

**PEMODELAN DAN VALIDASI HUBUNGAN
ANTARA FREKUENSI KRITIS LAPISAN F2 IONOSFER (foF2) DENGAN TOTAL
ELECTRON CONTENT (TEC) DARI DATA IONOSONDA DAN GPS**

Buldan Muslim

Pusat Pemanfaatan Sains Antariksa, LAPAN
Jl. Dr. Junjuran 133 Bandung 40173
mbuldan@yahoo.co.id

ABSTRAK

Hubungan antara frekuensi kritis lapisan F2 ionosfer (foF2) dengan *total electron content* (TEC) telah dimodelkan menggunakan data foF2 keluaran model sederhana ionosfer lintang rendah Indonesia (MSILRI) dan TEC yang diturunkan dari data GPS (*Global Positioning System*) stasiun BAKO yang terletak di Cibinong. Validasi model tersebut dilakukan dengan cara membandingkan prediksi foF2 dari TEC GIM/*Global Ionospheric Map* (disingkat foF2 GIM-MSILRI) dengan foF2 dari pengamatan ionosonda. Hasil validasi menunjukkan bahwa pada 1 Desember 2009, saat aktivitas matahari rendah prediksi foF2 GIM-MSILRI lebih rendah dari data pengamatan ionosonda untuk ionosfer belahan bumi utara terutama di lintang tinggi dan lebih tinggi untuk belahan bumi selatan. Dari nilai rata-rata mutlak simpangan foF2 GIM-MSILRI dengan pengamatan ionosonda di beberapa lintang yang berbeda, terlihat bahwa foF2 GIM-MSILRI untuk belahan bumi selatan lebih akurat dibandingkan dengan prediksi model foF2 di belahan bumi utara. Di belahan bumi bagian selatan simpangan model bervariasi dari 0,52 – 0,85 MHz sementara di belahan bumi bagian utara simpangan model bervariasi dari sekitar 0,65 sampai 1,12 MHz. Setelah terjadi *coronal mass ejection* (CME) pada 28 dan 29 Oktober 2003, model foF2 GIM-MSILRI dapat menangkap dengan baik badai ionosfer positif berupa peningkatan foF2 di atas Tanjung Sari beberapa saat setelah CME sampai di magnetosfer bumi. Walaupun foF2 GIM-MSILRI dapat mengikuti badai ionosfer negatif berupa penurunan nilai foF2 beberapa jam setelah terjadi badai geomagnet tetapi model memprediksi foF2 lebih tinggi dari pengamatan.

Kata kunci: Ionosfer, TEC, foF2, model, validasi.

ABSTRACT

The relationship between F2 region ionospheric critical frequency (foF2) and total electron content (TEC) has been modeled by using foF2 data and TEC of Global Ionospheric Map (GIM). The model has been validated by comparing foF2 predictions from TEC of GIM (GIM-MSILRI foF2 model) with foF2 data obtained from ionosonde observations. The validation show that at low solar activity on December 1, 2009 the foF2 predictions are lower than ionosonde observations for the northern hemisphere, especially at high latitudes. In the southern hemisphere the GIM-MSILRI foF2 values are higher than ionosonde observations, although its difference are smaller compared with foF2 predictions for the northern hemisphere. From the average value of mean absolute deviations (MADs) of GIM-MSILRI foF2 model from ionosonde observations at different latitudes showed that GIM-MSILRI foF2 model predictions for the southern hemisphere are more accurate than the model predictions of foF2 in the northern hemisphere. In the southern hemisphere, MADs of the model vary from about 0,52 to 0,85 MHz, while in the northern hemisphere the MADs of the model vary from about 0,65 to 1,12 MHz. GIM-MSILRI foF2 model validation during ionospheric

disturbances caused by solar storm of October 28 dan 29, 2003 showed that GIM-MSILRI foF2 model can capture ionospheric storm by increasing the foF2 above Tanjungsari some time after the Coronal Mass Ejection (CME) reached the Earth. Although GIM-MISLRI foF2 predictions can follow the decreasing values of foF2 few hours after the geomagnetic storm, but the model predictions are over estimate.

Keywords: *Ionosphere, TEC, foF2, model, validation.*

PENDAHULUAN

Model sederhana ionosfer lintang rendah Indonesia (MSILRI) berisi antara lain parameter foF2 di atas wilayah Indonesia dan sekitarnya [1]. Data foF2 dari MISLRI ini dapat digunakan untuk pemodelan hubungan foF2 dengan TEC yang diturunkan dari data GPS yang terletak di Cibinong dengan kode stasiun BAKO.

Global Ionospheric Map (GIM) dihasilkan setiap hari di Pusat Penentuan Orbit di Eropa (*Center for Orbit Determination in Europe* (CODE)) sejak 1996 menggunakan data dari semua stasiun IGS tahun 1995. TEC dimodelkan dalam kerangka referensi geomagnetik-matahari menggunakan ekspansi harmonik bola sampai derajat dan orde 15 [2].

Saat ini model GIM dapat diperoleh dari <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE>. Berdasarkan waktu ketersediaan model terdapat 3 macam model GIM yaitu produk akhir GIM yang tertunda sekitar 13 hari, produk cepat GIM yang tersedia dengan keterlambatan sekitar 1 hari dan prediksi GIM dua hari yang akan datang yang berkasnya diberi nama COPGddd0.YYI yang tersedia beberapa saat setelah jam 15:00 UT untuk hari sekarang dan besok (prediksi dua hari ke depan). Tetap model tersebut belum dimanfaatkan untuk prediksi foF2 karena belum adanya model hubungan antara foF2 dengan TEC. Oleh karena itu model hubungan foF2 dan TEC perlu dikembangkan sehingga dapat digunakan untuk memprediksi foF2 harian dari prediksi harian TEC GIM.

Makalah ini menjelaskan model hubungan antara foF2 dengan TEC, pemanfaatannya untuk prediksi foF2 global dari TEC GIM (foF2 GIM-MSILRI) dan validasinya menggunakan data foF2 pengamatan ionosonda pada 1 Desember 2009, saat aktivitas matahari rendah dan pada 28 Oktober 2003, setelah terjadi badai matahari.

DATA DAN METODOLOGI

Data yang digunakan untuk pemodelan hubungan foF2 dan TEC adalah data foF2 keluaran MSILRI dan data TEC yang diturunkan dari data GPS BAKO mulai tahun 1999 – 2006. Adapun validasi model telah digunakan data foF2 dari pengamatan ionosonda di daerah lintang tinggi, tengah dan rendah pada tanggal 1 Desember 2009, saat aktivitas matahari rendah dan saat terjadi gangguan ionosfer yang disebabkan oleh badai matahari pada tanggal 28 dan 29 Oktober 2003.

Dengan menganggap bahwa ionosfer memiliki kerapatan yang homogen secara vertikal dengan kerapatan elektron N_e sama dengan kerapatan maksimum lapisan F2 ionosfer N_mF_2 , maka dapat didefinisikan ketebalan lapisan ionosfer K sebagai perbandingan antara TEC dan N_mF_2 [3]:

$$K = \frac{TEC}{N_mF_2} \quad (1)$$

Hubungan N_mF_2 dengan foF2 adalah sebagai berikut [4]:

$$N_mF_2 = 1,24 \times 10^{10} (f_oF_2)^2 \quad (2)$$

Sehingga persamaan (1) dapat ditulis menjadi:

$$(f_oF_2)^2 = \frac{10^4}{1,24K} TEC \quad (3)$$

dengan foF2 dalam MHz, TEC dalam TEC unit dan K dalam meter [3], sehingga Persamaan (3) dapat disederhanakan menjadi:

$$(f_oF_2)^2 = BTEC \quad (4)$$

dengan $B = \frac{10^4}{1,24K}$ (5)

Dari persamaan (4) diketahui bahwa grafik kuadrat foF2 versus TEC memotong sumbu Y di titik (0,0) dengan gradien B . Jika garis lurus kuadrat foF2 dengan TEC GPS yang diturunkan dari data pengamatan GPS BAKOSURTANAL tidak melewati (0,0) maka perpotongan garis lurus terhadap sumbu Y merupakan nilai kalibrator yang tidak lain adalah bias perbedaan kode *receiver* GPS (*Differential Code Bias*, DCB) sehingga tidak perlu diperhitungkan dalam persamaan model hubungan kuadrat foF2 dengan TEC. Tetapi nilai DCB *receiver* tersebut dapat digunakan untuk kalibrasi nilai TEC yang diturunkan dari data GPS [5].

Dengan asumsi bahwa B hanya tergantung pada indek aktivitas matahari R12 dan tidak tergantung pada waktu lokal dan lintang geografis pada kerangka waktu lokal, maka Persamaan (4) dapat ditulis menjadi:

$$(f_oF_2)^2 = (a_m R12 + b_m) TEC \quad (6)$$

dengan subskrip m menunjukkan bulan tertentu dalam satu tahun ($m = 1$ sampai $m = 12$).

Setelah diperoleh model hubungan kuadrat foF2 dengan TEC yaitu koefisien-koefisien dalam Persamaan (6) kemudian dilakukan validasi model hubungan tersebut menggunakan data foF2 pada saat aktivitas matahari rendah tanggal 1 Desember 2009, dan pada kondisi aktivitas matahari terganggu saat terjadi CME 28 dan 29 Oktober 2003. Kemudian dilakukan interpolasi foF2 di atas stasiun ionosonda yang datanya secara real time dapat diakses melalui internet yang dapat diunduh dari <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/>.

Adapun data TEC GIM dapat diunduh dari <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE> dengan nama CODGddd0.YYI dengan ddd adalah hari dalam setahun mulai tanggal 1 Januari dan YY adalah tahun. Setelah data diunduh kemudian dilakukan pembacaan CODEGddd0.yyI. Setelah data VTEC diekstrak dari file CODGddd0.yyI kemudian dilakukan pemanggilan koefisien penghubung foF2 dengan TEC. Nilai TEC GIM kemudian dikonversikan menjadi foF2 menggunakan Persamaan (6).

Untuk mengetahui seberapa jauh simpangan foF2 GIM-MSILRI telah dilakukan validasi dengan membandingkan prediksi foF2 GIM-MISLRI dengan foF2 hasil pengamatan ionosonda baik di lintang rendah Indonesia maupun di lintang tengah dan lintang tinggi. Validasi model dilakukan untuk kondisi ionosfer terganggu pada 27-31 Oktober 2003 dan kondisi tenang pada 1 Desember 2009.

HASIL DAN PEMBAHASAN

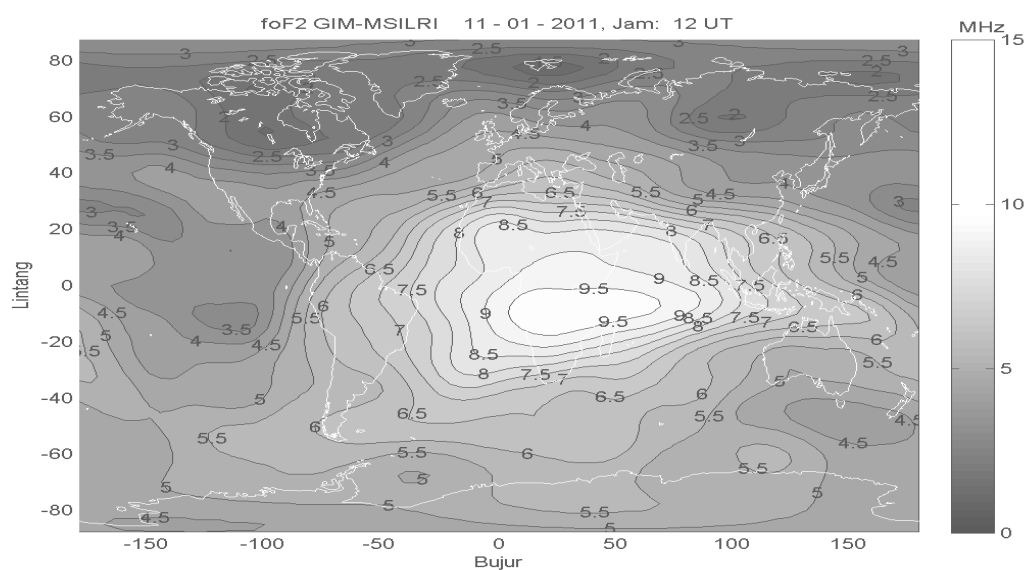
Regresi linier antara kuadrat foF2 dengan TEC sebagaimana dirumuskan pada Persamaan (6) menghasilkan nilai konstanta-konstanta a_m dan b_m yang menghubungkan antara kuadrat foF2 dengan TEC yang nilainya ditunjukkan pada Tabel 1.

Dengan model hubungan foF2 dengan TEC sebagaimana dirumuskan pada Persamaan (6) dan dengan konstanta a_m dan b_m seperti ditunjukkan pada Tabel 1, dapat diprediksi foF2 global pada 11 Januari 2011 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.

Cara menggunakan peta foF2 tersebut secara cepat dan sederhana adalah dengan membandingkan frekuensi HF (*High Frequency*) yang digunakan dengan peta frekuensi foF2 GIM-MSILRI. Di mana dan kapan frekuensi HF mendekati frekuensi foF2 GIM-MSILRI maka pada tempat dan waktu tersebut komunikasi HF dengan frekuensi tertentu dapat berlangsung untuk komunikasi HF dalam satu propinsi atau dengan propinsi yang berdekatan dengan lokasi stasiun radio HF.

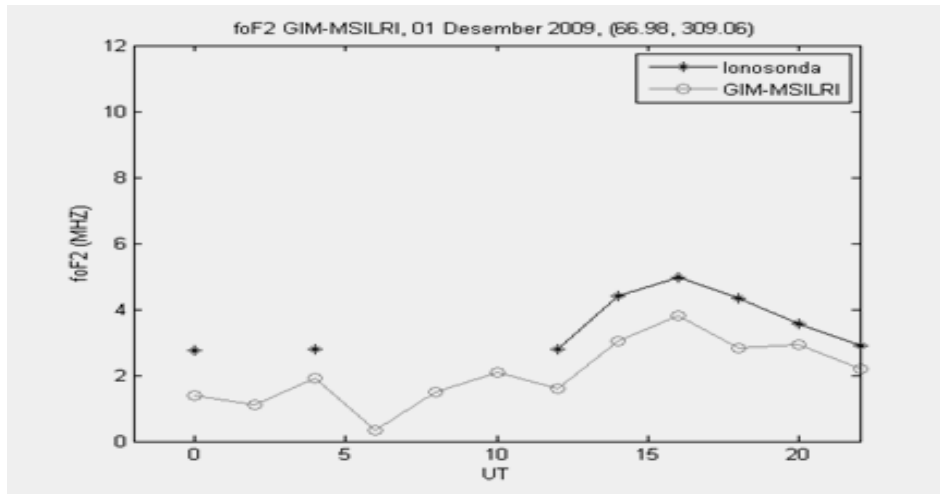
Tabel 1. Nilai-nilai konstanta model hubungan foF2 dengan TEC.

Bulan	A	B
1	-5.1953455e-003	2.8168532e+000
2	-6.7644353e-003	3.0435965e+000
3	-1.1040703e-002	3.4871503e+000
4	-1.8144979e-002	4.1093103e+000
5	-8.5903454e-003	3.6889163e+000
6	-7.9272864e-003	3.0673734e+000
7	-1.0845814e-002	3.8067801e+000
8	-1.7513977e-002	4.6573910e+000
9	-2.3500100e-002	5.0100210e+000
10	-2.9152417e-002	5.2983774e+000
11	-1.3520935e-002	3.7501153e+000
12	-4.7647295e-003	3.1588803e+000

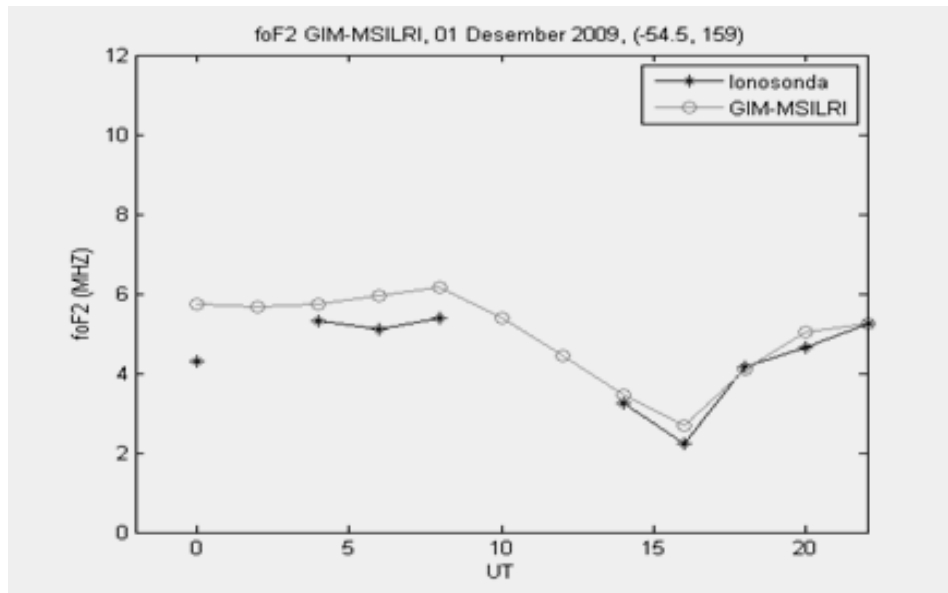


Gambar 1. Prediksi foF2 dengan model hubungan foF2 dan TEC (model foF2 GIM-MSILRI) untuk 11 Januari 2011.

Untuk daerah lintang tinggi, foF2 GIM-MSILRI umumnya lebih rendah di daerah belahan bumi utara (Gambar 2.a) dan sebaliknya lebih tinggi untuk belahan bumi selatan (Gambar 2.b) dibandingkan dengan data pengamatan foF2 ionosonda.



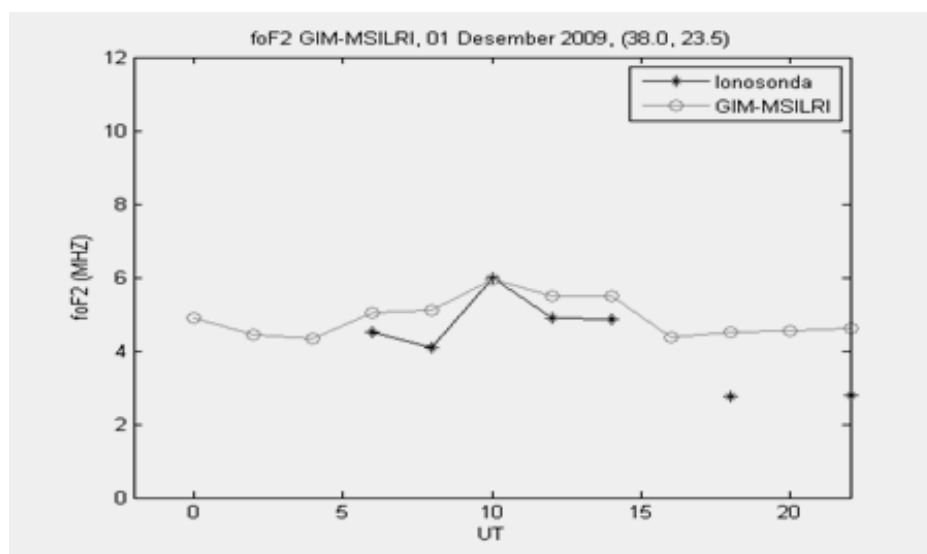
(2.a)



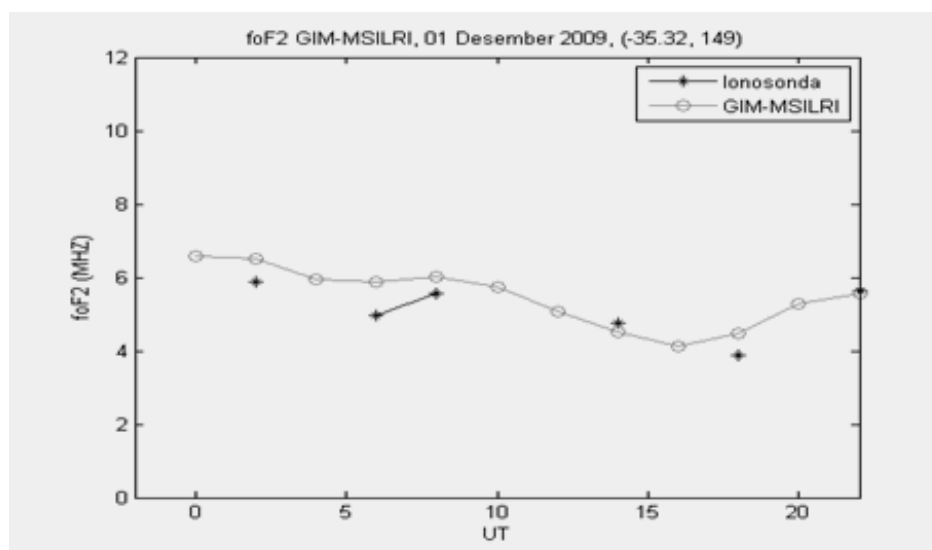
(2.b)

Gambar 2. Perbandingan foF2 GIM-MSILRI dengan foF2 ionosonda 1 Desember 2009 di daerah lintang tinggi memperlihatkan bahwa nilai foF2 GIM-MSILRI lebih rendah untuk belahan bumi utara dan lebih tinggi untuk belahan bumi selatan. UT adalah *Universal Time* (jam).

Untuk daerah lintang tengah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3 dapat diketahui bahwa prediksi foF2 GIM-MSILRI di belahan bumi utara masih cenderung lebih rendah (Gambar 3.a) dan untuk belahan bumi selatan masih cenderung lebih tinggi (Gambar 3.b) tetapi lebih bervariasi terhadap waktu.



(a)

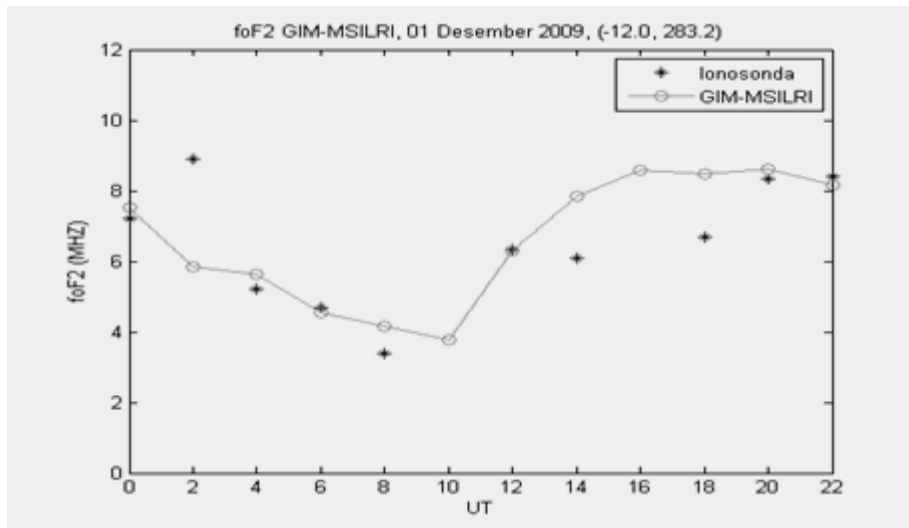


(b)

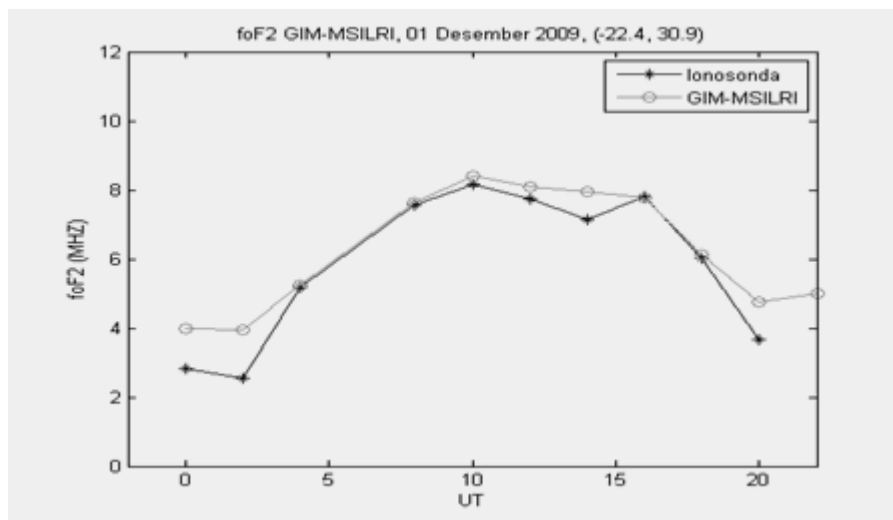
Gambar 3. Perbandingan foF2 GIM-MSILRI dengan foF2 ionosonda pada 1 Desember 2009 di daerah lintang tengah memperlihatkan bahwa nilai foF2 GIM-MSILRI lebih rendah untuk belahan bumi utara (a) dan bervariasi untuk belahan bumi selatan (b). UT adalah *Universal Time* (jam).

Untuk daerah lintang rendah perbandingan prediksi foF2 GIM-MSILRI dengan pengamatan ionosonda ditunjukkan pada Gambar 4, yang memperlihatkan bahwa prediksi foF2 GIM-MSILRI nilainya pada waktu tertentu lebih tinggi tetapi pada waktu lainnya lebih rendah. Pola simpangan model juga bervariasi terhadap bujur.

Pada bujur 283.2 derajat (Gambar 4.a) prediksi foF2 pada siang hari lebih tinggi sementara pada bujur 30 derajat (Gambar 4.b) prediksi foF2 juga lebih tinggi tetapi lebih mendekati data pengamatan. Sementara itu pada malam hari untuk bujur 283.2 derajat nilai prediksi foF2 malam hari lebih sesuai dengan pengamatan dari pada prediksi foF2 malam hari pada bujur 30 derajat.



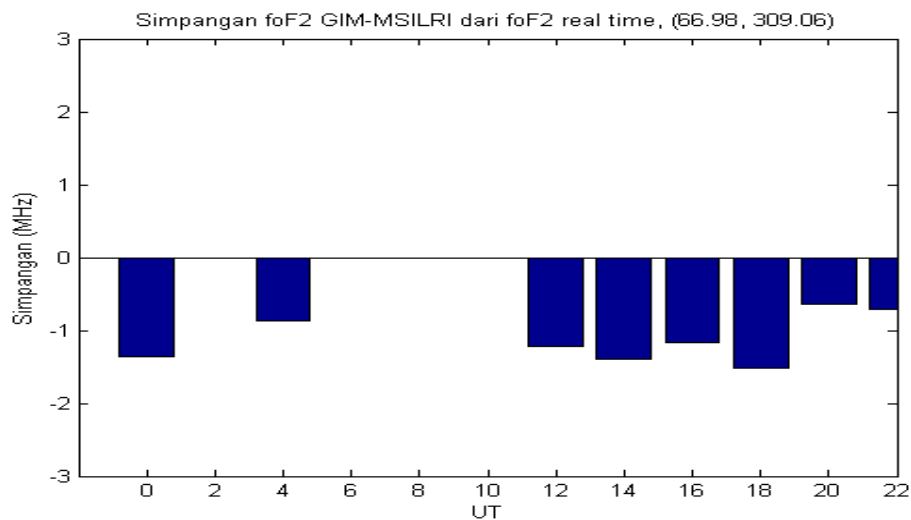
(a)



(b)

Gambar 4. Perbandingan foF2 GIM-MSILRI dengan pengamatan ionosonda di daerah lintang rendah menunjukkan bahwa prediksi foF2 menyimpang dari pengamatan yang bervariasi terhadap waktu dalam sehari. UT adalah *Universal Time* (jam).

Dari Gambar 5 lebih jelas terlihat perbedaan antara model foF2 GIM-MSILRI dengan pengamatan ionosonda (foF2 GIM-MSILRI dikurangi dengan foF2 ionosonda) di mana ada kecenderungan bahwa model foF2 memprediksi foF2 lebih rendah untuk ionosfer belahan bumi utara terutama di lintang tinggi.



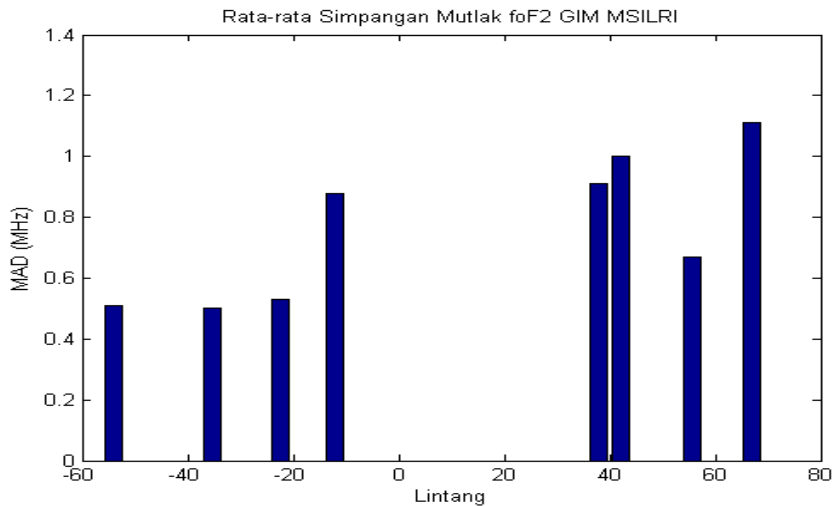
Gambar 5. Simpangan foF2 GIM-MSILRI dari foF2 ionosoda 1 Desember 2009. UT adalah *Universal Time* (jam).

Gambar 6 menunjukkan nilai rata-rata mutlak simpangan foF2 GIM-MSILRI dengan pengamatan ionosonda di beberapa lintang yang berbeda. Terlihat bahwa foF2 GIM-MSILRI untuk wilayah belahan bumi selatan lebih akurat dibandingkan dengan prediksi model foF2 di belahan bumi utara. Di belahan bumi bagian selatan simpangan model bervariasi dari 0,52 – 0,85 MHz sementara di belahan bumi bagian utara simpangan model bervariasi dari sekitar 0,65 sampai 1,12 MHz.

Dari nilai perbandingan prediksi foF2 GIM-MSILRI dengan data pengamatan ionosonda sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 sampai Gambar 6, pada umumnya prediksi foF2 GIM-MSILRI lebih tinggi untuk daerah belahan bumi selatan dan lebih rendah untuk belahan bumi utara. Perbedaan besar simpangan dan jenis simpangannya menunjukkan bahwa ada ketidak simetrisan ionosfer di belahan bumi utara dan selatan pada bulan Desember 2009 di mana garis edar matahari berada di sebelah selatan khatulistiwa sehingga nilai TEC ionosfer dan juga foF2 lebih besar nilainya dibandingkan dengan TEC dan foF2 di sebelah utara.

Sedikit lebih tingginya foF2 GIM-MSILRI di belahan bumi selatan menunjukkan bahwa di sebelah selatan khatulistiwa kontribusi kerapatan elektron di lapisan D, E dan F1 pada TEC cukup besar sehingga estimasi foF2 dari TEC menghasilkan nilai foF2 lebih besar dari pengamatan ionosonda. Sedangkan lebih rendahnya model foF2 GIM-MSILRI di lintang tinggi di belahan bumi

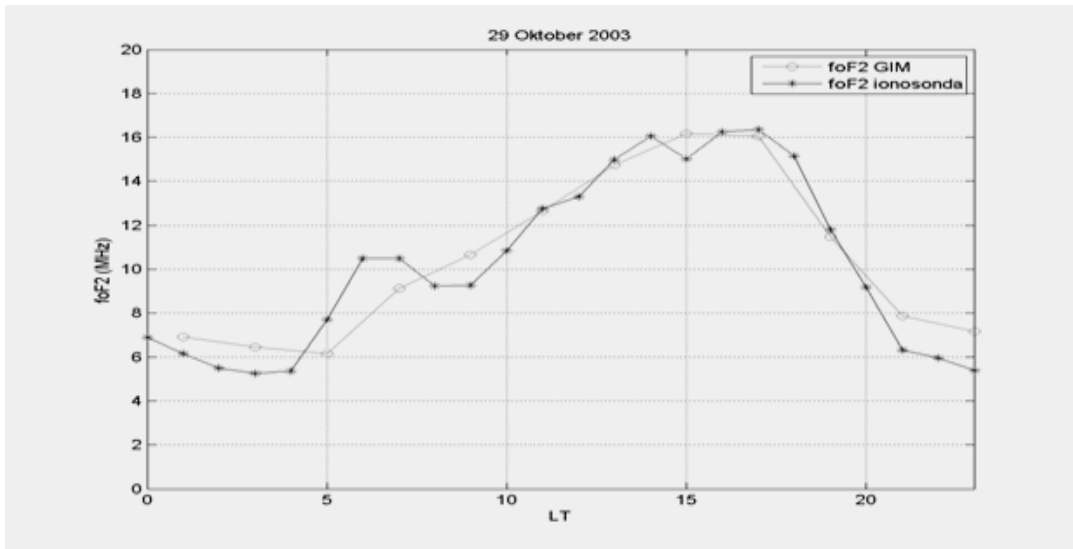
utara menunjukkan bahwa proses rekombinasi di belahan bumi utara di lapisan D dan E serta F1 lebih cepat dari rekombinasi di lapisan F2 sehingga estimasi foF2 dari TEC menghasilkan nilai yang lebih rendah dari pengamatan foF2 ionosonda.



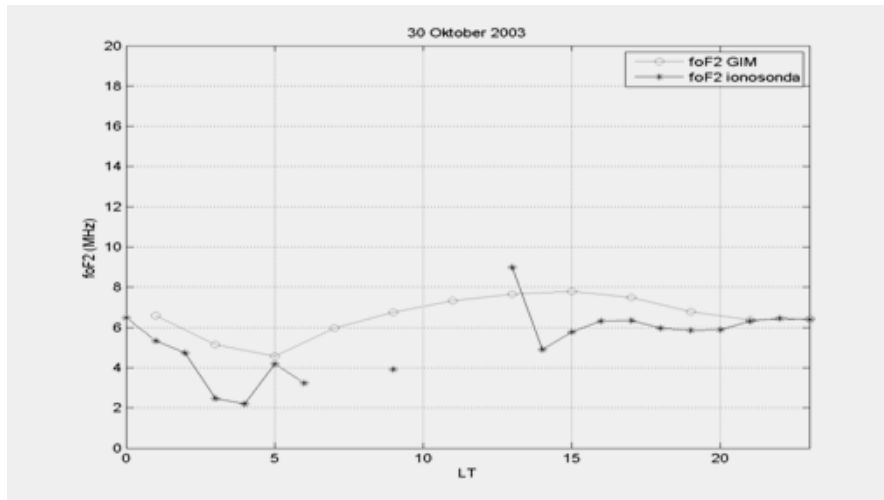
Gambar 6. *Mean absolute deviation (MAD) foF2 GIM-MSILRI real time pada lintang yang bervariasi dari lintang tinggi, tengah dan rendah di belahan bumi selatan dan utara pada tanggal 1 Desember 2009.*

Adapun validasi foF2 GIM-MSILRI pada saat ada gangguan ionosfer yang bersumber dari badai matahari 28 Oktober 2003 yang disertai CME pada jam 11:10 UT dengan kecepatan CME sekitar 2,125 km/s yang menyebabkan badai geomagnet pada jam 06:11 UT [6] (atau jam 13:11 WIB) pada 29 Oktober 2009 yang diikuti badai ionosfer positif dengan kenaikan foF2 mencapai sekitar 16,2 MHz pada jam 17:00 WIB ditunjukkan pada Gambar 7. Grafik ini menunjukkan bahwa foF2 GIM-MSILRI dapat menangkap dengan baik badai ionosfer berupa peningkatan TEC di atas Tanjung Sari ((-6.9°, 107.8°), beberapa saat setelah badai matahari CME sampai di magnetosfer bumi yang diikuti penurunan nilai TEC beberapa jam setelah terjadi badai geomagnet.

Setelah itu diikuti dengan badai ionosfer negatif dengan adanya penurunan foF2 mencapai 7,8 MHz (prediksi foF2 GIM-MSILRI) seperti dapat dilihat pada Gambar 8, dari awalnya ketika kondisi normal pada 27 Oktober 2003 sekitar 14,0 MHz yang berarti telah turun sekitar 45 % dari kondisi normalnya.



Gambar 7. Model foF2 GIM-MSILRI di atas Tanjungsari (-6.9° , 107.8°), Indonesia setelah terjadi CME pada 28 Oktober 2009 menunjukkan bahwa model dapat memprediksi dengan cukup baik badai ionosfer positif pada tanggal 29 Oktober 2003 yang mengawali badai ionosfer negatif.



Gambar 8. Kondisi ionosfer tanggal 30 Oktober 2003 setelah CME memasuki magnetosfer pada 29 Oktober 2003.

Walaupun dapat mengikuti badai ionosfer negatif tetapi perbandingan prediksi foF2 GIM-MSILRI pada saat terjadi badai ionosfer negatif tanggal 30 Oktober 2003 ini 2,8 MHz lebih tinggi dari data pengamatan ionosonda yang mengamati badai ionosfer negatif pada jam 15:00 WIB senilai sekitar 5 MHz. Badai ionosfer negatif terus berlanjut sampai tanggal 31 Oktober 2003 yang

disebabkan oleh CME tanggal 29 Oktober jam 20:50 UT (atau 30 Oktober jam 03:50 WIB di Tanjungsari) yang mencapai magnetosfer bumi pada tanggal 30 Oktober 2003 jam 16:30 UT (atau 23:30 WIB di Tanjungsari). Badai ionosfer 31 Oktober 2003 tidak sebesar badai ionosfer tanggal 30 Oktober 2003. Prediksi foF2 GIM-MSILRI saat badai ionosfer ini sangat besar bedanya dengan pengamatan yaitu sekitar 5 MHz lebih tinggi dari data pengamatan ionosonda pada jam 11:00 WIB. Dari nilai normalnya pada 27 Oktober 2003 jam 11:00 WIB telah diamati terjadi penurunan foF2 sampai -6.5 MHz sementara dari model foF2 GIM-MSILRI hanya memprediksi badai ionosfer negatif sebesar -1.5 MHz. Ini menunjukkan bahwa model foF2 GIM-MSILRI tidak dapat memprediksi foF2 dengan akurat sehingga model hubungan foF2 dengan TEC GIM-MSILRI perlu dikoreksi jika akan digunakan untuk prediksi foF2 saat terjadi badai ionosfer.

KESIMPULAN

Telah dikembangkan model foF2 GIM-MSILRI yang menghubungkan antara kuadrat foF2 dengan TEC melalui koefisien penghubung yang hanya tergantung pada bulan dan indek aktivitas matahari R12. Model tersebut dibuat dengan menganggap bahwa ionosfer adalah satu lapisan dengan kerapatan elektron homogen sama dengan kerapatan elektron maksimum lapisan F2 ionosfer di mana ketebalannya dianggap tidak tergantung lintang dan waktu lokal. Model tersebut dapat digunakan untuk prediksi foF2 harian *real time* global dengan tersedianya TEC GIM harian *real time* yang dapat diakses secara bebas dari internet.

Validasi model tersebut pada kondisi aktivitas matahari rendah (1 Desember 2009) dan pada saat terjadi badai matahari (28 dan 29 Oktober 2010); menunjukkan bahwa model foF2 GIM-MSILRI memiliki simpangan dari data pengamatan ionosonda yang bervariasi terhadap lintang dan waktu lokal. Pada saat terjadi badai matahari CME yang mengarah ke bumi dan menimbulkan badai ionosfer, model foF2 GIM-MSILRI memprediksi foF2 lebih tinggi dari data pengamatan. Oleh karena itu model foF2 GIM-MSILRI hanya direkomendasikan untuk pedoman operasional harian dalam komunikasi HF pada saat tingkat aktivitas matahari tenang.

Agar model hubungan foF2 dan TEC dapat digunakan untuk prediksi foF2 global yang akurat pada beberapa tingkat aktivitas matahari dan geomagnet yang berbeda maka model tersebut perlu diperbaiki yang antara lain dengan menambahkan indek gangguan geomagnet dan mempertimbangkan variasi lintang geomagnet.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Buldan, M., Asnawi, Dyah R.M., Aries Kurniawan dan Syarifudin. "Verifikasi dan Revisi MISLRI02 Menggunakan Data Ionosonda Vertikal Sumedang dan IRI 2001." Pengembangan Model Ionosfer Regional Indonesia, Volume 1: Model Empiris, Buku Ilmiah LAPAN, 2007
- 2 Schaer, S. "Mapping and Prediction the Earth Ionosphere using the Global Positioning System." Doctoral Thesis, University of Bern, 1999.
- 3 Kouris, S.S., T.D. Xenos, K.V. Polimeris, dan D. Stergiou. "TEC and foF2 variations: preliminary results." *Annals of Geophysics*, Vol. 47, No. 4, 2004.
- 4 Pavlov, A.V. dan N.M. Pavlova. "Anomalous variations of NmF2 over the Argentine Islands: a statistical study." *Ann. Geophys.* 27 (2009): 1363–1375.
- 5 Perwitasari, Septi dan Buldan M. "Perbandingan Metode Estimasi DCB Penerima GPS Untuk Pemodelan Ionosfer." Prosiding Seminar Nasional Revitalisasi Data dan Informasi Keruangan (Geospasial) Untuk Meningkatkan Efisiensi Pengelolaan Sumber Daya Daerah, Yogyakarta, 26 Juni 2009.
- 6 Rosenqvist, L., H. Opgenoorth, S. Buchert, I. McCrea, O. Amm, dan C. Lathuillere. "Extreme solar-terrestrial events of October 2003: High-latitude and Cluster observations of the large geomagnetic disturbances on 30 October." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, A 09 S 23, doi:10.1029/2004JA010927, 2005.