

MODEL BADAI IONOSFER INDONESIA TERKAIT BADAI GEOMAGNET (INDONESIA IONOSPHERIC STORM MODEL RELATED TO GEOMAGNETIC STORM)

**Anwar Santoso¹, Mira Juangsih, Sri Ekawati, Iyus Edi Rusnadi, Anton Winarko,
Siska Filawati, Dadang Nurmali**

Pusat Sains Antariksa

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jalan Dr. Djunjunan 133 Bandung 40173

¹email: anwar.santoso@lapan.go.id; war92_2000@yahoo.com

Diterima 21 April 2017; Direvisi 12 Desember 2017; Disetujui 9 Januari 2018

ABSTRACT

Knowledge about the ionospheric response to the geomagnetic storms is needed to support SWIFtS activity in Space Science Center-LAPAN. However, it is difficult to predict its behavior. As an approach, it needs a model of the ionospheric response to geomagnetic storms. In this paper, the modeling of the Indonesia ionospheric storms to the geomagnetic storm was done by modifying the global empirical models developed by Araujo-Pradere. By using ap index data, Dst index, and foF2 ionosphere from BPAA Sumedang of 2005-2015, it was obtained the Indonesia ionospheric storms model related to the geomagnetic storm. The analysis result showed that the Sumedang ionospheric storms model had a deviation or error < 40% of the data. Therefore it can be concluded that this models can be used to support the SWIFtS activity in Space Science Center-LAPAN for future space weather conditions.

Keywords: foF2 ionospheric response, geomagnetic storm, Indonesia ionospheric storm model

ABSTRAK

Pengetahuan tentang respon ionosfer terhadap badai geomagnet sangat diperlukan untuk mendukung kegiatan SWIFtS di Pusat Sains Antariksa-LAPAN. Namun, sulit diprediksi perilakunya. Sebagai pendekatan, diperlukan sebuah model respon ionosfer terhadap badai geomagnet. Dalam makalah ini, dilakukan pemodelan badai ionosfer Indonesia terkait badai geomagnet dengan memodifikasi model empiris global yang telah dikembangkan oleh Araujo-Pradere. Dengan menggunakan data indeks a_p , indeks Dst dan foF2 ionosfer BPAA Sumedang tahun 2005-2015 diperoleh model badai ionosfer regional Indonesia terhadap badai geomagnet. Dari analisis disimpulkan bahwa model badai ionosfer Sumedang tersebut memiliki simpangan atau kesalahan < 40% terhadap data. Hal ini menunjukkan bahwa model badai ionosfer Sumedang tersebut dapat dipergunakan untuk mendukung kegiatan SWIFtS di Pusat Sains Antariksa-LAPAN sebagai bahan pertimbangan dalam memprediksi kondisi cuaca antariksa akan datang.

Kata Kunci: *respon foF2 ionosfer, badai geomagnet, model badai ionosfer Sumedang*

1 PENDAHULUAN

Seperti diketahui bahwa Matahari merupakan sumber penggerak cuaca antariksa. Salah satu fenomenadi Matahari yang menjadi sumber penggerak cuaca antariksa adalah *Coronal Mass Ejection* (CME) atau dinamakan juga peristiwa ledakan Matahari. Ketika CME terjadi, energi dan partikel-partikel bermuatan terbawa oleh angin surya (*solar wind*) akan diinjeksikan ke dalam magnetosfer melalui mekanisme rekoneksi. Energi dan momentum tersebut akan menimbulkan perubahan sistem arus listrik di dalam magnetosfer dan ionosfer (Russell, 2006; Gopalswamy, 2009). Kopliling magnetosfer-ionosfer sangat perlu dipahami karena gangguan medan magnet menjalar dari ruang antar-planet, melewati magnetosfer dan ionosfer hingga mencapai permukaan Bumi.

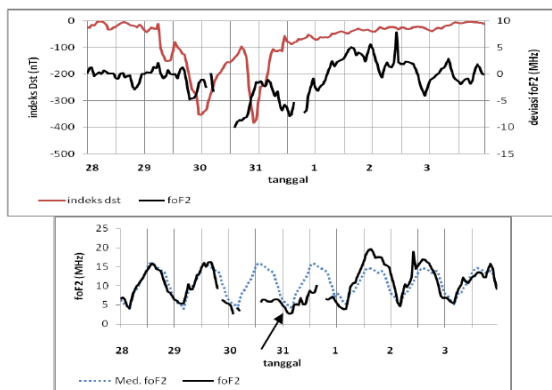
Perilaku ionosfer selama kondisi geomagnet tenang telah diketahui dengan baik dan bahkan telah dimodelkan oleh *International Reference Ionosphere* (IRI) (Bilitza, 1990). Namun, pengetahuan tentang respon ionosfer selama badai geomagnet dan proses-proses yang terkait di dalamnya tetap belum sepenuhnya dipahami. Walaupun belum sepenuhnya dipahami, beberapa studi yang dikhususkan untuk pemodelan (empiris dan numerik) respon ionosfer terhadap badai geomagnet telah cukup

banyak dilakukan. Salah satunya adalah model empiris badai ionosfer terhadap badai geomagnet oleh Araujo-Pardere *et al.* (2002) yang dalam makalah ini akan diadopsi sebagai model badai ionosfer regional Indonesia terhadap badai geomagnet. Penggunaan pemodelan numerik untuk deskripsi respon ionosfer terhadap badai geomagnet memungkinkan penyelidikan mekanisme fisis yang bertanggung jawab atas gangguan ionosfer. Sedangkan penggunaan pemodelan empiris respon ionosfer terhadap badai geomagnet berguna untuk keperluan praktis.

Badai ionosfer merupakan gangguan terhadap ionosfer sebagai respon dari badai geomagnet. Respon ionosfer tidak terjadi secara langsung melainkan melalui proses kopliling magnetosfer-ionosfer. Rastogi (1999), dalam Yatini *et al.*, (2009) telah melaporkan bahwa selang waktu antara munculnya badai geomagnet dan gangguan ionosfer adalah sekitar 20 jam. Lusiani *et al.* (2011) menggunakan data indeks Dst dan foF2 Loka Pengamatan Dirgantara (LPD) LAPAN Sumedang bulan Oktober-November 2003 (Gambar 1-1), juga telah melaporkan bahwa semakin kuat badai geomagnet, semakin cepat respon dari ionosfer untuk terjadinya badai geomagnet ionosfer. Badai ionosfer dapat terjadi dalam selang waktu satu sampai 4 jam

setelah kejadian badai geomagnet kuat. Badai geomagnet menengah mengakibatkan badai ionosfer dalam selang waktu satu sampai 10 jam setelah badai geomagnet menengah tersebut. Sedangkan badai geomagnet lemah mengakibatkan badai ionosfer yang terjadi dalam selang waktu lebih dari 10 jam setelah badai geomagnet lemah tersebut.

Zhao *et al.* (2009) menyatakan bahwa panjangnya durasi waktu tersebut berkaitan dengan waktu berlangsungnya proses berkurang dan bertambahnya rasio (O/N₂). Selama fase pemulihan, badai negatif teramati di lintang menengah-rendah dan bertahan selama 2-3 hari, disebabkan oleh berkurangnya (O/N₂).



Gambar 1-1: Variasi indeks Dst terhadap deviasi foF2 pada rentang waktu 28 Oktober – 3 November 2003 (*atas*) Variasi nilai foF2 (garis penuh) terhadap mediannya (garis putus-putus) dan tanda panah menunjukkan kejadian badai ionosfer negatif (*bawah*) (Lusiani *et al.*, 2011)

Kondisi ionosfer setelah badai diperlukan untuk mendukung kegiatan harian *Space Weather Information and Forecast Services* (SWIFtS). Kondisi ionosfer yang dimaksud di antaranya depresi foF2 terhadap mediannya, durasi waktu berlangsungnya gangguan ionosfer (onset dan maksimum gangguan) akibat badai geomagnet.

Dalam makalah ini, validasi respon ionosfer Indonesia terhadap badai geomagnet dengan mengadopsi model

dari Araujo-Pardere *et al.* (2002) menggunakan masukan indeks Dst atau indeks ap tahun 2005-2015 dan pemodelan statistik respon ionosfer Sumedang (foF2_{SMD}) terhadap badai geomagnet (Dst). Tujuan dari pemodelan badai ionosfer ini adalah mendapatkan model badai ionosfer di Indonesia menggunakan data Dst dan foF2 Sumedang. Hasilnya akan digunakan untuk menunjang kegiatan SWIFtS di Pusat Sains Antariksa, Desain-LAPAN.

2 DATA DAN METODE

2.1 Data

Data medan geomagnet (indeks K) dan foF2 ionosfer dari BPAA Sumedang (BPAA SMD: 6,91° LS; 106,83° BT koordinat geografis atau 16,55° LS; BT 179,95° koordinat magnet) serta indeks Dst dan indeks ap tahun 2005 sampai 2015 kecuali tahun 2006 dan 2009 karena data geomagnet kosong.

Adapun level gangguan ionosfer (Badai ionosfer) yang didefinisikan dalam kegiatan SWIFtS diberikan dalam Tabel 2-1.

Tabel 2-1: DAFTAR KLASIFIKASI TINGKAT GANGGUAN IONOSFER (foF2) DALAM SWIFtS PUSAINSA

| No | Kondisi Ionosfer | Φ | Durasi Berlangsungnya |
|----|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | Quite (Tenang) | $-30\% < \Phi < 30\%$ | |
| 2 | Minor (mulai terganggu) | $\Phi > 30\%$ | <10 menit |
| 3 | Moderate (badai lemah) | $\Phi > 30\%$ | <60 menit |
| 4 | Strong (Badai Kuat) | $\Phi > 30\%$ | <120 menit |
| 5 | Severe storm (Badai sangat kuat) | $\Phi > 30\%$ | <240 menit |

Indeks Dst untuk identifikasi kejadian badai geomagnet kelas moderat (Dst < -79,3 nT) dan sekaligus untuk masukan pemodifikasian model Araujo-Pradere *et al.* (2002). Klasifikasi badai

geomagnet berdasarkan indeks Dst yang menjadi standard kegiatan SWIFts diberikan pada Tabel 2-2.

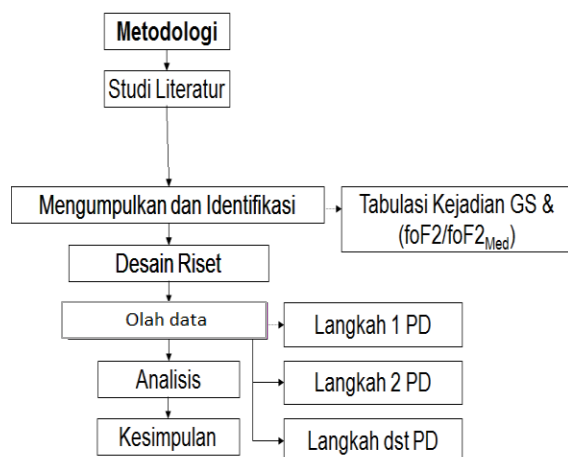
Tabel 2-2: KLASIFIKASI INTENSITAS BADAI GEOMAGNET BERDASARKAN INDEKS Dst

| No | Kondisi Geomagnet | Indeks K | Durasi Berlangsungnya |
|----|----------------------------------|----------|-----------------------|
| 1 | Quite (Tenang) | 1-3 | ≤ 25,4 |
| 2 | Active (aktif) | 4 | -25,5 – (-44,9) |
| 3 | Minor Storm (badai lemah) | 5 | -45 – (-79,2) |
| 4 | Moderate storm (Badai sedang) | 6 | -79,3 – (-139,6) |
| 5 | Major storm (Badai kuat) | 7 | -139,7 – (-245,9) |
| 6 | Severe storm (Badai sangat kuat) | ≥ 8 | ≥ 246 |

2.2 Metodologi

2.2.1 Model empiris respon ionosfer (foF2) terhadap badai geomagnet

Alur tahapan pekerjaan yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2-1.



Gambar 2-1: Diagram alur tahapan metodologi kegiatan

Model empiris yang paling banyak digunakan adalah IRI, model standar empiris ionosfer, awalnya dibangun dengan berdasarkan data tahun 1950-1975 dan kemudian diperbarui secara berkala. Untuk lokasi tertentu, waktu dan

tanggal, IRI menggambarkan kerapatan elektron, suhu elektron, suhu ion, dan komposisi ion di ketinggian dari sekitar 50 km ke sekitar 2000 km (seperti halnya juga kandungan total elektron (TEC). Hal Ini memberikan rata-rata bulanan ionosfer non-aurora saat kondisi geomagnet tenang (Rawer *et al.*, 1978). Versi terbaru dari IRI yakni IRI 2000 (Bilitza, 2001) meliputi model STORM sebagai koreksi untuk kondisi terganggu. Riset terbaru telah memberikan beberapa wawasan dan pemahaman terhadap beberapa dependensi respon ionosfer terhadap aktivitas geomagnet seperti yang diharapkan (Rodger *et al.*, 1989; Fuller-Rowell *et al.*, 1996). Hasil penelitian menunjukkan bahwa ionosfer merespon perubahan komposisi termosfer. Berdasarkan penelitian ini maka dikembangkan model empiris respon ionosfer terhadap badai geomagnet dengan input indeks geomagnet a_p (Araujo-Pradere dan Fuller-Rowell, 2000). Algoritma model empiris tersebut diberikan oleh Fuller-Rowell *et al.* (1998) dalam Araujo-Pradere *et al.* (2002):

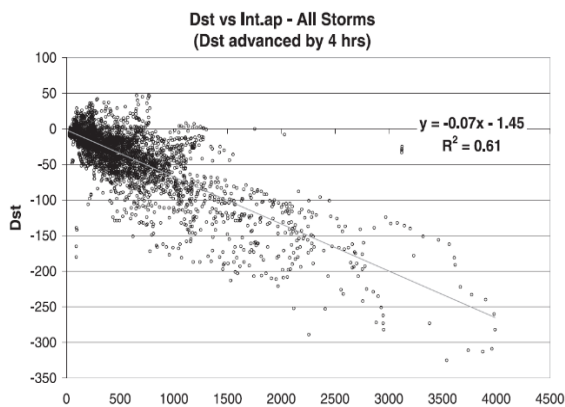
$$\Phi = \{a_0 + a_1X(t_0) + a_2X^2(t_0) + a_3X^3(t_0)\} \{1 + a_4 \sin(LT + \alpha)\} \quad (2-1)$$

$$X(t_0) = \int F(\tau) P(t_0 - \tau) d\tau \quad (2-2)$$

Dengan Φ adalah foF2 pengamatan dibagi foF2 median bulanan (foF2 pengamatan/foF2 median bulanan), $F(\tau)$ adalah fungsi pembobotan filter indeks a_p dan $P(t_0 - \tau)$ adalah jumlah indeks a_p dalam 33 jam sebelumnya. Koefisien a_0 , a_1 , a_2 , dan a_3 diatur untuk menyesuaikan hubungan non-linear antara respon ionosfer dan integral indeks geomagnet a_p .

Model empiris badai ionosfer terhadap badai geomagnet yang dibuat oleh Araujo-Pradere *et al.* (2002) merupakan model badai ionosfer lintang menengah-tinggi karena dibangun menggunakan indeks a_p . Namun, mereka juga memberikan konversi indeks a_p ke indeks Dst (lihat Gambar 2-2)

sehingga dapat diadopsi sebagai model badai ionosfer lintang rendah (masuk indeks Dst). Dengan demikian, model empiris badai ionosfer tersebut dapat dikategorikan sebagai model empiris badai ionosfer global. Dalam Araujo-Pradere *et al.* (2002) juga dinyatakan bahwa untuk meningkatkan akurasi model di lintang menengah maka musim panas dan *equinox* patut dipertimbangkan sebagai faktor koreksi. Tetapi, saat musim dingin dan di lintang rendah, model tidak menunjukkan peningkatan secara signifikan. Untuk mendapatkan peningkatan akurasi yang signifikan di lintang rendah dan ekuator maka disarankan bahwa input model yakni a_p (indeks aktivitas geomagnet lintang menengah) ditransformasi ke dalam indeks Dst dan atau indeks a_k (nilai konversi indeks K dalam satuan nT). Hubungan antara indeks Dst dan integral indeks a_p diberikan pada Gambar 2-2 (Araujo-Pradere *et al.*, 2002).



Gambar 2-2: Korelasi antara indeks Dst dan a_p terfilter (integral a_p)

2.2.2 Respon ionosfer (foF2) terhadap badai geomagnet

Pengaruh badai geomagnet terhadap ionosfer di ekuator dan lintang rendah memiliki fitur yang unik. Hal ini diduga dipengaruhi oleh modifikasi pada *Equatorial ionization anomaly* (EIA), *Equatorial spread-F* (ESF) dan *Equatorial Electrojet* (EEJ) yang diproduksi oleh: (1) gangguan medan listrik yang dihasilkan dari penetrasi medan listrik lintang tinggi menuju ekuator dengan

cepat, (2) gangguan dinamo yang digerakkan oleh peningkatan sirkulasi termosfer global yang dihasilkan dari masuknya energi pada lintang tinggi, dan (3) gangguan angin (zonal dan meridional) yang memodifikasi dinamika termosfer ekuator. Di bawah pengaruh penetrasi yang cepat medan listrik dan gangguan medan listrik dinamo, *Equatorial Ionization Anomaly* (EIA) dapat mengalami modifikasi drastis yang menghasilkan gangguan ionosfer besar di lintang rendah (Abdu *et al.*, 1991; Mukherjee *et al.*, 2010).

Pengaruh badai geomagnet pada ionosfer dapat berupa naiknya nilai foF2 atau turunnya nilai foF2. Naik atau turunnya nilai foF2 ionosfer dari mediannya tersebut dinamakan badai ionosfer. Naiknya nilai foF2 ionosfer dari mediannya dinamakan badai ionosfer positif dan sebaliknya dinamakan badai ionosfer negatif. Pembentukan badai ionosfer positif atau negatif sangat dipengaruhi oleh EEJ, perubahan angin dan komposisi udara netral, yang mengakibatkan perubahan tingkat rekombinasi dan ionisasi. Diketahui, bahwa distribusi plasma di ekuator dan lintang rendah terutama dikontrol oleh drift $E \times B$ melalui *plasma fountain* yang bertanggungjawab terhadap EIA. Selama badai geomagnet, gangguan medan listrik dapat meningkatkan atau menghambat EIA sehingga mengendalikan tingkat rekombinasi dan ionisasi. Respon ionosfer terhadap badai geomagnet dapat dikategorikan menjadi dua yakni deviasi (Φ) adalah nilai foF2 ionosfer terdepresi terhadap mediannya yang dirumuskan sebagai:

$$\Phi_{SMD} = \frac{foF2 \text{ data}}{\text{median } foF2} \quad (2-3)$$

Sedangkan gangguan foF2 ionosfer dilambangkan dengan (δ) dirumuskan menggunakan formulasi:

$$\delta foF2 \text{ SMD} (\%) = \left(\frac{(foF2_{Obs-SMD} - foF2_{Med-SMD})}{foF2_{Med-SMD}} \right) \times 100\% \quad (2-4)$$

Dengan foF2_{Obs-SMD} adalah nilai foF2 ionosfer pengamatan di BPAA Sumedang dan foF2_{Med-SMD} adalah nilai median bulanan foF2 ionosfer di BPAA Sumedang.

Persamaan Araujo-Pradere dan Fuller-Rowell

$$\Phi = \{a_0 + a_1 X(t_0) + a_2 X^2(t_0) + a_3 X^3(t_0)\} \cdot \{1 + a_4 \sin(LT + \alpha)\} \quad (2-5)$$

Karena a₄ sudah ditentukan dan nilai LT dan α merupakan konstanta maka C = 1 + a₄ sin(LT + α), sehingga persamaan (2-5) akan menjadi,

$$\Phi = \{a_0 + a_1 X(t_0) + a_2 X^2(t_0) + a_3 X^3(t_0)\} \cdot C \quad (2-6)$$

X merupakan penjumlahan 33 data indeks Dst. Terdapat empat konstanta yang akan dicari a₀, a₁, a₂, dan a₃, jadi dibutuhkan empat persamaan Φ,

$$\begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^0 & X_1^1 & X_1^2 & X_1^3 \\ X_2^0 & X_2^1 & X_2^2 & X_2^3 \\ X_3^0 & X_3^1 & X_3^2 & X_3^3 \\ X_4^0 & X_4^1 & X_4^2 & X_4^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} C \quad (2-7)$$

Penjabaran persamaan matrik (2-7),

$$\Phi_1 = [a_0 X_1^0 + a_1 X_1^1 + a_2 X_1^2 + a_3 X_1^3] C \quad (2-8a)$$

$$\Phi_2 = [a_0 X_2^0 + a_1 X_2^1 + a_2 X_2^2 + a_3 X_2^3] C \quad (2-8b)$$

$$\Phi_3 = [a_0 X_3^0 + a_1 X_3^1 + a_2 X_3^2 + a_3 X_3^3] C \quad (2-8c)$$

$$\Phi_4 = [a_0 X_4^0 + a_1 X_4^1 + a_2 X_4^2 + a_3 X_4^3] C \quad (2-8d)$$

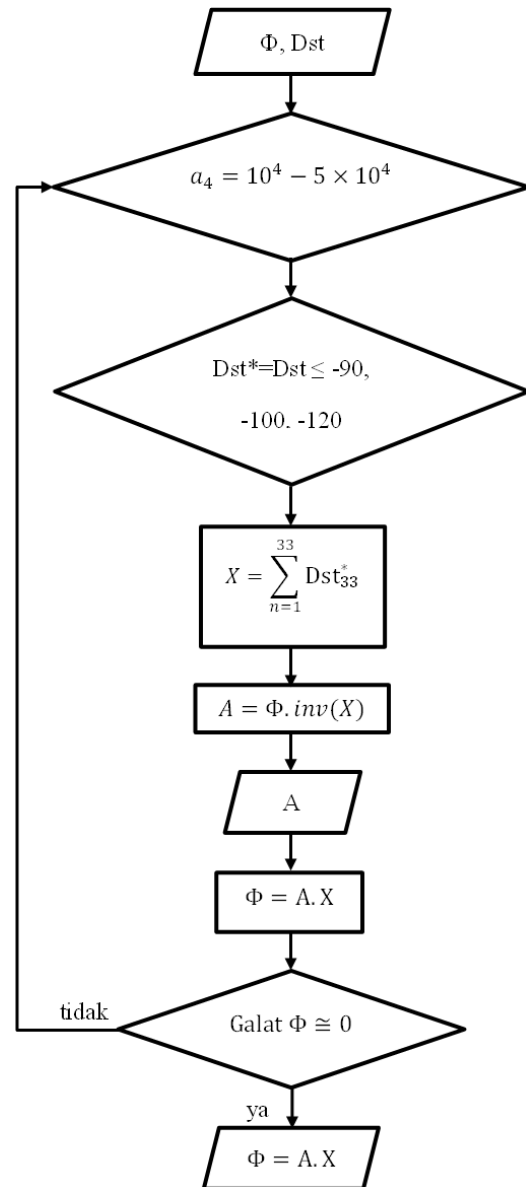
Nilai a₀, a₁, a₂, dan a₃ merupakan hasil eliminasi persamaan (2-8a), (2-8b), (2-8c), dan (2-8d). berdasarkan persamaan (2-7), nilai a₀, a₁, a₂, dan a₃ dapat dihitung dengan menggunakan invers nilai X.

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{C} \left(inv \begin{bmatrix} X_1^0 & X_1^1 & X_1^2 & X_1^3 \\ X_2^0 & X_2^1 & X_2^2 & X_2^3 \\ X_3^0 & X_3^1 & X_3^2 & X_3^3 \\ X_4^0 & X_4^1 & X_4^2 & X_4^3 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

Dari persamaan (2-9) dapat diketahui nilai a₀, a₁, a₂, dan a₃.

Konstanta a₀, a₁, a₂, dan a₃ diperoleh dengan melakukan injeksi nilai Φ dan indeks ap perkejadian badai geomagnet untuk a₄ yang ditetapkan. Kemudian ini diiterasi sampai diperoleh nilai a₀, a₁, a₂, dan a₃.

Sedangkan tahapan pengolahan data, alurnya ditunjukkan pada Gambar 2-3.



Gambar 2-3: Diagram alur pengolahan data untuk bahan analisis

Langkah-langkah pengolahan datanya sebagai berikut:

- *Input* data Dst dan Φ tahun 2005-2015,
- Menentukan nilai konstanta a_4 . Nilai a_4 ditentukan dari awal agar memudahkan perhitungan. Berdasarkan persamaan (2-5), nilai a_4 mempengaruhi semua konstanta, sehingga dapat dimisalkan dengan nilai tertentu yang selanjutnya didapatkan konstanta a_0, a_1, a_2 , dan a_3 ,
- Mencari tanggal terjadi badai geomagnet dengan mengkategorikan data indeks Dst $\leq -90, -100, -120$. Dengan tanggal yang sama nilai Φ juga digunakan,
- Menjumlahkan data indeks Dst minimum yang ditemukan dengan data indeks Dst 33 jam sebelum indeks Dst minimum,
- Menghitung nilai konstanta a_0, a_1, a_2 , dan a_3 dengan perhitungan matriks persamaan (2-9),
- Didapatkan nilai konstanta a_0, a_1, a_2 , dan a_3 ,
- Untuk mengetahui apakah nilai konstanta a_0, a_1, a_2 , dan a_3 tepat, maka dilakukan perhitungan ulang nilai konstanta a_0, a_1, a_2 , dan a_3 dengan indeks Dst pada tanggal yang sama apakah akan menghasilkan gangguan Φ dengan nilai yang mendekati,
- Menghitung besar galat Φ antara data dengan hasil perhitungan. Jika galat jauh dari nilai nol, maka perhitungan dimulai dari awal penentuan konstanta a_4 . Namun, jika galat mendekati nol (sangat kecil) maka nilai konstanta a_0, a_1, a_2 , dan a_3 tersebut yang akan dipersiapkan sebagai model.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Model Numerik Φ_{Model} dan δ_{foF2} BPAA Sumedang

Dengan memasukkan nilai Φ BPAA Sumedang pengamatan tahun 2005-2015 dan nilai konstanta $a_4 = 1$ sampai 50000 serta Dst(ap) atau Dst* dan Dst_Kyoto ke dalam Persamaan (2-1) maka diperoleh konstanta a_0, a_1, a_2 dan a_3 , seperti ditunjukkan pada Tabel 3-1.

Tabel 3-1: NILAI KONSTANTA a_0, a_1, a_2, a_3 DAN a_4 YANG DIHITUNG MENGGUNAKAN Dst_Kyoto (Dst*) DAN Φ BPAA SUMEDANG TAHUN 2005-2015

$X = Dst*(50) = -0,07 (JAp) - 145$

| | $a_4 = 10000$ | $a_4 = 11000$ | $a_4 = 12000$ |
|-------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| a_0 | -0,0415 | $a_0 = -0,0377$ | $a_0 = -0,0346$ |
| a_1 | -0,0012 | $a_1 = -0,0011$ | $a_1 = 0,0010$ |
| a_2 | $-1,095 \times 10^{-5}$ | $a_2 = -9,9542 \times 10^{-6}$ | $a_2 = -9,1245 \times 10^{-6}$ |
| a_3 | $-3,0753 \times 10^{-8}$ | $a_3 = -2,7956 \times 10^{-8}$ | $a_3 = -2,5626 \times 10^{-8}$ |
| | $a_4 = 18000$ | $a_4 = 19000$ | $a_4 = 20000$ |
| a_0 | -0,0230 | $a_0 = -0,0218$ | $a_0 = -0,0207$ |
| a_1 | $-6,6778 \times 10^{-4}$ | $a_1 = -6,3263 \times 10^{-4}$ | $a_1 = -6,0099 \times 10^{-4}$ |
| a_2 | $-6,0824 \times 10^{-6}$ | $a_2 = -5,7622 \times 10^{-6}$ | $a_2 = -5,4740 \times 10^{-6}$ |
| a_3 | $-1,7082 \times 10^{-8}$ | $a_3 = -1,6183 \times 10^{-8}$ | $a_3 = -1,5374 \times 10^{-8}$ |

Jika nilai-nilai konstanta a_0, a_1, a_2, a_3 , dan a_4 pada Tabel 3-1 tersebut diterapkan pada Persamaan (2-1) Araujo-Pradere *et al.* (2002) akan menjadi model Φ_{Model} Araujo-Pradere *et al.* (2002) modifikasi. Contoh persamaan model Φ_{Model} tersebut ditampilkan sebagai berikut:

$$\Phi_{Model} = (0,0017 + ((8,9587 \times 10^{-6}) Dst_{Kyoto}) + ((1,1244 \times 10^{-8}) (Dst_{Kyoto})^2) + ((4,0494 \times 10^{-12}) (Dst_{Kyoto})^3)) \times (1 + 25000 \times (-0,28402)) \quad (3-1)$$

$$\Phi_{Model} = (0,0017 + ((0,000008614) Dst_{Kyoto}) + ((1,0812 \times 10^{-8}) (Dst_{Kyoto})^2) + ((3,8937 \times 10^{-12}) (Dst_{Kyoto})^3)) (1 + 26000 \times (-0,28402)) \quad (3-2)$$

$$\Phi_{Model} = (0,0016 + ((0,000008295) Dst_{Kyoto}) + ((1,0411 \times 10^{-8}) (Dst_{Kyoto})^2) + ((3,7494 \times 10^{-12}) (Dst_{Kyoto})^3)) \times (1 + 27000 \times (-0,28402)) \quad (3-3)$$

$$\Phi_{Model} = (0,0016 + ((7,9987 \times 10^{-6}) Dst_{Kyoto}) + ((1,004 \times 10^{-8}) (Dst_{Kyoto})^2) + ((3,6155 \times 10^{-12}) (Dst_{Kyoto})^3)) \times (1 + 28000 \times (-0,28402)) \quad (3-4)$$

$$\Phi_{Model} = (0,0015 + ((7,7228 \times 10^{-6}) Dst_{Kyoto}) + ((9,6933 \times 10^{-9}) (Dst_{Kyoto})^2) + ((3,4908 \times 10^{-12})) \quad (3-5)$$

$$\Phi_{Model} = (0,0015 + ((7,4654 \times 10^{-6}) \text{Dst}_{Kyoto}) + ((9,3702 \times 10^{-9}) \text{Dst}_{Kyoto}^2) + ((3,3744 \times 10^{-12}) \text{Dst}_{Kyoto}^3)) \times (1 + 30000 \text{Dst}_{Kyoto} - 0,28402) \quad (3-6)$$

$$\Phi_{Model} = (0,0014 + ((7,2245 \times 10^{-6}) \text{Dst}_{Kyoto}) + ((9,0679 \times 10^{-9}) \text{Dst}_{Kyoto}^2) + ((3,2656 \times 10^{-12}) \text{Dst}_{Kyoto}^3)) \times (1 + 31000 \text{Dst}_{Kyoto} - 0,28402) \quad (3-7)$$

$$\Phi_{Model} = (0,0014 + ((6,9987 \times 10^{-6}) \text{Dst}_{Kyoto}) + ((8,7845 \times 10^{-9}) \text{Dst}_{Kyoto}^2) + ((3,1635 \times 10^{-12}) \text{Dst}_{Kyoto}^3)) \times (1 + 32000 \text{Dst}_{Kyoto} - 0,28402) \quad (3-8)$$

$$\Phi_{Model} = (0,0013 + ((6,7866 \times 10^{-6}) \text{Dst}_{Kyoto}) + ((8,5183 \times 10^{-9}) \text{Dst}_{Kyoto}^2) + ((3,0676 \times 10^{-12}) \text{Dst}_{Kyoto}^3)) \times (1 + 33000 \text{Dst}_{Kyoto} - 0,28402) \quad (3-9)$$

$$\Phi_{Model} = (0,0013 + ((6,587 \times 10^{-6}) \text{Dst}_{Kyoto}) + ((8,2677 \times 10^{-9}) \text{Dst}_{Kyoto}^2) + ((2,9774 \times 10^{-12}) \text{Dst}_{Kyoto}^3)) \times (1 + 34000 \text{Dst}_{Kyoto} - 0,28402) \quad (3-10)$$

Sementara itu, dari nilai δ (deviasi/gangguan foF2) BPAA Sumedang melalui Persamaan (2-4) dan indeks Dst tahun 2010-2015 saat badai geomagnet kuat ($\text{Dst} < -100$ nT) maka dapat diperoleh korelasi nilai δ (deviasi/gangguan foF2) BPAA Sumedang minimum dan Dst minimum, $\Delta T_{onset} \delta$ (deviasi/gangguan foF2) BPAA Sumedang dan Dst minimum serta $\Delta T_{peak} \delta$ (deviasi/gangguan foF2) BPAA Sumedang minimum dan Dst minimum, seperti ditunjukkan pada Gambar 3-1.

Dari Gambar 3-1 tersebut diperoleh persamaan korelasi atau model statistik dan nilai korelasi dari ketiganya sebagai berikut,

$$peak \delta_{foF2} \text{ SMD} = 0,2835 (\text{Dst Min}) - 0,466 \quad (R = 74,76\%) \quad (3-11)$$

$$\Delta T_{onset} \delta_{foF2} \text{ SMD} = 0,0759 (\text{Dst min}) + 9,5816 \quad (R = 82,68\%) \quad (3-12)$$

$$\Delta T_{peak} \delta_{foF2} \text{ SMD} = 0,0403 (\text{Dst min}) + 19,303 \quad (R = 38,01\%) \quad (3-13)$$

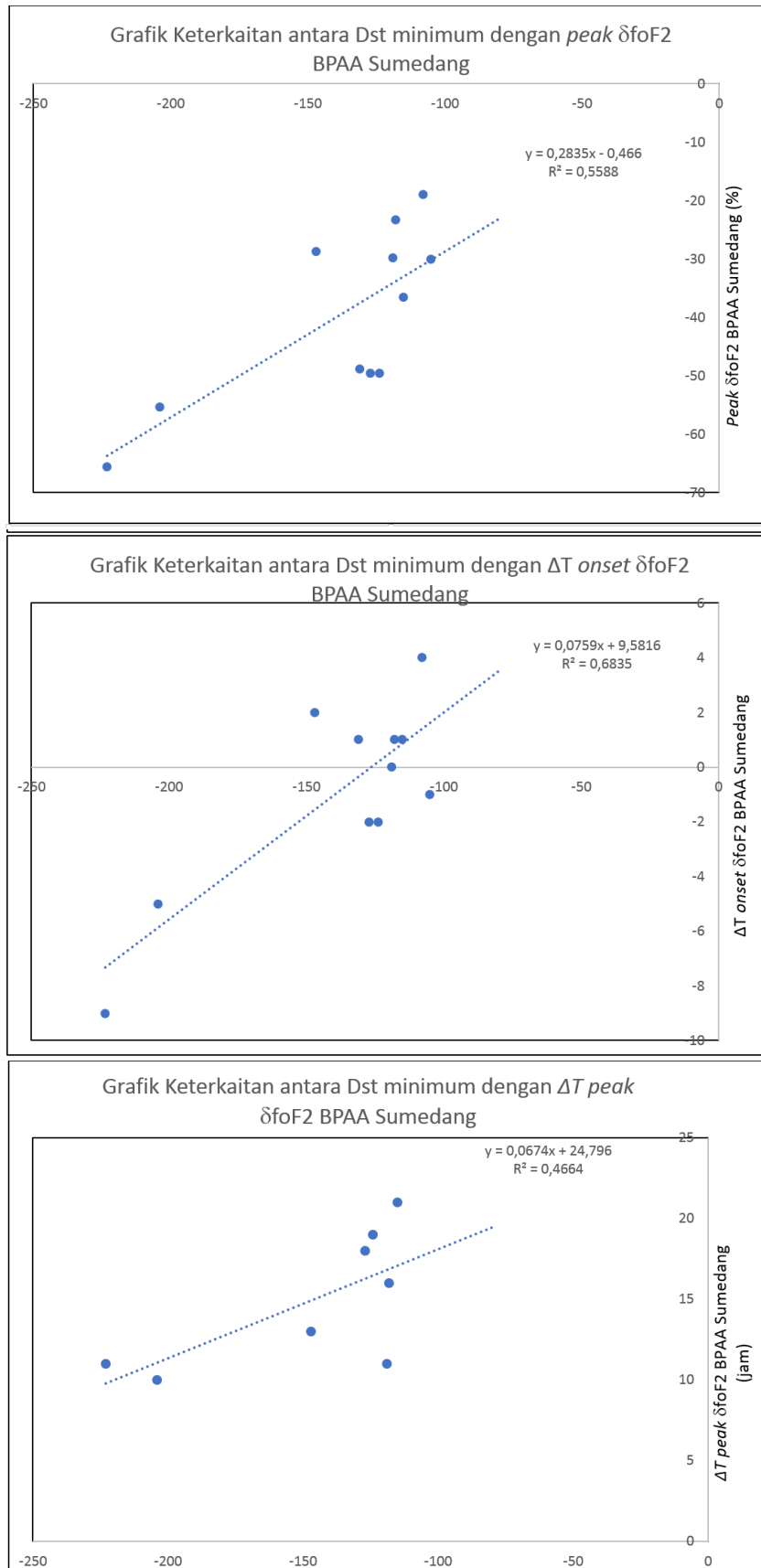
3.2 Uji Akurasi Φ_{Model} dan Model δ_{foF2} BPAA Sumedang

3.2.1 Uji Φ_{Model} : kasus badai geomagnet 20 Januari dan 13 Oktober 2013

Uji akurasi persamaan model Φ_{Model} BPAA Sumedang yang telah diperoleh di atas dilakukan menggunakan kejadian badai geomagnet tanggal 20 Januari (Φ_{Data} SMD = 6,35 MHz/ 12,475 MHz = 0,509; Dst = -93 nT) dan 13 Oktober 2016 (Φ_{Data} SMD = 4,3 MHz/ 11,2 MHz = 0,384; Dst = -105 nT). Input yang digunakan adalah Dst* (Dst(ap)) dan Dst_Kyoto pada kedua kejadian badai geomagnet tersebut. Hasilnya setelah difilter untuk nilai Φ model < 3 seperti ditunjukkan pada Gambar 3-2 dan 3-3.

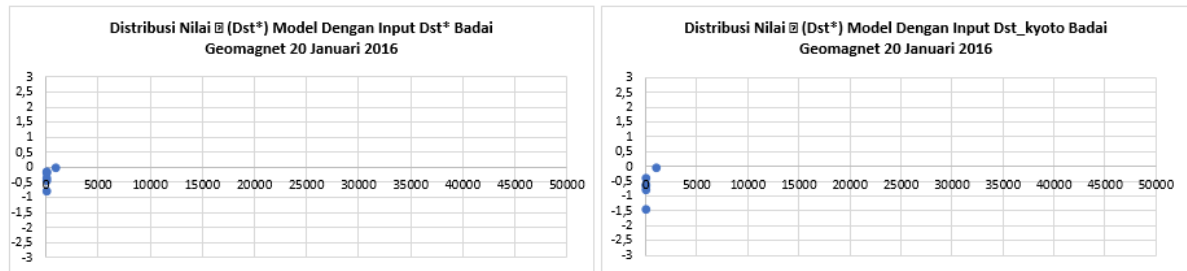
Gambar 3-2A menunjukkan nilai Φ_{Model} (Dst*) BPAA Sumedang hasil uji dengan input Dst* (kiri) dan dengan input Dst_Kyoto (kanan) saat kejadian badai geomagnet 20 Januari 2016. Sedangkan Gambar 3-2B menunjukkan nilai Φ_{Model} (Dst_Kyoto) BPAA Sumedang hasil uji dengan input Dst* (kiri) dan dengan input Dst_Kyoto.

Sementara itu, Gambar 3-3A menunjukkan nilai Φ_{Model} (Dst*) BPAA Sumedang hasil uji dengan input Dst* (kiri) dan dengan input Dst_Kyoto (kanan) saat kejadian badai geomagnet 13 Oktober 2016. Sedangkan Gambar 3-3B menunjukkan nilai Φ_{Model} (Dst_Kyoto) BPAA Sumedang hasil uji dengan input Dst* (kiri) dan dengan input Dst_Kyoto.

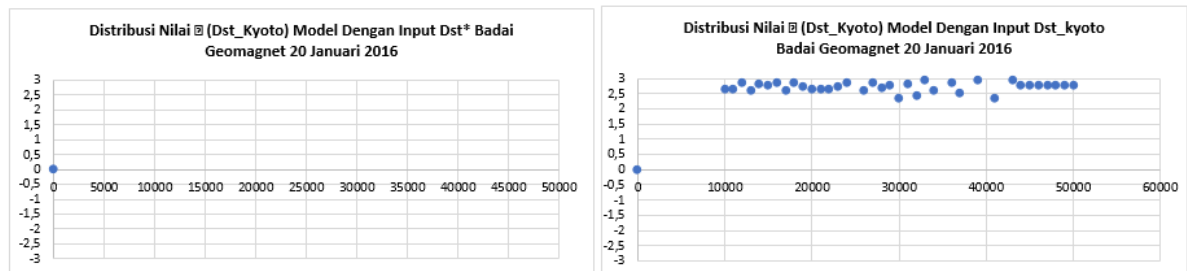


Gambar 3-1: Grafik korelasi antara Dst minimum dengan $peak \delta foF2_{SMD}$ (atas), Dst minimum dengan $\Delta t_{onset} \delta foF2_{SMD}$ (tengah) dan Dst minimum dengan $\Delta t_{peak} \delta foF2_{SMD}$ (bawah)

A

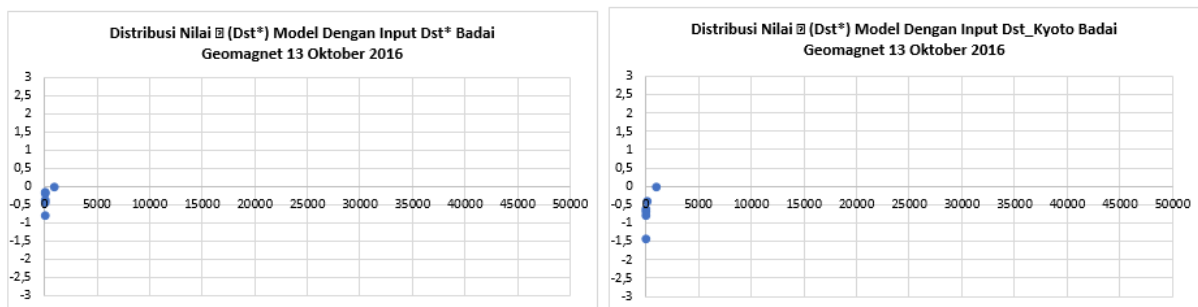


B

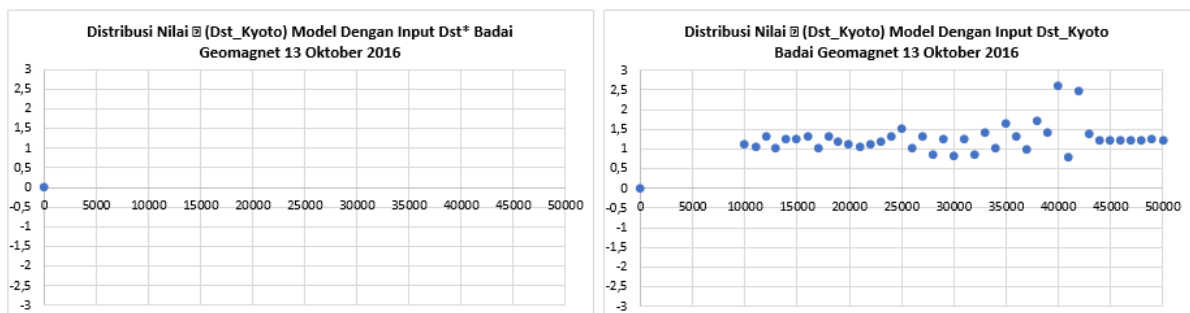


Gambar 3-2: Distribusi nilai Φ_{Model} BPAA Sumedang yang dibangun dengan input (A) Dst* dan (B) Dst_Kyoto untuk uji kejadian badai geomagnet 20 Januari 2016

A



B



Gambar 3-3: Distribusi nilai Φ_{Model} BPAA Sumedang yang dibangun dengan input (A) Dst* dan (B) Dst_Kyoto untuk uji kejadian badai geomagnet 13 Oktober 2016

Analisis visual terhadap Gambar 3-2 dan Gambar 3-3 terlihat nilai Φ (Dst_Kyoto) keluaran Φ_{Model} (Dst_Kyoto) baik untuk uji pada kejadian badai geomagnet tanggal 20 Januari 2016 maupun 13 Oktober 2016 mempunyai distribusi yang logis dan cukup mendekati nilai Φ_{Data} yakni $\Phi_{Data} = 0,509$ saat badai geomagnet tanggal 20 Januari

2016 dan $\Phi_{Data} = 0,384$ saat badai geomagnet tanggal 13 Oktober 2016.

3.2.2 Uji δ_{foF2} : kasus badai geomagnet 20 Januari dan 13 Oktober 2013

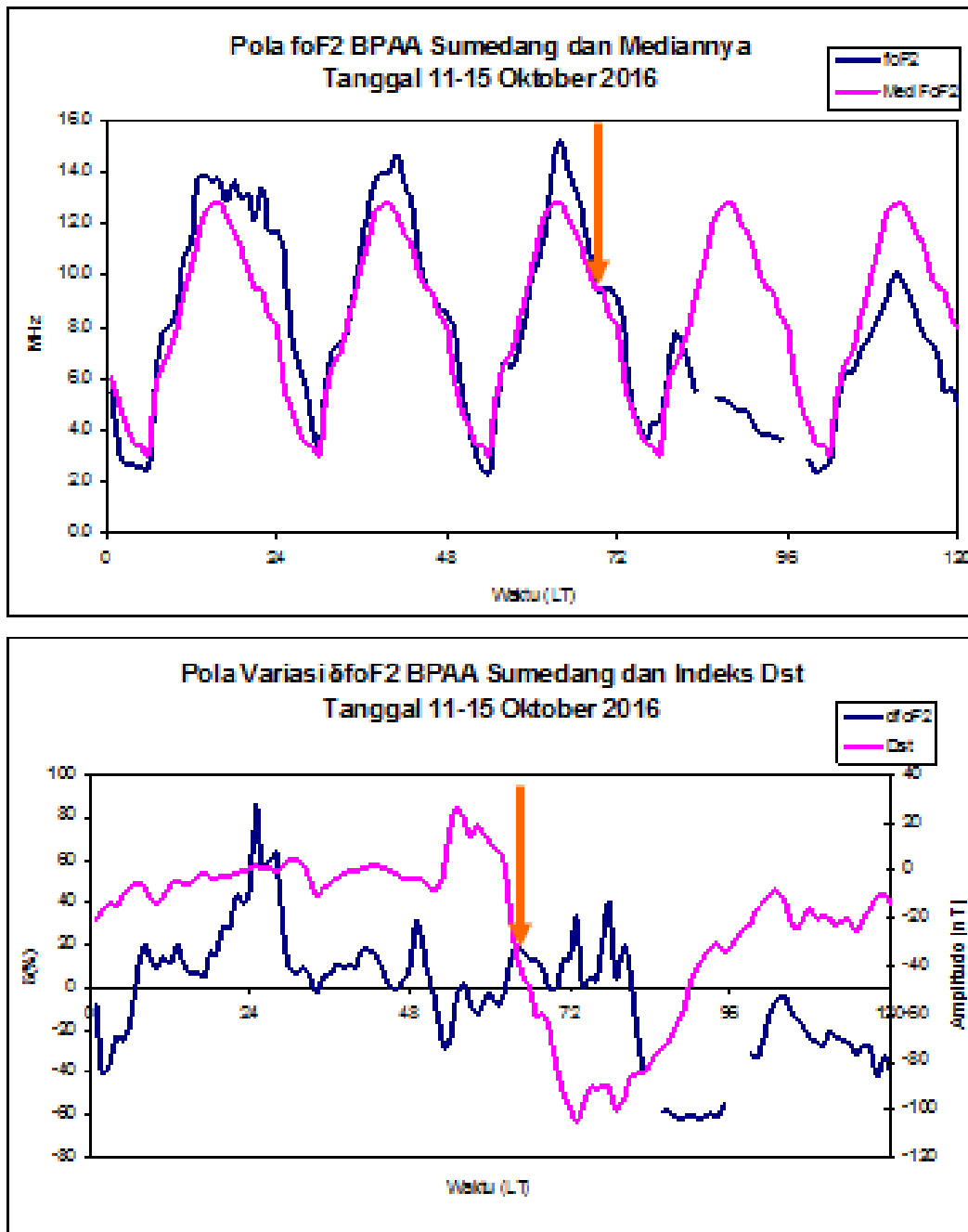
Persamaan (3-11) sampai (3-13) diuji pada kejadian badai geomagnet tanggal 20 Januari 2016 (Dst = -93 nT) dan 13 Oktober 2016 (Dst = -105 nT).

Hasilnya seperti ditunjukkan pada Gambar 3-4.

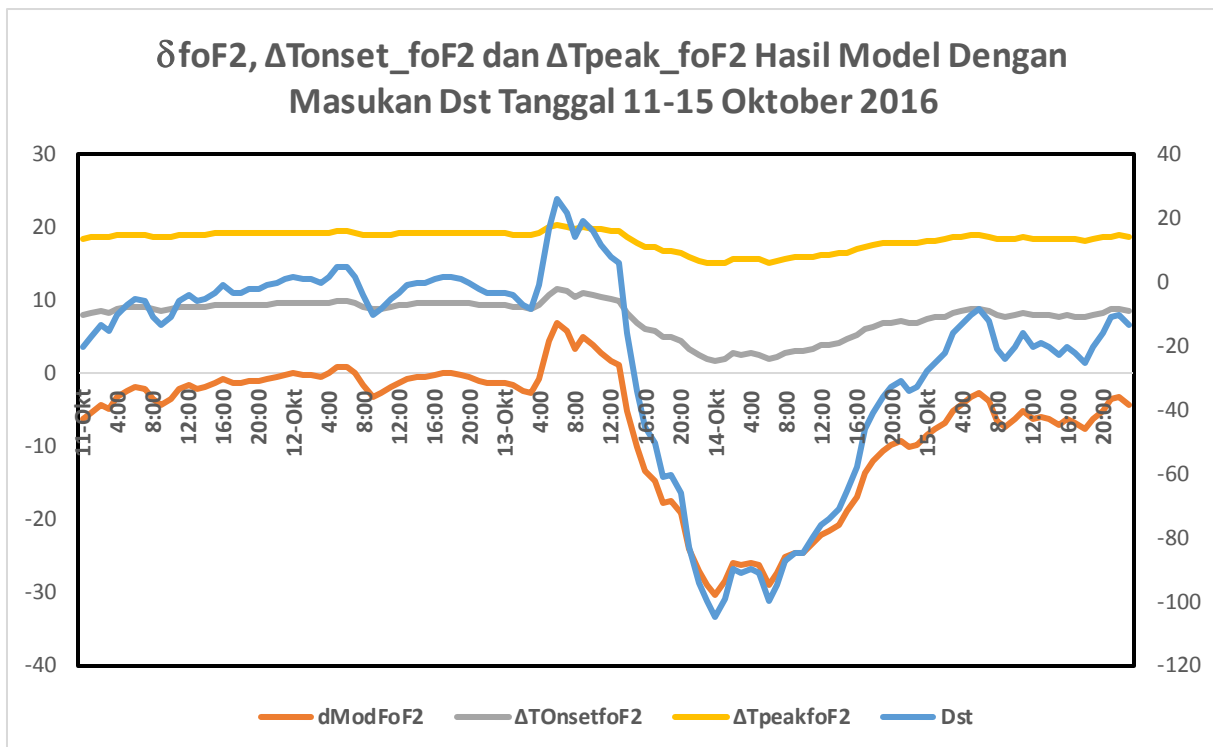
Dari Gambar 3-4 diperoleh nilai Φ_{Data} BPAA Sumedang = 0,387. Juga diperoleh nilai $\delta foF2$ BPAA Sumedang = -61,3%; ΔT_{onset} $\delta foF2$ BPAA Sumedang = 7 dan ΔT_{peak} $\delta foF2$ BPAA Sumedang adalah 18 jam. Kemudian Persamaan (3-11) sampai (3-13) diberi input Dst_{Kyoto} tanggal 19-24 Januari 2016 dan tanggal

11-15 Oktober 2016. Hasil keluarannya diplot bersama nilai Dst -nya. Contohnya seperti ditunjukkan pada Gambar 3-5.

Gambar 3-5 menunjukkan pola nilai $\delta foF2$; ΔT_{onset} dan ΔT_{peak} $\delta foF2$ BPAA Sumedang keluaran model dengan input Dst minimum ($Dst_{min} = -105$ nT) pada badai geomagnet tanggal 13 Oktober 2016. Berdasarkan Gambar 3-4 dan Gambar 3-5 diperoleh Tabel 3-2.



Gambar 3-4: Pola variasi (atas) foF2 BPAA Sumedang dan Mediannya dan (bawah) $\delta foF2$; ΔT_{onset} dan ΔT_{peak} $\delta foF2$ BPAA Sumedang Tanggal 11-15 Oktober 2016



Gambar 3-5: Nilai $\delta f_o F_2$; ΔT_{onset} dan ΔT_{peak} $\delta f_o F_2$ BPAA Sumedang keluaran model untuk Tanggal 11-15 Oktober 2016

Tabel 3-2: NILAI $\delta f_o F_2$; ΔT_{onset} DAN ΔT_{peak} $\delta f_o F_2$ BPAA SUMEDANG KELUARAN MODEL DAN DATA SERTA SELISIHNYA

| No. | Tanggal Kejadian | Hmin | Thmin (UT) | MODEL | | | DATA | | |
|-----|------------------|------|------------|-----------------------------|---|--|-----------------------------|---|--|
| | | | | peak $\delta f_o F_2_{SMD}$ | $\Delta T_{onset} \delta f_o F_2_{SMD}$ | $\Delta T_{peak} \delta f_o F_2_{SMD}$ | peak $\delta f_o F_2_{SMD}$ | $\Delta T_{onset} \delta f_o F_2_{SMD}$ | $\Delta T_{peak} \delta f_o F_2_{SMD}$ |
| 1. | 20-01-2016 | -93 | 17,00 | -26,83% | 2,5 | 15,5 | -32% | 2,15 | 15,4 |
| 2. | 13-10-2016 | -105 | 00,00 | -30,23% | 1,6 | 15,1 | -61% | 7 | 18 |

| Δ (Mod-Data) | | |
|---------------------|----------|----------|
| 5,17% | 0,35 jam | 0,1 jam |
| 30,77% | -5,4 jam | -2,9 jam |

Dari Tabel 3-2 terlihat bahwa selisih antara hasil keluaran model dengan data kurang dari 30% untuk δf_oF_2 BPAA Sumedang dan kurang dari 4 jam untuk $\Delta T_{\text{peak}} \delta f_oF_2$ BPAA Sumedang. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa model δf_oF_2 BPAA Sumedang numerik lokal memiliki sedikit keunggulan dibandingkan model empiris f_oF_2 ionosfer global Araujo-Pradere *et al.* (2002) modifikasi.

4 KESIMPULAN

Dari analisis disimpulkan bahwa model gangguan badai ionosfer f_oF_2 BPAA Sumedang ($\delta f_oF_{2\text{SMD}}$) akurasi lebih baik daripada model adopsi model Araujo-Pradere ($\Phi f_oF_{2\text{SMD}}$), walaupun keduanya memiliki selisih < 40% terhadap data. Dengan demikian, model badai ionosfer Sumedang dapat dipergunakan untuk mendukung kegiatan SWIFtS di Pusat Sains Antariksa-LAPAN sebagai bahan pertimbangan untuk kegiatan prediksi SWIFtS.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami sampaikan kepada tim *scaling* data ionosfer Sumedang untuk ketersediaan data f_oF_2 ionosfer Sumedang dan juga kepada para penyunting yang dengan sabar telah memberikan masukan sehingga makalah ini dapat lebih sempurna.

DAFTAR RUJUKAN

Abdu, M.A., Sobral, J.H.A., Paula, E.R., Batista, I.S., 1991. *Magnetospheric Disturbance Effects on the Equatorial Ionization Anomaly (EIA): an Overview*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 53, 757-771.

Araujo-Pradere, E. A., and T. J., Fuller-Rowell, 2000. *A Model of a Perturbed Ionosphere Using the Auroral Power as the Input*, Geofis. Int., 39(1), 29-36.

Araujo-Pradere E. A., Fuller-Rowell T. J., and Codrescu M. V., 2002. *STORM: An Empirical Storm-Time Ionospheric Correction Model*,

RADIO SCIENCE, VOL. 37, NO. 0, 10.1029/2001RS002467.

- Bilitza, D., 1990. *International Reference Ionosphere 1990*, http://www.ngdc.noaa.gov/wdc/webbook/wdca/wdca_rocks.html, Natl. Space Sci. Data Cent., World Data Cent. A for Rockets and Satellites, Greenbelt, Md.
- Bilitza, D., 2001. *International Reference Ionosphere 2000*, Radio Sci., 36(2), 261-276.
- Fuller-Rowell, T. J., D., Rees, S., Quegan, R. J., Moffett, M. V., Codrescu, and G. H., Millward, 1996. *A Coupled Thermosphere-Ionosphere Model (CTIM)*, in *STEP: Handbook of Ionospheric Models*, edited by R. W. Schunk, pp. 239-279, Sci. Comm. on Sol.-Terr. Phys., Boulder, Colorado-USA.
- Fuller-Rowell, T. J., M. V., Codrescu, E. A., Araujo-Pradere, and I., Kutiev, 1998. *Progress in Developing a Storm-Time Ionospheric Correction Model*, Adv. Space Res., 22(6), 821-827.
- Gopalswamy, N., 2009. *Halo Coronal Mass Ejections and Geomagnetic Storm*, Earth Planet Space, 61, 1-3.
- Lusiani, E. S., Mumpuni, J. A., Utama, 2011. *Analisis Kaitan Badai Geomagnet dengan Badai Ionosfer Sebagai Dampak Kejadian Lontaran Massa Korona Matahari (Oktober-November 2003)*, Prosiding Seminar Nasional Astronomi Indonesia.
- Mukherjee, S., Sarkar S., Purohit P. K., Gwal A. K., 2010. *Effect of Geomagnetic Storms in the Equatorial Anomaly Region Observed from Ground Based Data*, Int. Journal of Geomagnetism and Geosciences, Vol. 1, No. 3, 478-488.
- Rastogi, R.G., 1999. *Geomagnetic Storm Effects at Low Latitudes*, Ann. Geophys., 17, 438-444.
- Rawer, K., D., Bilitza, and S., Ramakrishnan, 1978. *Goals and Status of the International Reference Ionosphere*, Rev. Geophys., 16, 177-181.
- Rodger, A. S., G. L., Wrenn, and H., Rishbeth, 1989. *Geomagnetic Storms in the Antarctic F Region*, II, physical interpretation, J. Atmos. Terr. Phys., 51, 851-866.

Russell, C.T., 2006. *The Solar Wind Interaction with the Earth's Magnetosphere : Tutorial*, Department of Earth and space sciences and Institute of Geophysics and Space Physics of University of California, Los Angeles.

Yatini, C. Y., Jiyo, M., Ruhimat, 2009. *Badai Matahari dan Pengaruhnya pada Ionosfer dan Geomagnet di Indonesia*, Majalah

Sains dan Teknologi Dirgantara Vo. 4 No. 17-24.

Zhao, B., Wan W., Liu L., K., Igarashi, K., Yumoto, Baiqi Ning, 2009. *Ionospheric Response to the Geomagnetic Storm on 13-17 April 2006 in the West Pacific Region*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 71 (2009) 88–100.