

ANALISA KETELITIAN PEMETAAN *MULTIQUADRATIC* UNTUK FREKUENSI KRITIS IONOSFER REGIONAL

[ANALYSIS ACCURACY OF *MULTIQUADRATIC* METHOD FOR MAPPING OF CRITICAL FREQUENCY OF IONOSPHERIC LAYER REGION]

Jiyo*), Ednofri**)

*) Peneliti Bidang Ionosfer dan Telekomunikasi, Lapan

***) Loka Pengamatan Atmosfer, Kototabang, Lapan

e-mail: jiyolpnbdg@yahoo.com

Diterima 6 September 2012; Disetujui 15 November 2012

ABSTRACT

In this paper we discuss test of accuracy of ionospheric critical frequency mapping by using *Multiquadratic* method. The test of mapping accuracy use observation data of Biak, Pontianak, Kototabang, Sumedang, and Pameungpeuk observatories, during 2006-2007 and 2009-2010, and additional data from ionospheric model. Analysis have obtained five conclusions. *Firstly*, application of *Multiquadratic* using observation data has obtained the higher foF2 than it application using asimilation data. *Secondly*, values of foF2 from the map have an linear correlations to observation values and the values will be close when reference points distance are more close. *Thirdly*, application of *Multiquadratic* method by using observation data and 1600 km minimum distance of reference points, have obtained the relative error less than 0.25 and deviation standard 0.24. While application using asimilation data result the same value of realitive error and minimum distance of reference points is 1000 km. *Forthly*, the accuracy of foF2 map of this method able to be improved by using addational reference points such as the minimum distance of reference points on the order of few kilometers. *Fifthly*, because in actually, the distances of ionospheric observatories location in Indonesia are on the order of 800 km, then the foF2 mapping for this region needs additional asimilation data.

Keywords: *Critical frequency, Multiquadratic, Asimilation, Reference point, Relative error, Deviation standard*

ABSTRAK

Dalam makalah ini kami membahas pengujian ketelitian peta frekuensi kritis lapisan ionosfer (*foF2*) regional Indonesia, yang ditentukan menggunakan metode *Multiquadratic*. Pengujian telah dilakukan menggunakan data pengamatan di Biak, Pontianak, Kototabang, Sumedang, dan Pameungpeuk selama tahun 2006-2007 dan 2009-2010, serta menggunakan data tambahan yang diturunkan dari model ionosfer. Hasil analisis adalah *Pertama*, penerapan metode *Multiquadratic* menggunakan data pengamatan menghasilkan peta foF2 yang relatif lebih teliti dibandingkan dengan menggunakan data asimilasi. *Kedua*, nilai foF2 hasil pemetaan berkorelasi linier dengan data pengamatan dan akan semakin mendekati nilai sebenarnya jika jarak antar titik rujukan terdekat juga semakin kecil. *Ketiga*, penerapan metode *Multiquadratic* menggunakan data pengamatan dengan jarak antar titik rujukan

terdekat kurang dari 1600 km menghasilkan galat relatif hingga 0,25 dan simpangan baku 0,24. Sedangkan penerapan dengan data asimilasi menghasilkan galat relatif hampir sama dan jarak antar titik rujukan terdekat kurang dari 1000 km. *Keempat*, ketelitian peta *foF2* yang dihasilkan dengan metode ini dapat ditingkatkan dengan cara menambahkan titik rujukan sedemikian sehingga jarak antar titik rujukan terdekat hanya beberapa ratus kilometer saja. Cara ini dapat dilakukan dengan menggunakan data asimilasi. *Kelima*, khususnya daerah-daerah di Indonesia yang belum memiliki stasiun pengamatan ionosfer maka perlu dilakukan pemetaan dengan menggunakan data asimilasi.

Kata kunci: *Frekuensi kritis, Multiquadratic, Asimilasi, Titik rujukan, Galat relatif, Simpangan baku*

1 PENDAHULUAN

Peta frekuensi kritis lapisan F ionosfer (*foF2*) merupakan salah satu bentuk kemasan informasi kondisi lapisan tersebut di suatu wilayah. Dengan peta dapat diberikan gambaran tentang kondisi lapisan ionosfer, baik yang sudah terjadi, sedang terjadi, maupun yang akan terjadi. Informasi ini dapat digunakan untuk berbagai keperluan mitigasi dampak dinamika ionosfer terhadap komunikasi *terrestrial*, komunikasi *satelit*, dan sistem *navigasi* berbasis satelit. Mitigasi dimaksudkan sebagai upaya meminimalkan kemungkinan kegagalan komunikasi dan navigasi akibat perubahan lapisan ionosfer.

Pada dasarnya, proses pembuatan suatu peta *foF2* memerlukan informasi nilai parameter tersebut untuk setiap titik dalam wilayah yang akan dipetakan. Terdapat dua cara mendapatkan nilai *foF2* di semua titik dalam peta. *Pertama*, nilai *foF2* diperoleh dengan cara menjalankan suatu model ionosfer untuk setiap titik dalam cakupan peta yang dibuat. Model yang dapat digunakan misalnya Model Sederhana Ionosfer Lintang Rendah Indonesia (MSILRI) yang telah dikembangkan oleh Muslim *et al.*, (2007), atau menggunakan model *NeQuick*, model *International Reference Ionosphere* (IRI) (Bilitza, 2001), ataupun model semi empiris IPS (Fox dan McNamara, 1986). Hasil yang diperoleh merupakan peta *foF2* berdasarkan model. *Kedua*, nilai *foF2* diperoleh dari pengamatan di beberapa titik rujukan dan kemudian nilai untuk titik-titik lainnya dihitung menggunakan metode tertentu. Salah satu metode pemetaan cara kedua adalah *Multiquadratic*.

Sebagian besar wilayah Indonesia merupakan lautan dan hutan belantara yang sulit dijangkau, sehingga pengamatan lapisan ionosfer di lokasi tersebut sulit dilakukan. Akibatnya terdapat banyak lokasi yang tidak dapat diperoleh data ionosfernya. Selain itu, wilayah nusantara yang luas memerlukan cukup banyak stasiun pengamatan yang memerlukan biaya yang tidak sedikit. Salah satu cara untuk mengatasi kendala tersebut adalah dengan pendekatan menggunakan peta.

Multiquadratic adalah satu metode terbaik untuk membuat peta parameter frekuensi kritis lapisan ionosfer (*foF2*) (Zolesi, 2000). Peta *foF2* dan parameter lainnya dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan praktis, misalnya untuk evaluasi kanal frekuensi komunikasi jarak dekat (NVIS, *Near Vertical Incidence Sounding*), untuk menentukan lokasi suatu stasiun radio dalam *direction finding* ataupun *surveillance*. Dengan penurunan menggunakan persamaan fisis atau empiris, peta *foF2* dapat digunakan untuk menurunkan nilai *Total Electron Content* (TEC) di lokasi yang tidak teramati oleh perangkat resiver *Global Positioning System* (GPS).

Pembahasan tentang penerapan metode *Multiquadratic* untuk pemetaan *foF2* regional Indonesia telah dilakukan dan hasilnya menunjukkan bahwa metode ini mampu menunjukkan variasi *foF2* secara *temporal* dan *spasial* dengan baik (Jiyo, 2000). Namun demikian, pengujian dengan menggunakan data hasil pengamatan belum dilakukan. Dengan tersedianya data hasil pengamatan di Biak, Pontianak, Kototabang, Pameungpeuk, dan Sumedang, maka pengujian terhadap peta yang dihasilkan dengan metode ini dapat dilakukan.

Tujuan penelitian ini adalah menguji ketelitian metode *Multiquadratic* sebagai metode pemetaan *foF2* ionosfer regional. Selain itu, tujuan penelitian ini adalah mendapatkan konfigurasi titik rujukan yang diperlukan oleh metode *Multiquadratic* sedemikian sehingga tingkat akurasiya memenuhi syarat. Konfigurasi diperoleh dengan menambahkan titik rujukan yang bukan stasiun pengamatan kedalam metode pemetaan. Dengan diketahuinya ketelitian metode ini, maka penerapannya juga akan dapat memberikan tingkat ketelitian yang dapat mengoptimalkan penggunaan informasi *foF2* dan parameter turunannya.

2 LANDASAN TEORI

Pada awalnya metode *Multiquadratic* dikembangkan untuk membuat pemetaan topografi permukaan Bumi yang tidak merata (Hardy, 1971). Kemudian metode ini diperluas untuk pendekatan potensial gangguan dalam riset fisika Bumi (Hardy dan Nelson, 1986). Perkembangan selanjutnya, metode ini digunakan untuk pemetaan parameter lapisan ionosfer (Teryokin dan Mikhailov, 1992). Persamaan dasar metode ini adalah sebagai berikut:

$$f = \sum_{i=1}^n c_i \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} + b \tag{2-1}$$

Dengan *f* adalah nilai parameter ionosfer yang akan dipetakan, *c_i* adalah koefisien yang nilainya bergantung pada *foF2* hasil pengamatan di titik/stasiun rujukan, *b* merupakan suatu tetapan, dan *n* menyatakan jumlah stasiun rujukan. Peubah *x*, *y*, dan *z* dirumuskan berdasarkan persamaan (2-2) berikut:

$$\left. \begin{aligned} x &= r_o \sin l \cos k \\ y &= r_o \sin l \sin k \\ z &= r_o \cos k \dots \dots \end{aligned} \right\} \tag{2-2}$$

Dengan *r_o* merupakan radius bumi, *l* adalah 90° dikurangi derajat lintang titik rujukan, dan *k* menyatakan derajat bujur titik rujukan. Di daerah ekuator seperti Indonesia, nilai *r_o* dapat didekati dengan angka 6378,388 kilometer. Syarat batas untuk koefisien *c_i* adalah:

$$\sum_{i=1}^n c_i = 0 \tag{2-3}$$

Penurunan rumus (2-1), (2-2), dan (2-3) sedemikian sehingga diperoleh matriks sistem persamaan linier dan langkah penyelesaiannya menggunakan langkah *operasi baris elementer* dan *subtitusi mundur*, yang telah dibahas pada tulisan terdahulu (Jiyo, 2000). Solusi persamaan linier dimaksud berupa himpunan {*c₁*, *c₂*, ..., *c_n*} yang kemudian digunakan untuk menghitung nilai *f* di titik-titik lainnya. Dengan prinsip inilah metode *Multiquadratic* digunakan untuk membuat peta.

3 METODOLOGI

Dalam melakukan pengujian terhadap keluaran metode *Multiquadratic* diperlukan data $foF2$ rujukan dan pembandingan atau data uji. Pengujian dilakukan dalam dua kelompok berdasarkan sumber datanya. Uji pertama dilakukan dengan menggunakan $foF2$ hasil pengamatan, baik data rujukan maupun data ujinya. Uji kedua diterapkan dengan menggunakan asimilasi data $foF2$ hasil pengamatan dan data turunan dari model.

Lokasi titik-titik rujukan dan titik uji ditunjukkan pada Gambar 3-1. Dari 12 titik rujukan pada Gambar 3-1, lima diantaranya merupakan stasiun pengamatan dan telah menghasilkan data $foF2$. Kelima titik tersebut adalah Biak (-0,10°, 136,00°), Pontianak (-0,03°, 109,33°), Kototabang (-,30°, 100,35°), Sumedang (-6,91°, 107,83°), dan Pameungpeuk (-7,65°, 107,96°). Tujuh lokasi lainnya yakni Makassar (-5,12°, 119,40°), Ambon (-3,72°, 128,20°), Merauke (-8,47°, 140,33°), Sorong (-0,88°, 131,25°), Manokwari (-0,87°, 134,08°), Manado (1,48°, 124,85°) dan Kupang (-10,17°, 123,58°). Dua lokasi terakhir (Manado dan Kupang) dipersiapkan menjadi stasiun pengamatan, saat ini sedang dalam proses instalasi perangkat ionosondanya.



Gambar 3-1: Lokasi stasiun pengamatan dan kota yang digunakan untuk menentukan konfigurasi titik rujukan dan titik pengujian

Misalkan peta yang dihasilkan dengan metode *Multiquadratic*, diperoleh nilai $foF2_{(m)}$ untuk titik uji. Kemudian dari pengamatan di lokasi titik uji diperoleh nilai $foF2_{(o)}$. Selanjutnya, tingkat ketelitian metode pemetaan akan dianalisis melalui galat relatif (e) yang dirumuskan sebagai berikut:

$$e = \frac{(foF2_{(m)} - foF2_{(o)})}{foF2_{(o)}} \quad (3-1)$$

Selain menggunakan galat relatif, analisis tingkat ketelitian peta juga dilakukan dengan menggunakan persamaan linier yang menghubungkan $foF2_{(m)}$ dengan $foF2_{(o)}$. Misalkan hubungan linier yang diperoleh adalah $foF2_{(m)} = a foF2_{(o)}$ dengan a menyatakan gradien dari persamaan tersebut. Berdasarkan nilai gradien a dapat diketahui tingkat kesesuaian antara $foF2_{(m)}$ dengan $foF2_{(o)}$.

Pada pengujian menggunakan data pengamatan, peta $foF2$ yang dibuat menggunakan metode *Multiquadratic* dengan data $foF2$ hasil pengamatan dari 3 atau 4 stasiun rujukan (S_r), akan dibandingkan data pengamatan di stasiun uji (S_u). Lima konfigurasi S_r-S_u dan jarak minimumnya (d) ditunjukkan pada Tabel 3-1. Jarak minimum S_u-S_r akan menjadi rujukan dalam membandingkan nilai e dan a antar

konfigurasi titik rujukan. Secara logis, nilai e untuk konfigurasi dengan d lebih pendek akan lebih kecil pula. Artinya, nilai $foF2$ dari titik yang lebih dekat dengan titik rujukan akan lebih mendekati nilai hasil pengamatan.

Tabel 3-1: SKEMA PENGUJIAN MENGGUNAKAN DATA OBSERVASI

Konfigurasi	Stasiun Rujukan (S_r)	Stasiun Uji (S_u)	Jarak d (km)
1	Biak, Pontianak, Kototabang, Sumedang	Pameungpeuk	84
2	Biak, Pontianak, Kototabang	Sumedang	783
3	Biak, Kototabang, Sumedang	Pontianak	783
4	Biak, Pontianak, Sumedang	Kototabang	999
5	Kototabang, Pontianak, Sumedang	Biak	2967

Syarat data yang diperlukan untuk uji ini adalah bahwa data $foF2$ keempat titik rujukan dan satu titik uji haruslah tersedia. Jika tidak, maka proses pengujian tidak bisa dilakukan. Oleh karena itu, dilakukan seleksi terhadap data $foF2$ yang tersedia.

Pengujian menggunakan data pengamatan sangat bergantung kepada keberadaan stasiun pengamatan. Faktanya baru ada 5 stasiun pengamatan sebagaimana dijelaskan sebelumnya. Untuk mengatasi hal itu, maka digunakan campuran data $foF2$ hasil pengamatan dan yang diperoleh dari model. Untuk titik-titik rujukan yang belum atau tidak ada perangkat pengamatannya, maka nilai $foF2$ ditentukan dari model ionosfer yang ada. Dalam makalah ini model yang digunakan adalah model semi empiris IPS yang terkandung dalam paket program *Advanced Stand-Alone Prediction System (ASAPS)*. Data yang digunakan untuk pengujian cara kedua ini disebut juga data *asimilasi*. Konfigurasi pengujian ditunjukkan pada Tabel 3-2.

Tabel 3-2: SKEMA PENGUJIAN DENGAN DATA ASIMILASI

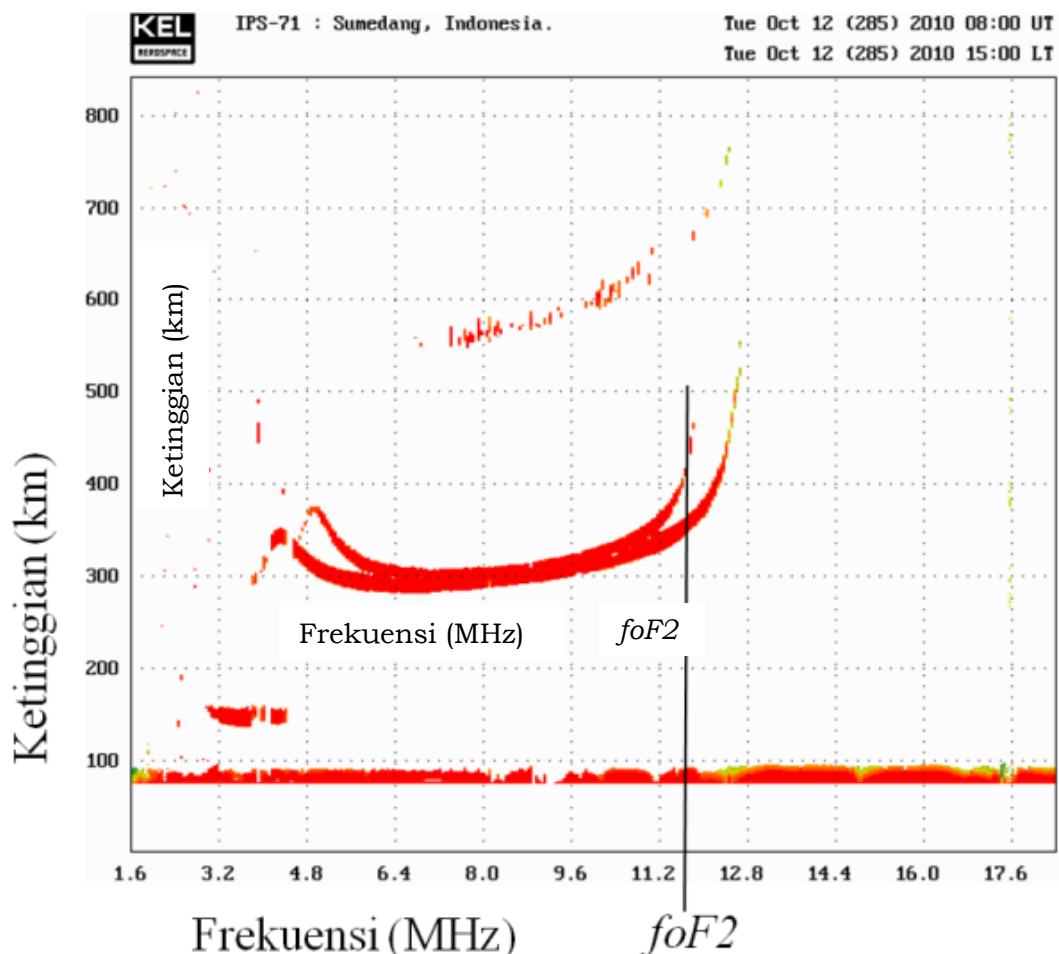
Konfigurasi	Stasiun Rujukan (S_r)	Stasiun Uji (S_u)	Jarak d (km)
6	Kototabang, Pontianak, Tanjungsari, Makasar	Biak	1899
7	Kototabang, Pontianak, Tanjungsari, Makassar, Kupang, Manado	Biak	1270
8	Kototabang, Pontianak, Tanjungsari, Makasar, Kupang, Manado, Ambon, Merauke	Biak	918
9	Kototabang, Pontianak, Tanjungsari, Makasar, Kupang, Manado, Ambon, Merauke, Sorong	Biak	528
10	Kototabang, Pontianak, Tanjungsari, Makasar, Kupang, Manado, Ambon, Merauke, Sorong, Manokwari	Biak	214

Selanjutnya, perbedaan antara $foF2$ keluaran metode *Multiquadratic* dengan data pengamatan stasiun uji dapat dianalisis sehingga diperoleh tingkat kesalahannya.

4 PENGAMATAN DAN DATA

Pengamatan lapisan ionosfer menggunakan radar *High Frequency (HF)* yang dikenal dengan ionosonda. Tipe ionosonda yang digunakan yaitu *IPS71* di Sumedang, *IPS51* di Pameungpeuk, *FMCW* di Kototabang, dan *CADI* di Pontianak dan Biak. Data mentah yang dihasilkan ionosonda disebut *ionogram* yaitu berupa grafik dengan sumbu tegak menyatakan ketinggian (km) dan sumbu mendatarnya menunjukkan frekuensi (MHz). Nilai $foF2$ diperoleh melalui proses pembacaan terhadap ionogram dengan prosedur tertentu (Pigott dan Rawer, 1978) yang disebut *scaling*.

Data ionosfer yang digunakan adalah hasil pengamatan tahun 2006-2007 dan 2009-2010. Pertimbangannya adalah bahwa tahun 2006-2007 aktivitas matahari masih dapat dikategorikan dalam keadaan tenang (bilangan sunspot R_{12} maksimum = 21) dan tahun 2009-2010 aktivitas matahari juga masih dalam keadaan tenang tetapi mulai meningkat (R_{12} maksimum = 29). Selain itu, data $foF2$ sudah tersedia dalam bentuk numerik yang merupakan hasil *scaling* dari sebuah tim khusus. Untuk menyederhanakan proses pengolahan, maka data diseleksi berdasarkan data terlengkap dari segi waktu pengamatan, sehingga terpilih data untuk Februari dan Maret 2006; April, Oktober, November, Desember 2007; September dan Desember 2009; serta Januari, Maret, dan Juni 2010).



Gambar 4-1: Ionogram dan frekuensi kritis lapisan F ($foF2$)

Ionosonda mengamati lapisan ionosfer setiap 15 menit sekali. Meskipun demikian dalam penelitian ini data $foF2$ yang digunakan untuk pengujian adalah data pengamatan jam-an. Dari proses seleksi data $foF2$ diperoleh data tahun 2006-2007 sejumlah 914 pasang dan tahun 2009-2010 sejumlah 1303 pasang. Setelah dilakukan pembuatan peta menggunakan metode *Multiquadratic* dan dihitung galat relatifnya, maka diperoleh hasil seperti pada Tabel 4-1, Gambar 5-1, dan Gambar 5-2.

Tabel 4-1: GALAT RELATIF e DAN KONSTANTA PERSAMAAN-PERSAMAAN LINIER HASIL UJI MENGGUNAKAN DATA PENGAMATAN

Konfigurasi	Galat relatif (e)		Gradien pers. linear (a)	Koefisien Korelasi
	Rataan	Simp. baku		
1	0,10	0,09	1,08	0,90
2	0,04	0,16	1,03	0,85
3	0,01	0,24	0,91	0,77
4	0,60	0,28	1,55	0,84
5	4,45	1,51	5,09	0,66

Tabel 4-2: GALAT RELATIF e DAN KONSTANTA PERSAMAAN-PERSAMAAN LINIER HASIL UJI MENGGUNAKAN DATA ASIMILASI

Konfigurasi	Galat relatif (e)		Gradien pers. linear (a)	Koefisien Korelasi
	Rataan	Simp. baku		
6	2,04	0,74	2,84	0,73
7	0,82	0,41	1,69	0,78
8	0,27	0,26	1,19	0,80
9	0,24	0,25	1,16	0,81
10	0,21	0,25	1,14	0,81

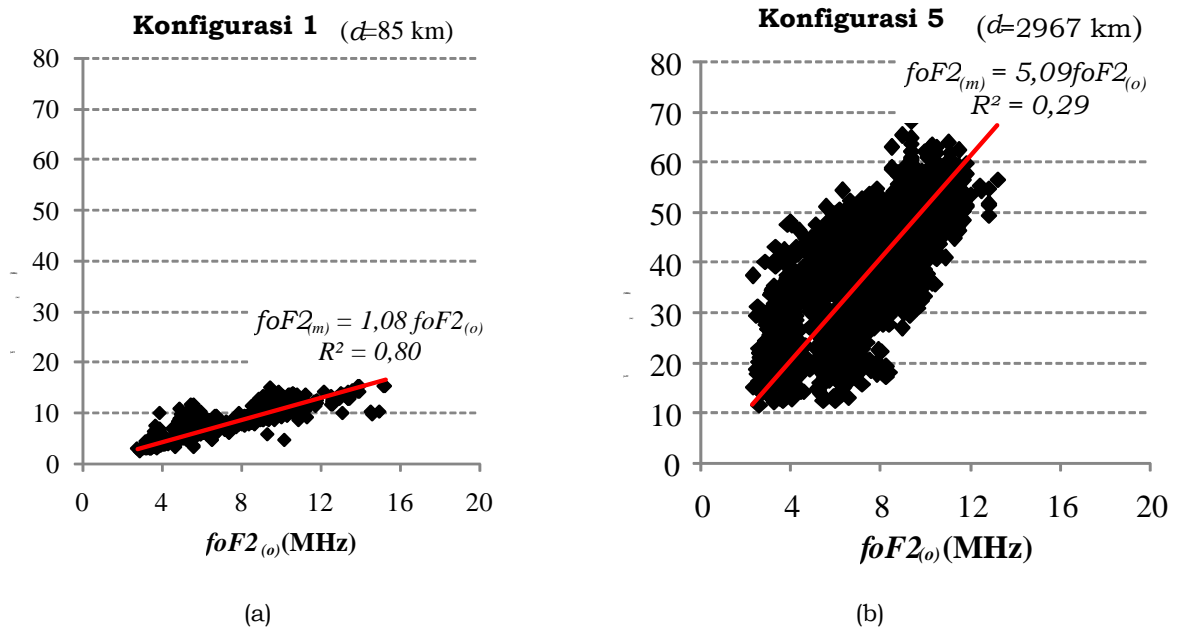
5 PEMBAHASAN

Grafik hubungan linier antara $foF2_{(m)}$ dan $foF2_{(o)}$ yang ditunjukkan oleh Gambar 5-1 dan Gambar 5-2, menunjukkan bahwa semakin besar jarak d , maka gradien persamaannya semakin besar dan menjauh dari angka 1. Ini berarti bahwa semakin besar d , maka nilai $foF2$ dari peta hasil perhitungan menggunakan metode *Multiquadratic* semakin jauh dari data observasi. Artinya, nilai $foF2$ hasil pemetaan

untuk titik yang semakin jauh dari titik atau stasiun rujukan, maka akurasinya akan semakin berkurang. Hal ini berlaku baik untuk pemetaan menggunakan data pengamatan maupun menggunakan data asimilasi.

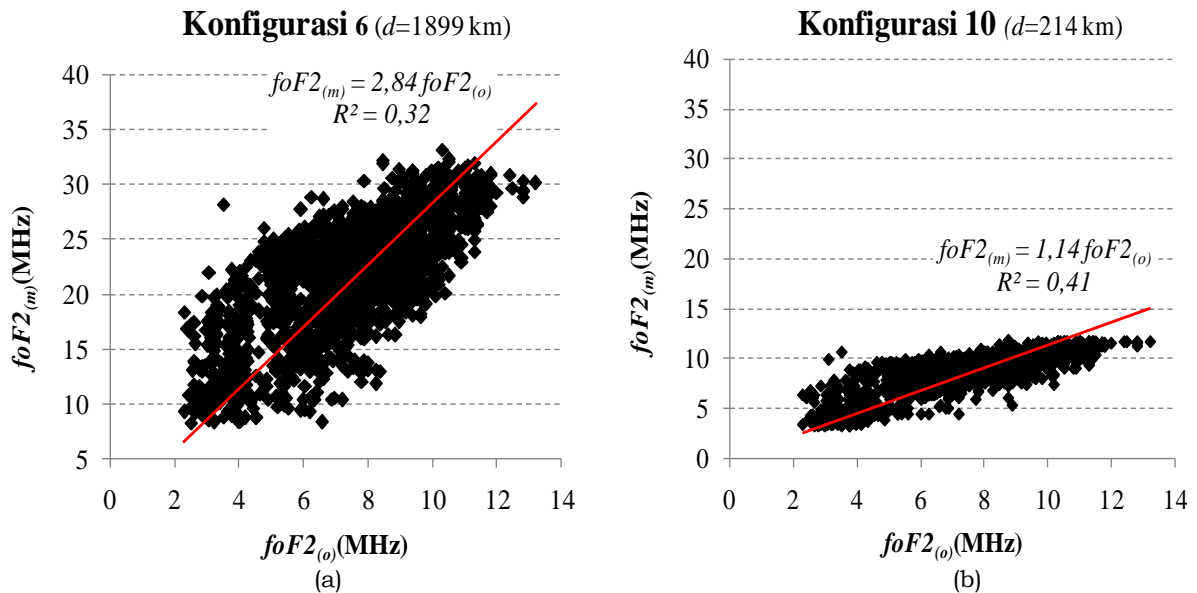
Uji dengan konfigurasi 1-menggunakan titik rujukan Biak, Pontianak, Kototabang, dan Sumedang, serta titik uji Pameungpeuk menghasilkan gradien $a = 1,08$ (Gambar 5-1(b)). Nilai ini menunjukkan bahwa $foF2$ untuk Pameungpeuk hasil pemetaan dengan metode *Multiquadratic* hampir indentik dengan $foF2$ pengamatan di tempat itu. Hal sebaliknya terjadi untuk konfigurasi 5. Dengan titik rujukan Kototabang, Pontianak, dan Sumedang, dihasilkan $foF2$ yang sangat jauh dari hasil pengamatan. Dengan nilai gradien $a = 5,09$ (Gambar 5-1(a)), maka $foF2$ hasil pemetaan setara dengan 5 kali nilai sebenarnya.

Pengujian metode *Multiquadratic* menggunakan data asimilasi juga menghasilkan hal yang hampir sama. Untuk pengujian dengan konfigurasi 6 dengan nilai $d = 1899$ km, diperoleh nilai gradien $a = 2,84$ (Gambar 5-2(a)). Nilai $foF2$ yang diperoleh dari pemetaan hampir 3 kali nilai hasil pengamatannya. Kemudian pengujian dengan konfigurasi 10 untuk nilai $d = 214$ km diperoleh gradien $a = 1,14$ (Gambar 5-2(b)). Dengan konfigurasi ini nilai $foF2$ hasil pemetaan menggunakan metode *Multiquadratic* hampir sama dengan hasil pengamatan.

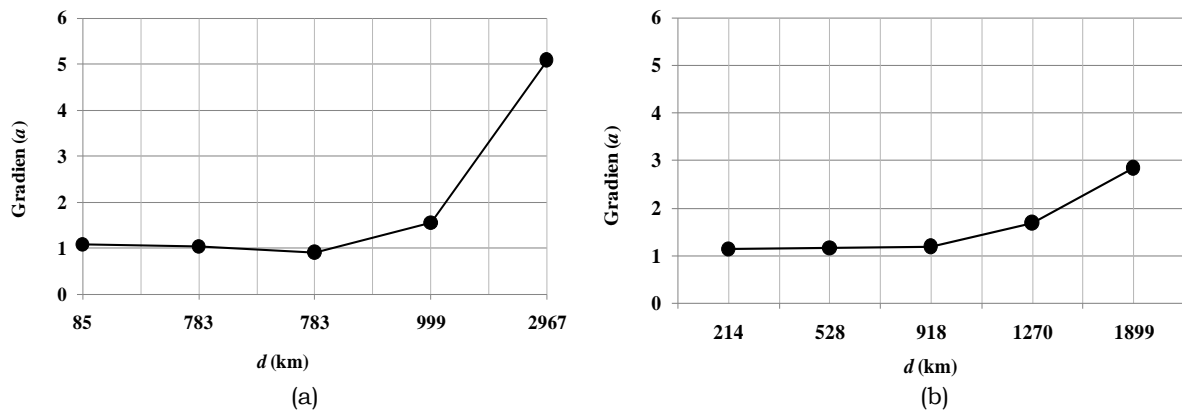


Gambar 5-1: Korelasi antara $foF2_{(m)}$ hasil pemetaan menggunakan data pengamatan dengan $foF2_{(o)}$ hasil pengamatan

Secara lengkap, pengaruh jarak (d) terhadap gradien persamaan linier yang menghubungkan $foF2$ hasil pemetaan dengan metode *Multiquadratic* dengan data pengamatan terlihat pada Gambar 5-3. Baik uji menggunakan data pengamatan maupun menggunakan data asimilasi, keduanya menunjukkan bahwa semakin besar nilai d , maka terjadi kenaikan nilai a . Untuk nilai d hingga sekitar 900 km, gradien a masih cukup dekat dengan 1. Artinya, hingga jarak 900 km, nilai $foF2$ hasil pemetaan dengan metode *Multiquadratic* masih cukup dekat dengan hasil pengamatan. Setelah jarak d lebih besar dari 900 km, maka gradien a sudah mulai naik menjauhi 1. Dengan demikian, berdasarkan grafik a pada Gambar 5-3 dapat diperkirakan bahwa jarak 900 km dapat digunakan sebagai jarak maksimal untuk pemetaan dengan metode ini.



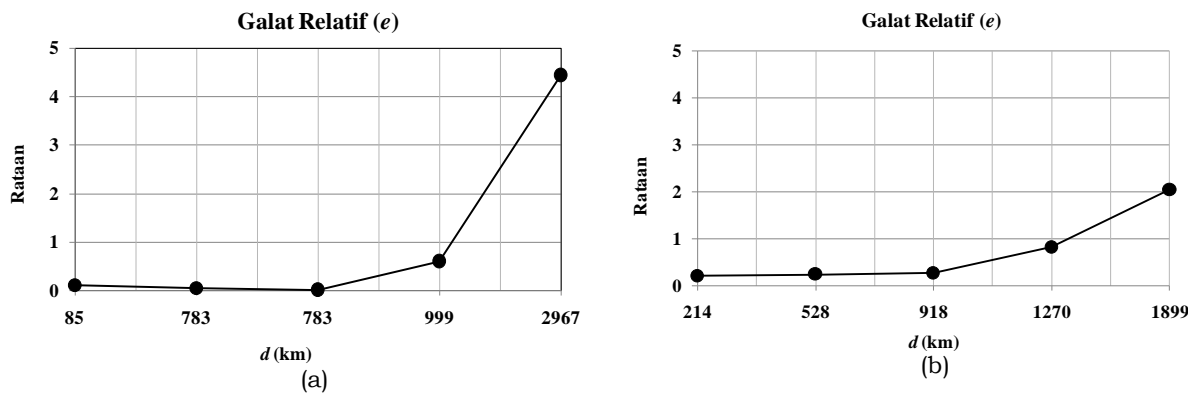
Gambar 5-2: Korelasi antara $foF2_{(m)}$ hasil pemetaan menggunakan data asimilasi dengan $foF2_{(o)}$ hasil pengamatan



Gambar 5-3: Gradien persamaan linier antara foF2 hasil pemetaan dengan pengamatan untuk uji menggunakan data pengamatan (a) dan menggunakan data asimilasi (b)

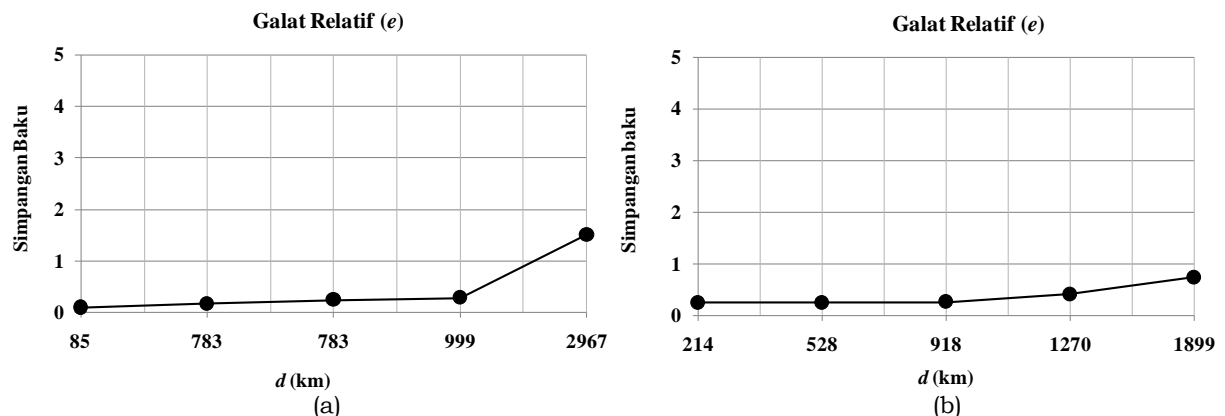
Variasi rataan galat realtif (e) terhadap perubahan d ditunjukkan oleh Gambar 5-4. Galat relatif hasil pengujian menggunakan data pengamatan seperti Gambar 5-4(a). Dengan grafik ini dapat diperkirakan bahwa nilai e yang masih cukup kecil (ambil 0,25) diperoleh untuk konfigurasi dengan nilai d antara 783 km hingga 999 km. Pada jarak $d = 783$ km nilai $e = 0,01$ dan pada jarak $d = 999$ km nilai $e = 0,6$. Sementara itu, galat relatif untuk pengujian menggunakan data asimilasi ditunjukkan oleh Gambar 5-4(b). Dengan grafik tersebut dapat diperkirakan nilai e yang masih relatif kecil diperoleh untuk konfigurasi 9 dengan $d = 528$ km dan konfigurasi 8 dengan $d = 918$. Pada jarak $d = 528$ nilai rataan galat relatifnya adalah 0,25 dan pad $d = 918$ nilainya 0,27.

Berdasarkan galat relatif yang diperoleh, maka dapat diperkirakan batas maksimal jarak antara titik rujukan dengan titik dalam peta (d_{maks}). Untuk pemetaan dengan data pengamatan seluruhnya, maka diperoleh nilai d_{maks} antara 783 km hingga 918 km, atau dapat diambil pendekatan nilai minimum selang tersebut 800 km. Kemudian untuk pemetaan dengan data asimilasi, maka diperoleh nilai d_{maks} antara 528 km hingga 918 km, atau dapat diambil hampiran minimum dari selang tersebut yaitu 500 km.



Gambar 5-4: Grafik rata-rata galat relatif, e untuk uji menggunakan data pengamatan (a) dan data asimilasi (b)

Grafik pada Gambar 5-5 menunjukkan simpangan baku galat relatif e . Untuk konfigurasi titik rujukan pemetaan menggunakan data pengamatan yang ditunjukkan Gambar 5-5(a), pada jarak $d = 783$ km simpangan bakunya 0,24, sehingga untuk jarak 800 km nilainya sedikit lebih tinggi namun masih lebih rendah dari 0,28. Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 5-5(a). Sedangkan untuk konfigurasi titik rujukan pemetaan menggunakan data asimilasi, pada jarak $d = 528$ nilainya sedikit lebih rendah dari 0,25. Hal ini diperlihatkan pada Gambar 5-5(b).



Gambar 5-5: Simpangan baku galat relatif (e) untuk uji menggunakan data pengamatan (a) dan data asimilasi (b)

Lebih lanjut, untuk pemetaan menggunakan data pengamatan terlihat bahwa perbedaan nilai e untuk konfigurasi 2 dan 1 tidak terlalu besar. Nilai e pada konfigurasi 2 adalah 0,06 dan untuk konfigurasi 1 adalah 0,10, sehingga perbedaannya 0,06. Perbedaan ini jauh lebih kecil dibandingkan dengan perbedaan antara konfigurasi 2 dengan konfigurasi 4 dengan $e = 0,6$. Pada konfigurasi 2, jarak $d = 783$ km adalah jarak Pontianak-Sumedang yang menunjukkan perbedaan garis lintang kedua titik rujukan tersebut, karena garis bujurnya tidak berbeda jauh. Sementara jarak $d = 999$ km adalah jarak Pontianak-Kototabang yang merupakan perbedaan garis bujur antara keduanya, karena garis lintangnya hampir sama. Hal ini yang diduga menjadi penyebab besarnya perbedaan nilai e pada konfigurasi 4. Hal demikian semakin diperkuat oleh besarnya nilai e untuk konfigurasi 5. Pada konfigurasi 5 jarak $d = 2967$ km merupakan representasi perbedaan garis bujur antara Pontianak dengan Biak.

Pemetaan $foF2$ dengan metode *Multiquadratic* yang dibahas menggunakan rujukan waktu Indonesia Barat (UT+7). Sementara itu, agar mencakup seluruh wilayah

Indonesia, maka titik lokasi rujukan yang digunakan berada di wilayah dengan waktu yang berbeda yaitu UT+7, WITA(UT+8) dan WIT(UT+9). Di sisi lain, untuk selang waktu tertentu, perbedaan nilai $foF2$ di ketiga wilayah tersebut berbeda. Karena sifat variasi harian $foF2$ yang bergantung terhadap waktu lokal, maka terjadilah perbedaan hasil uji konfigurasi 2 dan 5. Contoh penjelasannya pada pemetaan $foF2$ untuk pukul 6:00 WIB. Pada saat yang sama di Manado dan Kupang sudah pukul 7:00 WITA sehingga nilai $foF2$ akan lebih tinggi dibandingkan untuk Pontianak. Demikian pula di Biak sudah pukul 8:00 WIT yang nilai $foF2$ -nya akan lebih tinggi dari Manado dan Kupang. Akibatnya, jika peta $foF2$ untuk pukul 6:00 WIB dibuat dengan titik rujukan hanya Pontianak, Kototabang, dan Sumedang, maka peta $foF2$ untuk Biak akan lebih rendah dari nilai sebenarnya. Demikian pula sebaliknya, jika titik rujukan yang digunakan hanya Biak dan Merauke, maka peta $foF2$ di Pontianak, Kototabang, dan Sumedang akan lebih tinggi dari nilai sebenarnya.

Jadi, berdasarkan analisis di atas, maka pemetaan $foF2$ ionosfer regional dapat dilakukan menggunakan metode *Multiquadratic* dengan titik rujukan harus mencakup wilayah Barat, Tengah, dan Timur Indonesia. Untuk menghasilkan peta $foF2$ dengan ketelitian hingga 25%, maka diperlukan konfigurasi sedemikian sehingga jarak maksimum antar titik rujukan kurang dari 2 kali d_{maks} . Jika menggunakan data $foF2$ pengamatan, maka jarak antar titik rujukan harus lebih rendah 2 x 800 km dan jika menggunakan $foF2$ gabungan antara data pengamatan dan data penurunan dari model, maka jarak antar titik rujukan harus lebih rendah dari 2 x 500 km. Syarat ini diperlukan untuk menghasilkan jarak stasiun rujukan dengan titik yang dihampiri, $d < 800$ km untuk pemetaan dengan data pengamatan atau $d < 500$ km untuk pemetaan dengan data asimilasi. Apabila diinginkan peta $foF2$ dengan tingkat ketelitian lebih baik (e lebih rendah dari 25%), maka diperlukan titik rujukan yang lebih banyak dan lebih rapat.

6 KESIMPULAN

Secara umum, penerapan metode *Multiquadratic* menggunakan data pengamatan menghasilkan peta $foF2$ yang relatif lebih teliti dibandingkan menggunakan data asimilasi. Meskipun demikian, jarak antar stasiun pengamatan yang ada relatif cukup jauh sehingga peta $foF2$ yang dihasilkan dengan cara pertama bisa kurang teliti dibandingkan cara kedua.

Nilai $foF2$ hasil pemetaan berkorelasi linier dengan data pengamatan dan akan semakin mendekati nilai sebenarnya jika jarak antar titik rujukan terdekat juga semakin kecil. Penerapan metode *Multiquadratic* menggunakan data pengamatan dengan jarak antar titik rujukan terdekat kurang dari 1600 km menghasilkan galat relatif hingga 0,25 dengan simpangan baku 0,24. Sedangkan penerapan menggunakan data gabungan antara data pengamatan dan penurunan dari model menghasilkan galat relatif hampir sama, dengan jarak antar titik rujukan terdekat kurang dari 1000 km.

Ketelitian peta $foF2$ yang dihasilkan dengan metode ini dapat ditingkatkan dengan cara menambahkan titik rujukan sedemikian sehingga jarak antar titik rujukan terdekat hanya beberapa ratus kilometer saja. Cara ini dapat dilakukan dengan bantuan model ionosfer yang digunakan untuk menurunkan nilai $foF2$ di titik rujukan tambahan. Khususnya daerah-daerah di Indonesia yang belum memiliki stasiun pengamatan ionosfer maka perlu dilakukan pemetaan dengan menggunakan data asimilasi.

DAFTAR RUJUKAN

- Bilitza, D., 2001. *International Reference Ionosphere 2000*, Radio Science, Volume 36, Number 2, halaman 261-275.
- Fox, M. W. dan L. F. McNamara, 1986. *Improved Empirical World Maps of foF2*, Technical Report IPS-TR-86-03.
- Hardy, R. L., 1971. *Multiquadratic Equations of Topography and Other Irregular Surfaces*, J. Geophysical Research, 67, halaman 1905.
- Hardy, R. L., dan Nelson, S., 1986. *A Multiquadratic-Biharmonic Representation and Approximation of Disturbing Potential*, Geophysical Research Letter, 13, 18.
- Jiyo, 2000. *Metode Multiquadratic untuk Pemetaan foF2 Ionosfer Indonesia*, Warta LAPAN, Vol. 2, No. 4, halaman 154-158.
- Muslim, B., Asnawi, D. R. Martiningrum, A. Kurniawan, Syarifudin, 2007. *Model Sederhana Ionosfer Lintang Rendah Indonesia Untuk Parameter foF2 (MSILRI versi 2002)*, Publikasi Ilmiah LAPAN 2007.
- Teryokin, Y., dan Mikhailov, A., 1992. *A New Approach to The Ionospheric Mapping*, Solar-Terrestrial Prediction-IV Proc., Vol. 3, May 18, halaman 558-567.
- Zolesi, B., 2000. *Evolution of The Ionospheric Mapping and Modelling During The Last Four Decades*, Fisica de la Tierra, 12, halaman 127-154.