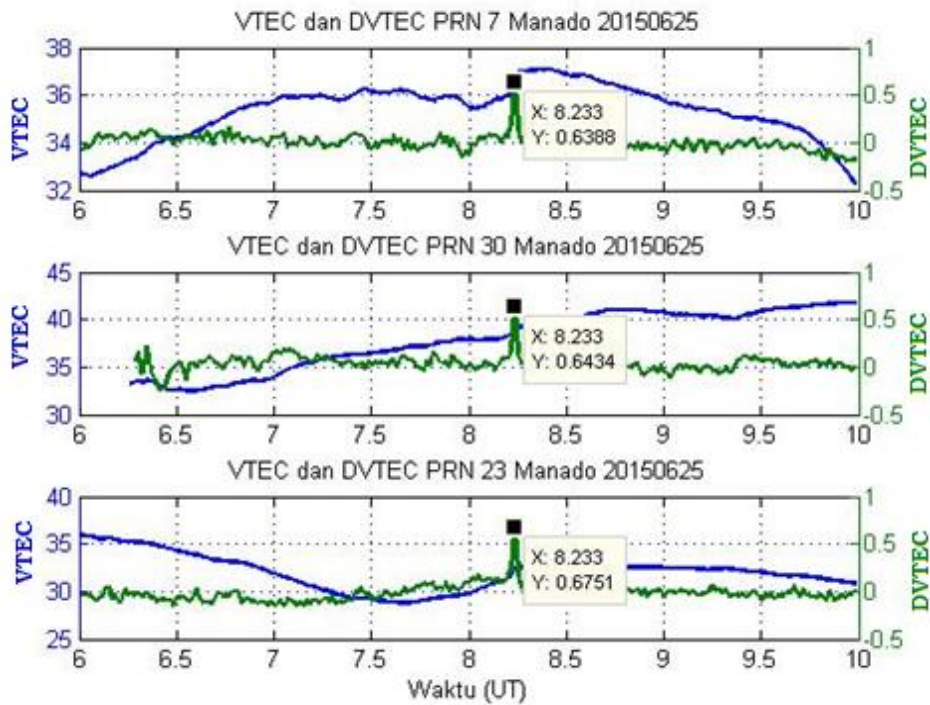
	Waktu (dalam decimal)		Waktu Tunda		Nilai	
	<i>Flare</i>	DVTEC	tDVTEC - <i>Flare</i> awal	DVTEC	VTEC	
Mulai (UT)	8.0333	8.2170	0.1837 (11 menit 10 detik)	0,1643	44,24	
Puncak (UT)	8.2667	8.2330	0.1997 (11 menit 58 detik)	0,8967	45,14	
Akhir (UT)	9.0833	8.3000	0.2667(16 menit)	-0,1268	44,93	

Gambar 3-9 menunjukkan peningkatan VTEC dan DVTEC yang diperoleh dari GPS PRN 7, PRN 17 dan PRN 23 di atas Bandung pada pukul 06.00 UT sampai dengan 10.00 UT. Nilai DVTEC dari semua PRN tersebut menunjukkan peningkatan yang tajam setelah peristiwa *flare* M7.9. Adapun waktunya adalah sekitar 11 menit 58 detik dengan nilai DVTEC bervariasi dari 0,5 sampai dengan 0,9 TECU/menit.

Gambar 3-10 menunjukkan peningkatan nilai VTEC dan DVTEC dari stasiun di Manado. Waktu tunda respon TEC ionosfer di atas Manado juga sebesar sekitar 11 menit 58 detik dengan DVTEC sekitar 0,63 – 0,67 TECU/menit. Peningkatan VTEC dan DVTEC tersebut ditunjukkan secara serentak dan mendadak oleh semua PRN satelit GPS yang melintas di atas Bandung dan Manado setelah peristiwa *flare* M7.9.



Gambar 3-9: Peningkatan DVTEC dan VTEC di atas Bandung, segera setelah peristiwa *flare* M7.9, dari data PRN 7, PRN 17 dan PRN 23.



Gambar 3-10: Peningkatan DVTEC dan VTEC di atas Manado, segera setelah peristiwa *flare* M7.9, dari data PRN 7, PRN 30 dan PRN 23.

4. KESIMPULAN

Metode DVTEC sangat efektif untuk mengetahui respon ionosfer terhadap peristiwa *flare* kelas M, karena dengan hanya menganalisis data VTEC saja tidak terlalu signifikan peningkatannya. Apabila *flare* terjadi pada saat fase naik atau peningkatan ionisasi menuju puncak densitas elektron di siang hari, maka peningkatannya tidak dapat terlihat secara signifikan.

Peningkatan VTEC dan DVTEC terjadi secara serentak dan mendadak yang ditunjukkan oleh semua PRN satelit yang melintas baik di atas Bandung maupun di Manado. Respon TEC ionosfer terhadap *flare* M5.1 dapat terlihat dengan baik dari nilai DVTEC yang meningkat secara tajam sebesar 0,5 – 0,6 TECU/menit serentak pada pukul 03.23 UT atau sekitar 2 menit dari waktu awal terjadinya peristiwa *flare* 5.1. Adapun peningkatan VTEC sekitar 0,5 TECU. Begitu juga dengan peningkatan nilai VTEC dan DVTEC sebagai respon terhadap *flare* M7.9, terjadi secara serentak dan mendadak ditunjukkan oleh semua PRN satelit yang melintas baik di atas Bandung maupun di Manado. Nilai DVTEC meningkat secara tajam sebesar 0,6 – 0,9 TECU/menit serentak pada pukul 08.13 UT atau sekitar 11 menit dari waktu awal terjadinya peristiwa *flare* 7.9 dan peningkatan VTEC sebesar 1,1 TECU.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim *Space Weather Information and Forecast Services* (SWIFS) Pusat Sains Antariksa, tim jaringan LAPAN, serta tim BPD Manado atas ketersediaan data ionosfer. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Dr. Buldan Muslim,

yang telah mengarahkan dalam metode pengolahan data TEC.

DAFTAR RUJUKAN

- Appleton, E. V., 1946. “*Two anomalies in the ionosphere*”, *Nature*, 157, 691, doi: 10.1038/157691a0.
- Asnawi, S. Ekawati dan D. U. Prabowo, 2012. “*Variasi Total Electron Content Ionosfer pada awal Peningkatan Aktivitas Matahari siklus ke-24*”, *Majalah Sains dan Teknologi Dirgantara*, ISSN:1907-0713, Vol.7, No.1, Maret 2012.
- Ekawati, S. dan W. Srigutomo, 2013. “*Analisis Ketidakteraturan Plasma Ionosfer pada saat aktivitas matahari tinggi diatas Indonesia*”, *Prosiding Seminar Kontribusi Fisika 2013*, ISBN 978-602-19655-5-9, Hal. 322-328.
- IPS, diunduh bulan Juli, 2015. “*Introduction to HF Radio Propagation*”, web diunduh di : <http://www.ips.gov.au/Category/Educational/Other%20Topics/Radio%20Communication/Intro%20to%20HFRadio.pdf>
- Kelley, M.C., 1989. “*The Earth’s Ionosfer: Plasma Physics and Electrodynamics*”, Academic Press, USA.
- Klobuchar, J., 1986. “*Design and Characteristic of the GPS Ionospheric Time-delay Algorithm for Single Frequency Users*”, *Proceedings of PLANS’86 – Position Location and Navigation Sysmposium*, Las Vegas, Nevada, p. 280-286, 4 – 7 November.
- Liu, J.H., C.H. Lin, Y.I. Chen, Y.C. Lin, T. W. Fang, C.H. Chen, Y.C. Chen, and J.J. Hwang, 2006. “*Solar Flare Signature of the ionospheric GPS Total Electron Content*”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, A05308.
- Muslim, B., 2014. “*Deteksi efek Flare Sinar-X pada Ionosfer dari Data Total Electron Content yang diturunkan dari pengamatan GPS*”, *Majalah Sains dan Teknologi Dirgantara*, Vol 9, No.2, Desember 2014:43-52.

- Y. Sahai, F. Becker-Guedes, P. R. Fagundes, W. L. C. Lima, A. J. de Abreu, F. L. Guarnieri, C. M. N. Candido, and V. G. Pillat, 2007. "Unusual ionospheric effects observed during the intense 28 October 2003 solar flare in the Brazilian sector", *Ann. Geophys.*, 25, 2497–2502, 2007.
- Suratno, dan S. Suhartini, 2011. "Analisis Asosiasi Semburan Radio Matahari Tipe III dengan Flare Sinar-X dan Frekuensi Minimum Ionosfer", *Jurnal Sains Dirgantara*, Vol.8, No.2 Juni 2011, ISSN: 1412-808X
- Tripathi, S.C., P.A. Khan, A. Ahmad, P. Bhawre, P.K. Purohit, A.K. Gwal, 2011." *Effect of Enhance X-Rays Flux on the D and F Layer Ionization during Extrem Solar Event*", Proceeding of the 2011 IEEE International Conference and Communication (IconSpace) 12-13 Juli 2011, Penang, Malaysia.
- Xiong, Bo, W. Wan, L. Liu, P. Withers, B. Zhao, B. Ning, Y. Wei, H. Le, Z. Ren, Y. Chen, M. He, and J. Liu, 2011. "Ionospheric response to the X-class solar flare on 7 September 2005", *Journal of Geophysical Research*, Vol.116,A11317,doi:10.1029/2011JA01691,2011.

