

# PENGARUH CUACA ANTARIKSA JANGKA PANJANG DAN JANGKA PENDEK PADA PARAMETER IONOSFER DI ATAS INDONESIA.

WILSON SINAMBELA

*Bidang Matahari dan Antariksa,*

*Pusat Pemanfaatan Sains Antariksa – LAPAN*

*wilson@bdg.lapan.go.id*

**Abstrak.** Pengaruh cuaca antariksa jangka panjang pada parameter ionosfer di atas Indonesia diselidiki dengan menggunakan deret waktu data frekuensi kritis lapisan F2 ionosfer (foF2) Tanjung Sari ( $6^{\circ}54'24''S:107^{\circ}24'34''T$ ), dan Total Electron Content (TEC) Bandung ( $6,20^{\circ}S:100,32^{\circ}T$ ) selama periode siklus matahari ke -23 (1996-2007). Diperoleh bahwa rata-rata tahunan antara variasi fluks radio matahari,  $F_{10,7}$  cm, variasi foF2 Tanjung Sari, dan variasi TEC Bandung mempunyai kaitan yang erat. Itu dibuktikan oleh tingginya koefisien korelasi yang diperoleh, masing-masing sebesar  $r_1 = 0,94$  ( $R^2 = 0,903$ ) ( $F_{10,7}$  dengan foF2 Tanjung Sari), dan  $r_2 = 0,88$  ( $R^2 = 0,778$ ) ( $F_{10,7}$  dengan TEC Bandung). Sementara pengaruh cuaca antariksa jangka pendek pada parameter ionosfer di atas Indonesia diselidiki dengan menggunakan data peristiwa aktivitas matahari ekstrim Oktober-Nopember 2003 yang mempengaruhi variasi foF2 Tanjung Sari dan TEC Bandung. Diperoleh bahwa peristiwa flare dan CME tersebut menyebabkan badai geomagnetik, dan selanjutnya menyebabkan badai ionosfer. Badai-badai ini bergantung pada kekuatan flare sinar-X, tipe CME dan posisinya di matahari ketika terjadi di permukaan matahari. Badai geomagnet dan badai ionosfer ini pada gilirannya akan mengganggu komunikasi frekuensi tinggi (HF) dan navigasi berbasis satelit. Flare dan CME pada 28, 29 Oktober dan 2 dan 4 Nopember, 2003 menyebabkan badai geomagnet ekstrim dengan indeks Dst mencapai  $-401$  nT, yang pada gilirannya menyebabkan gangguan komunikasi radio frekuensi tinggi dengan deviasi maksimum  $\Delta$  foF2 =  $-9,14$  MHz, dan deviasi TEC maksimum  $\Delta$ TEC =  $-43,10$  TECU, yang menyebabkan kesalahan posisi maksimum dalam sistem navigasi sekitar 7,1 meter.

*Abstract. The influences of long-term space weather on the ionospheric parameters over Indonesia are analyzed by using the time series data of the critical frequencies of ionospheric F2-layer (foF2) variations at Tanjung Sari Station ( $6^{\circ}54'24''S:107^{\circ}24'34''T$ ), and Total Electron Content (TEC) at Bandung ( $6,20^{\circ}S:100,32^{\circ}T$ ) during the period of 23<sup>rd</sup> solar cycles (1996-2007). It is found that yearly average between the  $F_{10,7}$  Cm variations, the foF2 Tanjung Sari variations, and TEC Bandung has well correlations. These well correlations are shown by highly obtained correlation coefficients, which are respectively  $r_1 = 0.94$  ( $R^2 = 0.903$ ) ( $F_{10,7}$  cm vs. foF2 Tanjung Sari), and  $r_2 = 0.88$  ( $R^2 = 0.778$ ) ( $F_{10,7}$  cm vs. TEC Bandung). While the influence of short-term space weather on the ionospheric parameters over Indonesia is analyzed by using the data of the extreme solar activities occurred in October and November 2003 which influence the foF2 Tanjung Sari and TEC Bandung variations. It is found that flares and CMEs caused geomagnetic storm and then caused ionospheric storm. These storms depend on the positions, types, and intensities of the x-ray flares. On its turn, these storms of the geomagnetic and ionospheric will disturb HF communication and navigation system. Flares and CMEs at October 28, 29 October and November 2, 4, 2003 caused extreme geomagnetic storm which maximum Dst index until  $-401$  nT, and then caused disturbances on HF radio communications with maximum deviation,  $\Delta$  foF2max =  $-9,14$  MHz, and maximum deviation,  $\Delta$ TECmax =  $-43,10$  TECU which caused maximum error position in the navigation system to 7,1 meter.*

**KATA KUNCI:** Cuaca antariksa, aktivitas matahari, dan Variabilitas ionosfer, flare dan CME

## 1. Pendahuluan

Keluaran energi matahari dalam semua bentuk tidak konstan, tetapi bervariasi baik terhadap waktu (detik sampai abad) maupun terhadap posisi di matahari. Aktivitas matahari berlangsung secara periodik dengan perioda sekitar 11 tahun, yang dikenal sebagai siklus aktivitas matahari. Aktivitas matahari saling berinteraksi dan berinterferensi satu sama lain, menciptakan suatu sistem yang kompleks, dan frekuensinya bervariasi dengan waktu. Aktivitas matahari menyebabkan perubahan-perubahan besar plasma dan populasi partikel-partikel berenergi tinggi, dan perubahan-perubahan ini bertanggung jawab atas terjadinya Cuaca antariksa "*space weather*". Cuaca antariksa terkait dengan kondisi dinamis di lingkungan antariksa, mulai dari matahari, angin surya, magnetosfer dan ionosfer, dan sekarang ini mendapat perhatian serius. Hal ini berkaitan dengan perkembangan teknologi yang ditempatkan di ruang angkasa maupun teknologi telekomunikasi yang memanfaatkan ionosfer sebagai pemantul radio. Seperti cuaca di bumi, di antariksa mengenal fenomena sejenis, seperti angin surya, badai magnet, hujan meteor, serta "musim" matahari aktif dan matahari tenang.

Fenomena yang terjadi di atmosfer bumi, terutama di lapisan magnetosfer dan ionosfer sangat erat kaitannya dengan aktivitas matahari seperti sunspot, flare matahari dan lontaran massa korona (*Coronal Mass Ejection/CME*). Flare matahari adalah ledakan sangat besar yang biasanya terjadi di sekitar sunspot, menghasilkan pancaran energi dan peristiwa proton (*proton event*) sangat besar. Pada saat matahari aktif, terjadi peningkatan energi matahari yang besar. Pertama, peningkatan intensitas radiasi sinar-X dan ekstrim ultraviolet (EUV) matahari yang besar selama peristiwa flare, akan segera menyebabkan peningkatan kerapatan elektron pada seluruh lapisan ionosfer (lapisan D, E dan F). Karena fenomena di ionosfer ini waktunya hampir bersamaan dengan peristiwa aktivitas matahari, maka efeknya disebut efek langsung (*immediately effect*). Variasi kerapatan elektron dengan tiba-tiba ini berbeda untuk lintang yang berbeda, dan gangguan tiba-tiba pada ionosfer secara umum disebut gangguan ionosferik tiba-tiba (*Sudden Ionospheric Disturbances / SID*). Pertambahan kerapatan elektron di daerah E dan F ionosfer sebagai akibat peningkatan sinar-X dan EUV matahari selama flare terjadi telah diamati oleh Donnelly (1969), Thome dan Wagner (1971). Dari hasil pengamatan mereka, tidak semua aktivitas flare menyebabkan SID, tetapi hanya flare-flare yang besar dengan Importansi 3, dan 3+ yang dapat menyebabkan SID, atau hanya flare sinar-X kelas-kelas M dan X. Dalam aplikasi komunikasi radio frekuensi tinggi (HF), sinyal-sinyal radio melalui lapisan ionosfer dipantulkan oleh lapisan ionosfer yang tertinggi (daerah F ionosfer). Peningkatan proses ionosasi di lapisan ionosfer karena flare, akan menimbulkan penyerapan sinyal yang besar di daerah D ionosfer. Akibatnya, transmisi gelombang pendek akan hilang tiba-tiba, yang dikenal sebagai gangguan *Short-Wave Fadeout (SWF)*. Fenomena *fadeout* ini mengikuti pola dari aktivitas flare, dimana waktu mulainya hampir bersamaan dengan waktu mulainya flare di matahari. Ciri-ciri penting dari *SWF* adalah bahwa sirkuit HF yang terpengaruh hanya jika pemantulan sinyal oleh lapisan ionosfer yang berada pada belahan bumi siang hari, sedangkan pada belahan bumi malam hari tidak terpengaruh.

Kedua, peningkatan intensitas radiasi *corpuscular* selama peristiwa flare dan CME, akan mempengaruhi lapisan ionosfer setelah beberapa puluh menit sampai beberapa hari,

sehingga gangguan yang terjadi pada lapisan ionosfer terjadi adalah belakangan (*delayed effect*). Pada fenomena ini antara lain terjadinya absorpsi gelombang radio di daerah kutub (*Polar Black Out*), badai ionosfer (*Ionospheric Storms*), dan badai magnetik (*Magnetic Storms*). Arus partikel-partikel dari corpuscular yang timbul selama flare, dapat memecah medan magnetik bumi secara kuat dalam selang waktu yang sangat singkat, menyebabkan gangguan yang dikenal sebagai badai magnet (*Magnetic Storms*) dan selanjutnya akan memicu timbulnya badai ionosfer (*ionospheric storm*) melalui sistem kopling magnetosfer-ionosfer-atmosfer (Tsurutani *et al.* 1990). Gangguan magnetik meningkat 1-3 hari setelah flare terjadi, dan sangat kuat pada daerah lintang tinggi. Setiap peristiwa badai magnet, biasanya didahului oleh perubahan mendadak intensitas radiasi matahari pada rentang gelombang radio yang dikenal sebagai semburan (*burst*) radio. Semburan radio tipe II mempunyai kaitan erat dengan badai magnetik, dan merupakan indikator adanya perambatan gelombang kejut (*shock waves*). Badai magnetik yang didahului oleh semburan radio tipe II akan mengganggu lapisan kritis F2 ( $f_oF_2$ ), sehingga semburan radio tipe II ini dapat dijadikan sebagai indikator terjadinya gangguan ionosfer. Badai ionosfer (*Ionospheric Storms*) akibat aktivitas matahari dapat berlangsung dalam beberapa hari, sehingga sistem komunikasi radio HF melalui lapisan ionosfer akan terganggu. Selama badai ionosfer berlangsung, sinyal-sinyal pada frekuensi tinggi (3–30MHz) turun sampai tingkat yang sangat rendah, dan bahkan tidak muncul sampai beberapa hari, sehingga belahan bumi siang hari dan terang dan malam hari terpengaruh. Selama badai ionosfer, terjadi perubahan frekuensi kritis ( $f_oF_2$ ) ionosfer yang besar, absorpsi meningkat, akibatnya sinyal-sinyal radio melalui lapisan ionosfer lenyap (*flutter fading*).

Pengaruh flare pada daerah ionosfer juga menimbulkan pertambahan *Total Electron Content* (*Sudden Increase of Total Electron Content/SITEC*) yang bergantung pada lintang (Thome, G.D and L.S.Wagner, 1971). Lintang rendah menunjukkan suatu pertambahan TEC yang lebih besar dibandingkan dengan lintang tinggi. Variasi TEC akan mempengaruhi sinyal *Global Positioning System* (GPS). Seperti telah diketahui bahwa pengetahuan TEC ini sangat berguna untuk berbagai keperluan, seperti ketelitian penentuan posisi dalam sistem navigasi berbasis satelit, telekomunikasi dan aplikasi ruang angkasa lainnya.

Peristiwa CME juga memicu timbulnya badai geomagnetik dan badai ionosfer (Gonzales *et al.*, 1994). CME merupakan gerakan partikel-partikel bermuatan yang dipancarkan dari matahari melalui lubang corona (*Coronal-Holes*), dimana arus listrik yang ditimbulkan mampu merubah karakteristik lapisan ionosfer terutama lapisan ionosfer tertinggi (daerah F2 ionosfer). Fenomena ini akan mengakibatkan perubahan  $f_oF_2$  atau *Maximum Usable Frequency* (MUF) yang dikenal sebagai badai ionosfer.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki pengaruh cuaca antariksa jangka panjang pada parameter ionosfer di atas Indonesia. Sementara pengaruh cuaca antariksa jangka pendek diselidiki berdasarkan data aktivitas matahari ekstrim yang terjadi pada peristiwa Oktober-November 2003. Untuk itu data parameter lapisan ionosfer seperti  $f_oF_2$  dan TEC yang diamati dari Stasiun Pengamat Dirgantara (SPD) Tanjungsari dan Bandung digunakan dalam penelitian ini. Selain itu, diselidiki dampak aktivitas matahari ekstrim terhadap komunikasi frekuensi tinggi dan navigasi berbasis satelit

## 2. Data dan Metode

Data parameter cuaca antariksa yang digunakan dalam penelitian ini adalah bilangan sunspot (R), fluks radio  $F_{10,7}$  cm, Flare, CME yang diunduh dari situs: ([http://sgd.ngdc.noaa.gov/SOLAR\\_DATA/](http://sgd.ngdc.noaa.gov/SOLAR_DATA/)). Sementara data parameter ionosfer yang digunakan adalah, frekuensi kritis lapisan F2 (foF2) ionosfer dari stasiun Tanjungsari ( $6^{\circ}54'24''S; 107^{\circ}24'34''T$ ), dalam selang tahun (1997-2003), dan data TEC di Bandung ( $6,54^{\circ}S; 107,20^{\circ} T$ ) dalam selang 1997-2007 dengan beberapa bulan data kosong. Sedangkan data geomagnetik adalah, berupa indeks Dst, yang diunduh dari situs: <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GEOMAG/>.

Pengaruh cuaca antariksa jangka panjang pada parameter ionosfer di atas Indonesia, dilakukan dengan mengolah data bilangan sunspot, dan fluks radio matahari  $F_{10,7}$  cm harian menjadi rata bulanan selama siklus matahari ke-23 (1996-2007). Demikian juga data parameter ionosfer foF2 ionosfer dan TEC jaman (24 jam setiap hari) diolah menjadi harian, dan bulanan dalam selang waktu data yang tersedia. Selanjutnya, diterapkan analisis korelasi jangka panjang antara bilangan sunspot dan fluks radio matahari  $F_{10,7}$  cm dengan menggunakan metode rata-rata bergerak-12 bulan. Seperti diketahui bahwa fluks radio matahari  $F_{10,7}$  cm merupakan *proxy* dari intensitas radiasi sinar-X dan UV matahari, yang berfungsi sebagai radiasi pengionisasi utama terhadap lapisan ionosfer. Kemudian, dilakukan analisis korelasi jangka panjang antara rata-rata bergerak-12 bulan fluks radio matahari  $F_{10,7}$  cm dan foF2 dan dengan TEC ionosfer.

Pengaruh cuaca antariksa jangka pendek pada parameter ionosfer di atas Indonesia dilakukan dengan menggunakan peristiwa flare dan CME ekstrim yang berdampak lingkungan Bumi, yakni data peristiwa aktivitas matahari ekstrim yang terjadi pada periode Oktober-November 2003. Pada tahap awal dilakukan identifikasi gangguan aktivitas geomagnet dengan cara mem plot data variasi indeks gangguan geomagnet Dst setiap jam yang terkait dengan peristiwa flare dan CME ekstrim Oktober-November 2003. Tahap berikutnya dilakukan analisis gangguan ionosfer yang terkait dengan gangguan geomagnet sebagai akibat dari peristiwa flare dan CME tersebut. Selanjutnya dihitung variasi gangguan foF2 dan TEC setiap jam dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned}\Delta foF2 &= foF2_{obs} - foF2_{med}; \\ \Delta TEC &= TEC_{obs} - TEC_{med}\end{aligned}\quad (3-1)$$

dengan  $\Delta foF2$  dan  $\Delta TEC$  masing-masing adalah deviasi foF2 dan deviasi TEC,  $foF2_{obs}$  dan  $TEC_{obs}$ , adalah nilai-nilai foF2 dan TEC hasil pengamatan setiap jam, sementara  $foF2_{med}$  dan  $TEC_{med}$  adalah nilai-nilai median bulanan foF2 dan TEC dari data yang ditinjau. Selanjutnya bandingkan deviasi foF2 dan deviasi TEC dengan indeks badai geomagnetik Dst selama selang waktu yang ditinjau. Selanjutnya dilakukan analisis gangguan sistem komunikasi frekuensi tinggi (HF) dan sistem navigasi berbasis satelit terkait dengan peristiwa flare dan CME ekstrim Oktober-November 2003.

3. Hasil dan Pembahasan

3-1: Keterkaitan Jangka Panjang antara Bilangan Sunspot dan Fluks Radio Matahari  $F_{10,7}$  Selama Siklus Matahari ke-23 (1996-2007)

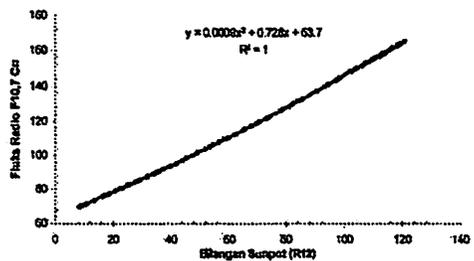
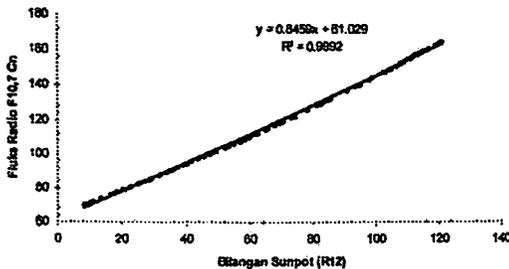
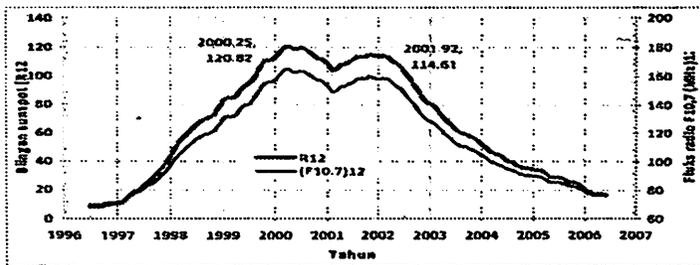
Emisi radio matahari pada panjang gelombang 10,7 centimeter (dinamakan " $F_{10,7}$ ") sering digunakan sebagai proxy dari intensitas sinar-X dan atau sinar ultra violet (UV) sebagai sumber pengionisasi kandungan ionosfer. Untuk itu dilakukan analisis korelasi jangka panjang antara fluks radio matahari ( $F_{10,7}$ ) dan bilangan sunspot ( $R$ ) dengan menggunakan rata-rata bergerak -12 bulan (sering disebut indeks  $R_{12}$ ) selama siklus matahari ke-23 (1996-2007). Indeks  $R_{12}$  didefinisikan sebagai berikut;

$$R_{12} = \frac{1}{12} \left[ \sum_{k=n-5}^{n+5} (R_k) + 0.5(R_{n+6} + R_{n-6}) \right] \dots \dots \dots (3-2)$$

Gambar 3-1, menunjukkan korelasi antara rata-rata bergerak 12 bulan bilangan sunspot ( $R_{12}$ ) dan fluks radio matahari ( $F_{10,7}$ )<sub>12</sub> selama siklus matahari ke-23 (1996-2007). Hasil analisis korelasi jangka panjang antara ( $R_{12}$ ) dan ( $F_{10,7}$ )<sub>12</sub> seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3-1 (panel bawah), tampak dengan jelas memiliki korelasi yang erat antara ke dua parameter dengan persamaan-persamaan sebagai berikut:

Untuk tipe linier :  $(F_{10,7})_{12} = 0,8459 (R_{12}) + 61.629$  (tipe linier)  
 dengan koefisien korelasi,  $R^2 = 0,9992$ ,  $r \approx 1$  dan , (3-3)

Untuk tipe polinom orde dua:  $(F_{10,7})_{12} = 0,0009 (R_{12})^2 + 0,728 (R_{12}) + 63,7$   
 dengan koefisien korelasi  $R^2 \approx 1$

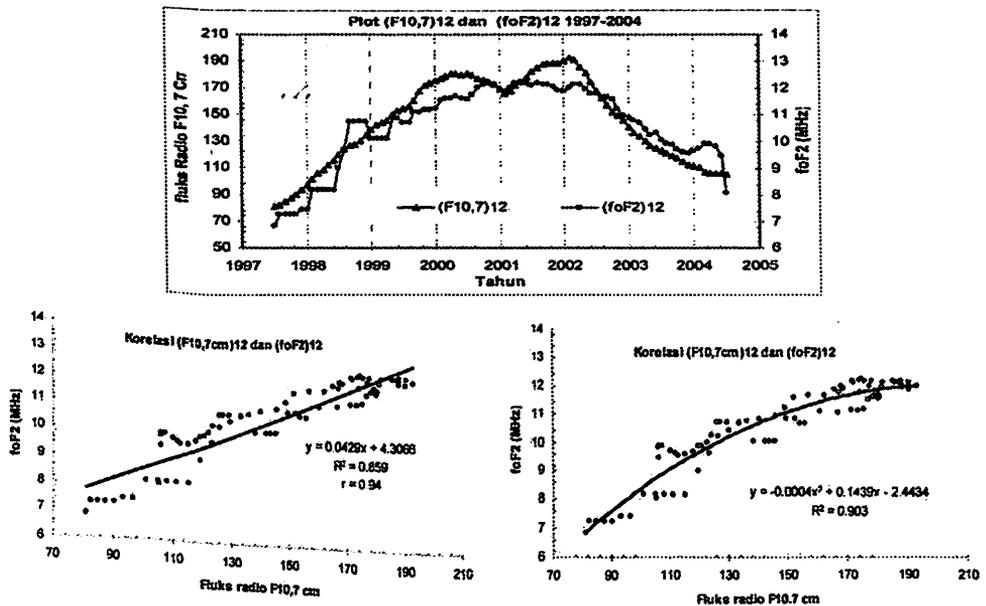


Gambar 3-1: Panel atas; Plot rata-rata bergerak-12 bulan antara bilangan sunspot ( $R_{12}$ ) dan Fluks Radio matahari ( $F_{10,7}$ )<sub>12</sub>. Panel bawah; Korelasi antara antara bilangan sunspot ( $R_{12}$ ) dan Fluks Radio matahari ( $F_{10,7}$ )<sub>12</sub>, masing-masing dengan koefisien korelasi  $R^2 = 0,9992$  (kiri, tipe linier), dan  $R^2 \approx 0,1$  (kanan tipe polinomial orde dua), dengan koefisien korelasi,  $r \approx 1$

Selain itu, dari persamaan-persamaan (3-3) dapat dilihat bahwa ketika matahari relatif tenang (atau  $R_{12} = 0$ ), nilai  $F_{10,7}$  adalah 63,7 SFU (Solar Fluks Unit). Artinya walaupun matahari dalam keadaan tenang, matahari secara kontinu telah memancarkan semburan radio sebesar 63,7 SFU (untuk persamaan tipe polinom). Karena radiasi sinar-X dan EUV matahari tidak dapat diamati dari permukaan bumi, dan datanya belum tersedia dalam deret waktu yang panjang, maka selanjutnya dalam analisis pengaruh cuaca antariksa jangka panjang pada parameter ionosfer, indeks  $(F_{10,7})_{12}$  digunakan sebagai masukan (input) untuk prediksi dan prakiraan parameter ionosfer.

### 3-2. Pengaruh Cuaca Antariksa Jangka Panjang pada Frekuensi Kritis foF2 Ionosfer Tanjunghari dan TEC Bandung Selama Siklus matahari ke-23.

Dengan menggunakan persamaan (3-1) dilakukan analisis korelasi jangka panjang antara data frekuensi kritis foF2Tanjunghari dalam selang waktu tahun (1997-2004) dan aktivitas matahari dengan indeks  $(F_{10,7})_{12}$  yang hasilnya ditunjukkan seperti dalam grafik dalam Gambar 3-2. Gambar 3-2 (panel atas) tampak dengan jelas bahwa data variasi foF2Tanjunghari cenderung mengikuti variasi aktivitas matahari dengan indeks  $(F_{10,7})_{12}$ .



**Gambar 3-2:** Plot (atas) dan korelasi (bawah) antara foF2 Tanjunghari dan  $(F_{10,7})_{12}$  berturut-turut untuk tipe linier dan polinom, masing-masing dengan koefisien korelasi,  $R^2 = 0,859$  (tipe linier, kiri), dan  $r = 0,94$  dan  $R^2 = 0,903$  untuk polinom orde 2 (kanan, bawah).

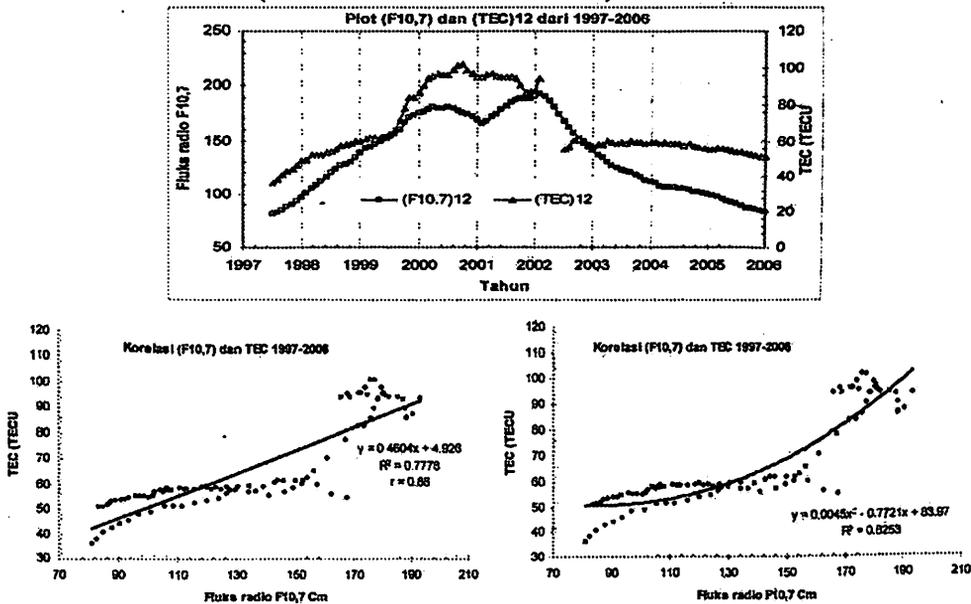
Hasil analisis korelasi seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3-2 (panel bawah) tampak dengan jelas bahwa frekuensi kritis lapisan ionosfer F2 (foF2)Tanjunghari mempunyai korelasi yang erat dengan bilangan  $(F_{10,7})_{12}$  dengan persamaan regresi :

- 1) Untuk tipe linier ;  $foF2_{TS} = 0,0429 (F_{10,7})_{12} + 4,3056$   
 dengan koefisien korelasi,  $R^2 = 0.859$ , dan  $r = 0,94$  dan (3-3)
- 2) Untuk tipe polinom ;  $foF2_{TS} = - 0.0004(F_{10,7})_{12}^2 + 0,1439 (F_{10,7})_{12} - 2,4434$   
 $(R^2 = 0.903)$

Dari koefisien-koefisien korelasi  $R^2$  yang diperoleh, tampak bahwa korelasi tipe polinom pangkat dua relatif lebih baik dari korelasi tipe linier

Dengan cara yang sama, diperoleh korelasi antara aktivitas matahari jangka panjang dan variasi data TEC Bandung dalam selang Maret 1997-Juli 2006 seperti yang ditunjukkan dalam Gambar (3-3). Dari Gambar 3-3 (panel atas) tampak dengan jelas bahwa data variasi TEC Bandung cenderung mengikuti variasi aktivitas matahari dengan indeks  $(F_{10,7})_{12}$  meskipun dengan 1 tahun data yang kosong. Dari analisis korelasi seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3-3 (panel bawah) tampak dengan jelas bahwa data TEC Bandung mempunyai korelasi yang kuat dengan  $(F_{10,7} \text{ cm})_{12}$  dengan persamaan regresi:

- 1) Untuk tipe linier :  $TEC = 0.4604 (F_{10,7})_{12} + 4,926$   
 dengan koefisien korelasi  $R^2 = 0.7778$ , dan  $r = 0,88$ , dan (3-4)
- 2) Untuk tipe polinom orde dua:  $TEC = 0.0045 (F_{10,7})_{12}^2 - 0,7721(F_{10,7})_{12} + 83,97$   
 (koefisien korelasi  $R^2 = 0.8253$ )



**Gambar 3-3:** Korelasi antara TEC Bandung dan  $(F_{10,7})_{12}$  untuk tipe linier dan polinom, masing-masing dengan koefisien korelasi,  $R^2 = 0,7346$  (tipe linier), dan  $r = 0,86$ , serta  $R^2 = 0,8542$  untuk pangkat 2(tipe polinom).

Hasil analisis korelasi jangka panjang antara indeks  $(F_{10,7})_{12}$  dan frekuensi kritis lapisan F2 ( $foF2$ ) ionosfer Tanjungsari selama kurun waktu tahun (1997-2004) dan TEC di Bandung dalam kurun waktu tahun (1997-2006) menunjukkan suatu hubungan yang erat.

Hal itu dibuktikan oleh koefisien korelasi yang tinggi yang diperoleh, masing-masing  $r = 0,94$  ( $R^2 = 0,859$ ) dengan foF2 Tanjungsari, dan  $r = 0,88$  ( $R^2 = 0,778$ ) dengan TEC Bandung. Karena  $R_{12}$  mempunyai kaitan yang erat dengan fluks radio  $F_{10,7}$  Cm, sedangkan  $F_{10,7}$  cm dipakai sebagai proxy radiasi sinar -X dan EUV matahari yang menyebabkan proses ionisasi di lapisan ionosfer. Dengan demikian, penambahan dan pengurangan kerapatan elektron di lapisan ionosfer sangat terkait dengan tingkat aktivitas matahari yang diwakili oleh  $R_{12}$  atau  $(F_{10,7})_{12}$ .

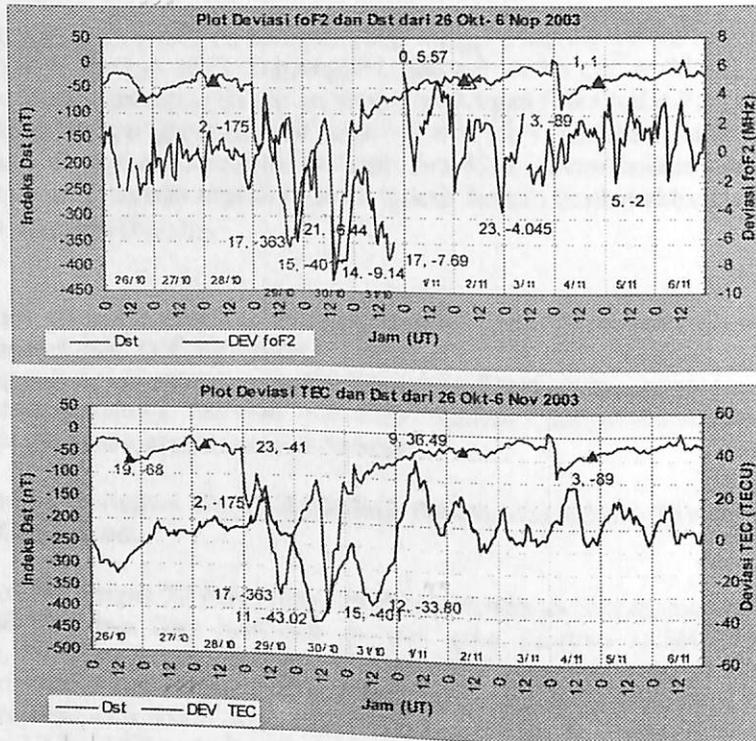
### 3-3. Pengaruh Cuaca Antariksa Jangka Pendek pada Parameter Geomagnet, foF2 Tanjungsari dan TEC Bandung

Analisis pengaruh cuaca antariksa jangka pendek pada parameter geomagnet dan ionosfer digunakan data peristiwa aktivitas matahari ekstrim Oktober–November 2003 yang menyebabkan gangguan geomagnet dan ionosfer.

#### 3-3-1. Pengaruh Peristiwa Cuaca Antariksa Ekstrim Oktober –November 2003 pada Parameter Geomagnet.

Sejak 18 Oktober sampai 20 November, 2003 terjadi letusan-letusan matahari yang sangat kuat, disertai peristiwa flare kuat dan *coronal mass ejections* (CME). Letusan-letusan matahari ini, terutama berasal dari tiga daerah aktif, AR;10484, 10486, dan AR;10488. Diantara peristiwa-peristiwa matahari tersebut, flare terkuat terjadi pada 28 Oktober, 2003 meledak dari sunspot raksasa AR;10486 dengan posisi (S16;E08), kelas X17,2 (energi maksimum =  $17,2 \times 10^{24}$  Watt/m<sup>2</sup>), pukul 11.10 UT, dan pada 29 Oktober, 2003 terjadi lagi flare kelas X10,1. Kemudian pada 2 November, 2003 terjadi flare kelas X8, dan yang paling terkuat sepanjang sejarah pengamatan sinar-X, adalah flare kelas X28 (energi maksimum =  $28 \times 10^{24}$  Watt/m<sup>2</sup>) yang terjadi pada 4 November 2003. Dari analisis, peristiwa-peristiwa flare dan CME ekstrim selama Oktober–November 2003 ini menyebabkan badai geomagnet kuat yang terdiri dari badai geomagnet ekstrim, sedang, dan badai geomagnet lemah seperti yang ditunjukkan dalam Gambar (3-4). Tampak terjadi dua kali badai geomagnet ekstrim (Dst < -250 nT) dengan Dst minimum negatif -363 nT pada 29 Oktober 2003, dan 30 Oktober, 2003 dengan Dst minimum negatif -401 nT. Tetapi sebelumnya pada 29 Oktober sekitar pukul 02:00 UT sudah terjadi badai geomagnet kuat dengan Dst = -175 nT seperti yang terlihat dalam gambar 3-4 panel bawah. Sementara peristiwa flare dan CME pada 2 dan 4 November 2003, hanya menyebabkan badai geomagnet sedang dengan Dst minimum negatif -89 nT.

Walaupun flare, kelas X28 pada 4 November 2003 adalah salah satu flare yang terkuat sepanjang sejarah, tetapi flare ini tidak menyebabkan badai geomagnet kuat. Sumber letusan flare dan CME pada 4 November 2003 yang berasal dari daerah aktif AR; 10486 sudah berada ditepi barat matahari dengan posisi (S19;W83), sehingga energi yang dipancarkan tidak langsung mengarah ke Bumi, akibatnya hanya menyebabkan badai geomagnet sedang. Badai-badai geomagnet tersebut menurut Dabas at al., 2006, adalah tipe badai *Sudden Commwncement* (SC). SC adalah gangguan geomagnet yang disebabkan oleh kenaikan arus magnetopaus karena kompresi mendadak di magnetosfer oleh tekanan dinamik angin surya dan diperkuat oleh IMF (*Interplanetary Magnetic Field*). SC dicirikan dengan kenaikan mendadak dan sesaat dari intensitas medan geomagnet.



**Gambar 3-5 :** Panel atas, plot geomagnetik Dst dengan deviasi foF2 Tanjungsari dalam selang 25 Oktober -8 November 2003 terkait dengan flare, 26 Oktober 2003, X1/1N, pukul 1819 UT, dan *halo*CME, pukul 17.54 UT berasal dari AR 10484, posisi N02W38, flare, X17/4B, pukul 1110 UT dan HCME, pukul 10.54 UT, pada 28 Oktober 2003, dan flare, X28/3B, pukul 19.29 UT, HCME, pukul 1954 UT, dan panel bawah adalah variasi Dst dengan deviasi TEC Bandung ( $\Delta$  dalam gambar menyatakan waktu mulai flare).

Untuk flare dan *CME halo* pada tanggal 2 November 2003 juga berdampak pada foF2 dengan nilai -4,05 MHz. Sedangkan pada geomagnet tidak mengalami gangguan walaupun sempat menurun pada tanggal 4 November 2003 sampai mencapai Dst - 89 nT yang disebabkan oleh peristiwa *CME halo* pada 2 November, 2003 pukul 09.54 UT. Flare dan *CME halo* pada tanggal 4 November 2003 tidak menyebabkan gangguan geomagnetik walaupun peristiwa flare yang terjadi adalah peristiwa aktivitas matahari yang ekstrim (flare X28/3B). Hal ini kemungkinan disebabkan oleh karena sumbernya sudah berada di tepi barat matahari dengan posisi (S19 ;W83). Akibatnya energi yang dilontarkan oleh flare dan *CME* tidak langsung mengarah ke Bumi. Demikian juga, TEC mengalami deviasi maksimum senilai  $\Delta$  TEC = - 43,02 TECU (panel bawah). Deviasi TEC dengan puncak akan menyebabkan kesalahan posisi maksimum pada 30 Oktober 2003, pada pukul 11.00 UT  $0,163 \times 43,02$  TECU = 7,1 meter. Pada 31 Oktober, 2003 sekitar pukul 12:00 UT dengan deviasi TEC sebesar  $\Delta$  TEC = - 33,80 TECU, yang menyebabkan kesalahan posisi =  $0,163 \times 33,80 = -5,51$  meter, dan pada 1 Nopember 2003 sekitar pukul 09.00UT terjadi deviasi

positif sebesar + 36, 45 TECU yang menyebabkan kesalahan posisi sebesar  $0,163 \times 36,45 = + 6,15$  meter.

Hasil analisis pengaruh aktivitas matahari jangka pendek diperoleh bahwa response parameter geomagnet dan ionosfer terhadap peristiwa flare dan CME adalah, peristiwa flare dan CME bisa terjadi bersamaan, atau salah satunya terjadi lebih dulu dengan perbedaan waktu paling lama 1 jam. Peristiwa flare dan CME yang kuat bisa menyebabkan peristiwa badai geomagnet terjadi beberapa kali. Dilihat dari ciri peristiwa badai geomagnet, di antaranya terdapat tipe badai geomagnetik *Sudden Commencement (SC)*, terutama pada peristiwa Flare dan CME yang terjadi pada tahun 2000, 2001 dan 2003. *SC* dicirikan oleh kenaikan mendadak dan sesaat dari intensitas medan geomagnet sebelum fase utama dari badai geomagnetik. *SC* merupakan gangguan geomagnet yang disebabkan oleh kenaikan arus magnetopaus karena kompresi magnetosfer secara mendadak oleh tekanan dinamik angin surya dan diperkuat oleh *IMF (Interplanetary Magnetic Field)* (Kangas dkk., 2001; Clauer, 2006 ; Gustavsson, 2006. *SC* umumnya terjadi bersamaan dengan arah selatan *IMF (IMF Bz-)* dan dicirikan dengan kenaikan mendadak dan cepat intensitas medan geomagnet yang diikuti oleh terjadinya badai geomagnet.

Badai ionosfer yang terjadi bisa positif bisa negatif bergantung dari proses fisiknya. Badai ionosfer positif disebabkan oleh peningkatan proses ionisasi oleh radiasi sinar-X dan EUV matahari, sedangkan badai ionosfer negatif terjadi karena pemanasan ionosfer oleh pemanasan *Joule*. Sudah sangat diketahui bahwa radiasi sinar -X dan EUV matahari adalah merupakan kontributor terbesar terhadap pemanasan atmosfer bagian atas. Menurut *Knipp et al.*, (2004), secara khusus radiasi *EUUV* matahari memberikan energi sekitar 80% dari masukan energi total pada atmosfer bagian atas, sedangkan sisa masukan energi sebesar 20 % berasal dari pemanasan *Joule* atau pemanasan partikel-partikel energetik dari matahari. *Rhoden et al.*, (2000) melaporkan bahwa energi *Joule* terkait erat dengan tingkat aktivitas geomagnet, dan mencatat bahwa pertambahan kerapatan atmosfer sekitar 134% untuk memberikan response terhadap pertambahan indeks geomagnetik *Kp* dari 1 ke 6. dengan demikian, pemanasan *Joule* mempunyai peranan penting terhadap variasi kerapatan atmosfer atas selama gangguan geomagnet, kemudian mempengaruhi lapisan ionosfer.

Hasil analisis juga menunjukkan bahwa tidak semua flare dan CME menyebabkan gangguan medan geomagnet dan ionosfer (*foF2*). Flare dan CME yang posisinya berada pada tepi piringan matahari tidak akan mempengaruhi medan geomagnet, tetapi hampir selalu menyebabkan gangguan pada frekuensi kritis lapisan F2 (*foF2*). Badai ionosfer yang terjadi sebagai akibat dari peristiwa flare dan CME bervariasi berkisar dengan deviasi *foF2* lebih besar dari - 2 MHz sampai dengan - 9, 14 MHz (kasus flare ekstrim 28 Oktober 2003). Sementara deviasi TEC maksimum -43,5) TECU, yang menyebabkan kesalahan posisi berkisar antara (5,51 -7,1) meter. Deviasi *foF2* dan deviasi TEC selama flare dan CME terjadi, akan menyebabkan gangguan pada sistem komunikasi radio HF, dan sistem navigasi berbasis satelit.

#### 4. Kesimpulan

Hasil analisis pengaruh cuaca antariksa jangka panjang pada *foF2* Tanjungsari, dan TEC Bandung dalam kurun waktu data yang tersedia tampak bahwa perilaku ionosfer di atas Indonesia selama siklus matahari ke-23, memiliki korelasi yang kuat dengan aktivitas

matahari dengan indeks fluks radio matahari  $F_{10,7}$  (rata-rata bergerak 12 bulan  $F_{10,7}$ ). Sementara  $F_{10,7}$  mempunyai korelasi yang sangat kuat dengan rata-rata bergerak 12 bulan bilangan sunspot ( $R_{12}$ ) dengan koefisien korelasi  $r$  mendekati 1. Dalam aplikasi ionosfer sebagai lapisan pemantul komunikasi frekuensi tinggi, bilangan sunspot  $R_{12}$  dan atau  $(F_{10,7})_{12}$  adalah prediktor yang bermanfaat untuk perilaku ionosfer; jika bilangan sunspot atau fluks radio  $F_{10,7}$  bertambah (sebanding dengan intensitas radiasi matahari), maka proses ionisasi di ionosfer meningkat, akibatnya kerapatan elektron/frekuensi plasma ionosfer meningkat. Dari harga-harga koefisien korelasi  $R^2$  yang diperoleh untuk frekuensi kritis foF2 Tanjungsari dan TEC Bandung dikaitkan dengan  $(F_{10,7})_{12}$ , persamaan regresi polinom lebih baik dari persamaan regresi linier.

Peristiwa flare dan CME yang mempengaruhi parameter medan geomagnet dan ionosfer bergantung kepada kuatnya flare, tipe dari CME, posisinya di matahari. Gangguan flare dan CME pada medan geomagnet dan ionosfer berlangsung dari beberapa jam hingga beberapa hari. Gangguan pada medan geomagnet lebih lama daripada gangguan pada ionosfer. Badai geomagnet dan badai ionosfer ini akan menyebabkan gangguan pada sistem komunikasi frekuensi tinggi dan sistem navigasi berbasis satelit.

#### Ucapan Terimakasih

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada Drs. Buldan Muslim dan Aries Kurniawan ST, yang memberikan data foF2 Tanjungsari dan TEC Bandung sehingga penelitian ini dapat dilakukan.

#### Daftar Pustaka

- Clauer, 2006, *The Geomagnetic Storm-Time Response to Different Solar Wind Driving Conditions*, ILWS Workshop 2006, GOA, February 19-20, 2006.
- Donnelly R.F., 1969, *Contribution of X-Ray and EUV burst of Solar flares to Sudden Frequency Deviation*, Journal Geophysica Research 74, 1873.
- Geomagnetic Activity*, Planet, Space Sci., 38, 109.
- Gonzales, W. D., J. A. Joselyn, Y. Kmide, H. W. Kroehl, G. Rostoker, B. Tsurutani, and V. M. Vasyliunas, 1994, *What is a Geomagnetic Storm?*, J. Geophys. Res., 99, 5771.
- Kangas, J., J. Kultima, A. Guglielmi, A. Patapov and K. Hayashi., 2001, *Impact of Interplanetary Shock on the ULF Wave Activity : A case Study of Storm Sudden Commencement on Sept 22, 1999*, Earth Planet Space, 53, 1177-1182.
- Knipp, D. J., W. K. Tobiska, and B. A. Emery, 2004, *Direct and indirect thermospheric Heating sources for solar cycles 21-23*, Sol. Phys., 224, 495.
- Rhoden, E. A., J. M. Forbes, and F. A. Marcos, 2000, *The influence of geomagnetic and Solar variabilities on lower thermosphere density*, J. Atmos. Terr. Phys., 62, 999.
- Thome, G.D and L.S. Wagner, 1971, *Electron Density Enhancements in the E dan F regions of the Ionosphere during Solar Flares*, Journal Geophysical Research, 76, 6883.
- Tsurutani, B. T., B. E. Goldstein, E. J. Smith, W. D. Gonzales, F. Tang, S. I. Akasofu, and R. R. anderson, 1990, *The Interplanetary and Solar Causes of*