

# Perbandingan Median $f_oF_2$ dari Model MSILRI, ITU-R/CCIR, dan IRI2016/URSI dengan Data Observasi di Stasiun Pameungpeuk pada Saat Aktivitas Matahari Rendah (Comparison The $f_oF_2$ Median of MSILRI, ITU-R/CCIR, and IRI2016/URSI Models to Data Observed Over Pameungpeuk During Low Solar Activity)

Jiyo<sup>1</sup>, Rezy Pradipta<sup>2</sup>, Annis Siradj Mardiani<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pusat Riset Antariksa, LAPAN-BRIN, Bandung

<sup>2</sup>Institute for Scientific Research, Boston College, Boston, USA

## Riwayat naskah

Diterima: 09-08-2021

Direvisi: 07-12-2021

Disetujui: 09-12-2021

Korespondensi:

jjyo@brin.go.id

## ABSTRAK

Pada makalah ini kami menentukan ketelitian nilai median  $f_oF_2$  yang dihasilkan oleh model regional MSILRI, model global ITU-R/CCIR, dan model global IRI2016/URSI, pada saat tingkat aktivitas matahari rendah. Perbandingan model terhadap data observasi di stasiun pengamatan Pameungpeuk (7,65°LS, 107,96°BT, 32,38°LS geomagnetik) dari Maret 2019 hingga Februari 2020 telah dilakukan. Dari sini diperoleh kesimpulan: (a) nilai  $f_oF_2$  yang dihasilkan oleh model MSILRI dan ITU-R/CCIR lebih tinggi dari hasil observasi, sedangkan model IRI2016/URSI menghasilkan nilai  $f_oF_2$  yang lebih rendah; (b) model IRI2016/URSI menghasilkan  $f_oF_2$  yang memiliki simpangan paling kecil, disusul kemudian oleh model MSILRI dan model ITU-R/CCIR; (c) ketiga model menghasilkan  $f_oF_2$  yang berkorelasi sangat kuat dengan data observasi. Model MSILRI memiliki rentang nilai koefisien korelasi R paling sempit (0,96—0,99), disusul metode ITU-R/CCIR (0,91—0,99), dan metode IRI2016/URSI memiliki rentang nilai R paling lebar (0,84—0,96). Kemudian, nilai  $f_oF_2$  hasil model ITU-R/CCIR dengan masukan indeks T-regional dapat digunakan untuk keperluan aplikasi lapangan secara langsung, sedangkan yang lainnya harus disesuaikan terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan koreksi. Dalam hal aksesibilitas, model IRI2016/URSI mudah digunakan karena interaktif dan beroperasi secara daring dengan fitur lengkap. Model ITU-R/CCIR dapat dijalankan secara daring maupun luring dengan fitur terbatas, sedangkan model MSILRI hanya bisa dijalankan secara luring.

**Kata kunci:** MSILRI, ITU-R/CCIR, IRI2016/URSI,  $f_oF_2$ , simpangan, koefisien korelasi

## ABSTRACT

In this paper we determined the accuracy of  $f_oF_2$  values generated by the MSILRI regional model, the ITU-R/CCIR global model, and the IRI2016/URSI global model during a period of low solar activity. Comparisons of model output against ionosonde observation data from Pamengpeuk station (7.65°S, 107.96°E) during March 2019-February 2020 time period were conducted. It was concluded that: (a)  $f_oF_2$  values generated by the MSILRI and ITU-R/CCIR models overestimate experimental observations, whereas those generated by the IRI2016/URSI model underestimate them; (b) the IRI2016/URSI model generates  $f_oF_2$  values with the smallest absolute deviations from experimental observations, outperforming the MSILRI and ITU-R/CCIR models; (c) all three models generate  $f_oF_2$  values that are strongly correlated with  $f_oF_2$  values from observations. The MSILRI model yields the narrowest range of correlation coefficients (R = 0.96-0.99), followed subsequently by the ITU-R/CCIR model (R = 0.91-0.99), while the IRI2016/URSI model yields the widest range of correlation coefficients (R = 0.84-0.96). Furthermore,  $f_oF_2$

values generated by the ITU-R/CCIR model with regional T-index as input can be directly used for practical applications, while  $foF2$  values from other models require some additional adjustment using a linear correction. In terms of accessibility, the IRI2016/URSI model is the easiest to operate because of its interactive and online interface with full set of features. In comparison, the ITU-R/CCIR model can be operated with limited set of features via either online or offline interfaces, whereas the MSILRI model can only be operated via an offline interface.

**Keywords:** MSILRI, ITU-R/CCIR, IRI2016/URSI,  $foF2$ , deviations, correlation coefficients

## 1. Pendahuluan

Frekuensi kritis lapisan ionosfer ( $foF2$ ) adalah nilai frekuensi puncak pada lapisan F yang diperoleh dari proses *scaling* terhadap ionogram hasil pengamatan menggunakan ionosonda. Ionosfer lapisan F merupakan bagian yang paling tinggi letaknya, di atas lapisan E dan D di bawahnya, serta yang paling stabil keberadaannya. Parameter  $foF2$  menunjukkan kerapatan elektron yang paling besar di lapisan tersebut, dan dalam penerapannya digunakan sebagai batas atas frekuensi gelombang radio yang dapat dipantulkan oleh ionosfer secara keseluruhan.

Riset tentang frekuensi kritis lapisan ionosfer sudah sejak lama dilakukan dan hingga saat ini telah menghasilkan model ionosfer global dalam berbagai versi. Model Sederhana Ionosfer Lintang Rendah Indonesia (Muslim *et al.*, 2007) merupakan model regional yang dikembangkan di Pusat Sains Antariksa LAPAN, dan telah digunakan untuk memberikan layanan informasi ionosfer di atas wilayah Indonesia. Kemudian, model *International Reference Ionosphere* (IRI) (Bilitza, 2018) adalah model global yang tersedia dan banyak digunakan oleh para peneliti dan praktisi untuk melakukan riset maupun pengembangan sistem informasi tentang ionosfer global. Selain itu terdapat pula model semi-empiris ITU-R/CCIR yang digunakan dalam *software* prediksi ASAPS (*Advanced Stand-Alone Prediction System*). *Software* ASAPS banyak digunakan untuk menentukan prediksi frekuensi komunikasi radio HF (*High Frequency*) di Indonesia.

Dalam kegiatan layanan informasi kondisi ionosfer di Indonesia, diperlukan nilai  $foF2$  untuk menentukan tingkat kemampuan ionosfer dalam menunjang keberhasilan komunikasi radio HF. Sumber utamanya adalah dari pengamatan menggunakan ionosonda. Namun, terkadang ionosonda tidak bisa menyediakan data  $foF2$  karena beberapa sebab. Hal yang hampir sama

terjadi pula dalam kegiatan riset. Untuk mengatasi kendala tersebut, maka dilakukan asimilasi data dengan menggunakan model. Data  $foF2$  yang ditentukan menggunakan model dapat digunakan untuk mengisi kekosongan data sehingga informasi untuk layanan akan tetap tersedia. Dalam riset, data asimilasi digunakan agar analisis dapat dilakukan dengan baik.

Tujuan dari riset yang dilakukan adalah mengetahui ketelitian nilai median bulanan  $foF2$  yang diturunkan dari tiga model ionosfer tersebut, dan derajat kesesuaian atau korelasinya dengan data observasi. Selain itu, dalam riset ini akan ditentukan persamaan matematis untuk mengoreksi  $foF2$  hasil model agar lebih sesuai dengan data observasi. Hasil yang diperoleh dapat digunakan untuk menyusun metode atau langkah penentuan nilai  $foF2$  rujukan untuk keperluan riset dan layanan informasi di Pusat Sains Antariksa.

## 2. Tiga Model Ionosfer

### 2.1. Sederhana Ionosfer Lintang Rendah Indonesia

Model Sederhana Ionosfer Lintang Rendah Indonesia (MSILRI) adalah model ionosfer regional yang merupakan adaptasi dari Simplified Ionospheric Regional Model (SIRM) untuk ionosfer lintang rendah wilayah Indonesia (Muslim *et al.*, 2007). SIRM merupakan model empiris regional yang dibangun berdasarkan analisis *Fourier* terhadap parameter  $foF2$ ,  $M(3000)F2$ ,  $h'F$ ,  $foF1$ , dan  $foE$  di atas wilayah negara-negara Eropa (Zolesi *et al.*, 1993). Model MSILRI telah mengalami pengembangan dan peningkatan (misalnya Muslim (2010)) dan versi terbaru (v14.2) antara lain memuat parameter  $foF2$ ,  $M(3000)F2$ , LUF, dan TEC (*Total Electron Content*). Model ini belum bisa dijalankan secara *online* (daring).

Suhartini *et al.* (2015) telah menguji model MSILRI versi tahun 2013 menggunakan data  $foF2$  hasil pengamatan di

stasiun Biak (1,00°LU, 136,00°BT, 18,63°LS geomagnetik) tahun 2005—2009. Dalam riset tersebut korelasi antara  $f_oF_2$  MSILRI dengan  $f_oF_2$  observasi ditentukan untuk masing-masing data bulan Januari hingga Desember secara terpisah. Hasilnya, koefisien korelasi (R) antara  $f_oF_2$  MSILRI dan  $f_oF_2$  observasi di stasiun pengamatan Biak adalah 0,89—1,00 dengan rata-rata 0,94. Nilai  $f_oF_2$  model ini kurang akurat pada saat aktivitas matahari rendah, apabila dibandingkan dengan saat aktivitas matahari sedang.

Kemudian, Martiningrum (2019) menguji model GIM-MSILRI, yang merupakan perbaikan MSILRI dengan memanfaatkan model *Global Ionospheric Map* (GIM) yang mampu menghasilkan nilai TEC. Nilai  $f_oF_2$  untuk perbaikan tersebut ditentukan melalui hubungan  $f_oF_2$  dan TEC. Pengujian dilakukan dengan menggunakan  $f_oF_2$  hasil pengamatan di stasiun pengamatan Sumedang (6,91°LS, 107,83°BT, 30,92°LS geomagnetik) bulan Januari hingga Oktober 2009, pada saat aktivitas matahari rendah. Koefisien korelasi juga ditentukan untuk data masing-masing bulan secara terpisah. Riset tersebut menghasilkan koefisien korelasi R antara 0,94—0,97, dengan simpangan terendah 0,30 MHz dan tertinggi 1,76 MHz.

## 2.2. Model IGRF Model Semi-Empiris ITU-R/CCIR

Model Semi-Empiris ITU-R/CCIR adalah model yang digunakan oleh IPS Australia dalam membangun *software* ASAPS (*Advanced Stand-Alone Prediction System*). Dasarnya adalah dokumen rekomendasi ITU-R P.533-7 yang memuat perihal propagasi dan metode prediksi HF, dan *CCIR Reports 322* yang memuat tentang *noise radio*.

Di dalam dokumen rekomendasi ITU-R P.533-7 dimuat antara lain tentang karakteristik parameter ionosfer lapisan F2 dan metode penentuan MUF (*Maximum Usable Frequency*) untuk propagasi (pemantulan) oleh lapisan tersebut. Kemudian, dokumen ini juga memuat tentang frekuensi kritis dan MUF lapisan E, LUF (*Lowest Usable Frequency*), dan beberapa parameter propagasi lainnya.

Software ASAPS dapat dijalankan secara daring melalui laman <https://www.sws.bom.gov.au/Category/HF%20Systems/Online%20Tools/> atau secara luring (off-line). Tiga tipe propagasi yang disediakan yaitu *district* atau NVIS (*Near Vertical Incidence Sky Wave*), *short path*, dan

*long path*. Arah perambatan gelombang radio pada tipe propagasi NVIS adalah hampir vertikal dengan sudut elevasinya lebih tinggi dari 80° atau jarak antara stasiun pemancar (Tx) dan penerima (Rx) kurang dari 400 km (Witvliet *et al.*, 2015; Witvliet & Alsina Pages, 2017; Yan *et al.*, 2020), sehingga MUF-nya hampir identik dengan  $f_oF_2$ . Penetapan jarak NVIS beragam, namun yang pasti kurang dari 400 km. Dengan mengacu kepada ITU-R P.533-7 dan tipe propagasi NVIS, maka nilai  $f_oF_2$  dapat direkonstruksikan menggunakan software ASAPS dengan mode *district*/NVIS.

## 2.3. Model International Reference Ionosphere

Model *International Reference Ionosphere* (IRI) merupakan suatu upaya bersama antara *Committee on Space Research* (COSPAR) dan *International Union of Radio Science* (URSI) dengan tujuan membangun dan mengembangkan standar internasional untuk parameter ionosfer (Bilitza *et al.*, 2014). Model yang mulai dikembangkan sejak tahun 1968 ini telah mengalami penyempurnaan dan pengembangan sehingga menghasilkan model IRI versi 2016 (Bilitza, 2018). Pengujian telah dilakukan sebagai upaya untuk mengoreksi dan meningkatkan kemampuan metode ini (misalnya Bilitza *et al.*, 2012).

Model IRI versi 2016 (IRI2016) mampu menyediakan beragam parameter lapisan ionosfer yaitu: kerapatan elektron, temperatur elektron dan ion, komposisi ion, kecepatan (*drift*) vertikal, TEC vertikal, ketinggian lapisan termasuk ketinggian puncak kerapatan lapisan E dan F, probabilitas kemunculan lapisan F1 dan *Spread F*, cakupan *aurora* (*auroral boundaries*), dan efek badai ionosfer. Dari berbagai parameter tersebut, model IRI menyediakan frekuensi kritis lapisan F2 ( $f_oF_2$ ) berdasarkan opsi yang dipilih dari dua opsi model yang disediakan yaitu opsi model URSI atau CCIR ([https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016\\_vitmo.php](https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php)). Dalam riset ini digunakan model URSI (IRI2016/URSI).

Parameter  $f_oF_2$  hasil model ini juga telah diuji (Suhartini *et al.*, 2015) menggunakan data pengamatan di stasiun Biak tahun 2005—2009 dan dari situ diperoleh koefisien korelasi antara 0,89 hingga 0,95 dengan rata-rata 0,94. Riset ini juga menyatakan bahwa penerapan model ini pada saat tingkat aktivitas matahari rendah kurang akurat dibandingkan penerapannya saat

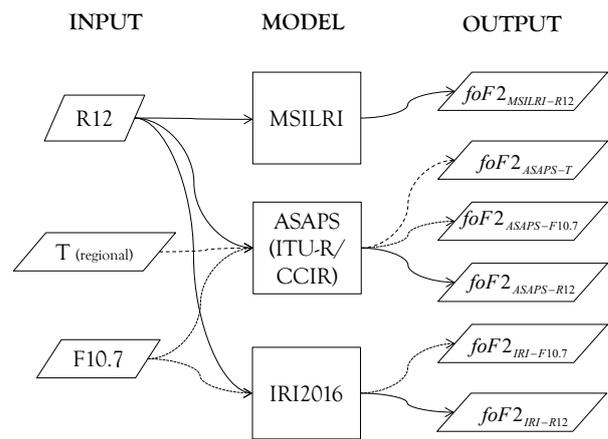
tingkat aktivitas matahari tinggi. Pada saat aktivitas matahari rendah,  $foF2$  model IRI cenderung lebih tinggi dari pengamatan.

Bilitza *et al.* (2012) membandingkan  $foF2$  model IRI dengan hasil pengamatan menggunakan ionosonda di tujuh stasiun pengamatan yang mencakup daerah lintang rendah dan lintang tinggi. Data pengamatan mencakup siklus ke-23 aktivitas matahari yaitu dari tahun 1980 hingga 2010. Salah satu hasilnya menyatakan bahwa perbedaan  $foF2$  model IRI dengan  $foF2$  observasi mencapai 20% di daerah lintang rendah.

### 3. Metodologi

Data  $foF2$  yang diteliti kali ini merupakan hasil simulasi menggunakan tiga buah model terpisah yaitu MSILRI, ITU-R/CCIR, dan IRI2016/URSI. Masing-masing simulasi dilakukan dengan masukan tingkat aktivitas matahari bilangan sunspot hasil pemulusan 12 bulan (R12), fluks radio matahari pada panjang gelombang 10,7 cm (F10.7), dan indeks ionosfer (T) regional. Pada rentang waktu Maret 2019 hingga Februari 2020 aktivitas matahari dalam kondisi tenang (Tabel 1). Simulasi dilakukan dengan menjalankan masing-masing model dengan masukan R12, F10.7, dan indeks T secara

terpisah. Rancangan skema simulasi ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan rancangan simulasi menggunakan tiga buah model ionosfer terpisah (untuk kemudian dibandingkan dengan hasil observasi).

Model MSILRI dijalankan menggunakan *software* Matlab dengan pilihan masukan hanya R12. Salah satu keluarannya adalah frekuensi kritis lapisan ionosfer dan dalam bahasan ini dinotasikan sebagai  $foF2_{MSILRI-R12}$ . Nilai  $foF2_{MSILRI-R12}$  yang diperoleh adalah nilai mediannya.

Tabel 1. Bilangan *sunspot* (R12), fluks matahari (F10.7), dan indeks T regional yang digunakan dalam penelitian.

Bulan-Tahun	R12	F10.7	T-regional
Maret 2019	4,5	70,78	4
April 2019	4,3	72,95	5
Mei 2019	3,9	72,88	-1
Juni 2019	3,7	70,29	-6
Juli 2019	3,5	69,44	-3
Agustus 2019	3,5	68,75	-6
September 2019	3,1	68,74	-3
Oktober 2019	2,6	66,9	-6
November 2019	2,1	68,66	-8
Desember 2019	2	68,72	-4
Januari 2020	2,9	68,72	3
Februari 2020	3,9	68,73	4

Nilai  $f_oF2$  model ITU-R/CCIR diperoleh dengan cara menjalankan software ASAPS dijalankan secara luring (*offline/standalone*) dengan skenario berdasarkan masukan indeks T-regional, F10.7, dan R12 dengan mode prediksi *base to base* dan sirkuit (*path*) NVIS/*district*. Data yang diperoleh adalah median setiap jam dan masing-masing dinotasikan sebagai  $f_oF2_{ASAPS-T}$ ,  $f_oF2_{ASAPS-F10.7}$ ,  $f_oF2_{ASAPS-R12}$ . Mode prediksi *base to base* dimaksudkan sebagai prediksi frekuensi komunikasi antara pemancar (Tx) dan penerima (Rx) yang masing-masing lokasinya tetap, tidak bergerak. Kemudian sirkuit/*path* NVIS (*Near Vertical Incidence Skywave*) atau *district* adalah sirkuit komunikasi dengan jarak antara Tx dan Rx kurang dari 200 km, sehingga geometri proses penjalaran gelombangnya mendekati geometri penjalaran gelombang pada ionosonda yaitu menjalar secara vertikal. Pada mode prediksi ini nilai MUF (*Maximum Usable Frequency*) adalah sama dengan nilai median dari  $f_oF2$ .

Model IRI 2016/URSI dijalankan sesuai dengan rancangan pada Gambar 3-1, secara daring dengan dua macam versi yang menggunakan masukan F10.7 saja atau R12 saja, sehingga diperoleh nilai  $f_oF2$  setiap jam pada hari/tanggal tertentu untuk masing-masing versi. Kemudian nilai mediannya dihitung dan dinotasikan sebagai  $f_oF2_{IRI-F10.7}$  dan  $f_oF2_{IRI-R12}$ . Simulasi dilakukan dengan memasukkan tahun, bulan, tanggal, waktu, derajat lintang, dan bujur dari stasiun Pameungpeuk, serta nilai F10.7 atau R12 untuk satu kali simulasi.

Sebagai pembanding atas hasil pemodelan tadi, digunakan data  $f_oF2$  hasil *scaling* manual terhadap ionogram hasil pengamatan di stasiun Pameungpeuk (7,65°LS, 107,96°BT, 32,38°LS geomagnetik), mulai bulan Maret 2019 hingga Februari 2020. Selama periode pengamatan tersebut aktivitas matahari dalam kondisi tenang. Melalui proses *scaling* ionogram secara manual mengikuti aturan dalam *Report* UAG-23A, diperoleh nilai  $f_oF2$  per jam di atas Pameungpeuk. Dari kumpulan data  $f_oF2$  sebulan dapat ditentukan nilai mediannya setiap jam.

Parameter pertama yang digunakan dalam analisis adalah selisih antara nilai median  $f_oF2$  hasil simulasi menggunakan model ( $f_oF2_{mod}$ ) dengan median  $f_oF2$  hasil pengamatan ( $f_oF2_{obs}$ ), dengan perumusan sebagai berikut:

$$\Delta f_{mod} = f_oF2_{mod} - f_oF2_{obs} \quad (1)$$

Untuk masing-masing model yang diuji, nilai rata-rata  $\Delta f_{mod}$  dan simpangan bakunya digunakan untuk mengevaluasi tingkat kedekatan  $f_oF2$  model dengan hasil observasi. Parameter kedua yang digunakan dalam analisis adalah koefisien korelasi (R) antara  $f_oF2_{mod}$  dengan  $f_oF2_{obs}$ . Nilai R menandakan tingkat determinisme perilaku model dalam mengimbangi realita observasi.

Nilai  $\Delta f_{mod}$  yang kecil maupun nilai R yang mendekati 1 tidak serta merta berarti bahwa model telah siap untuk diterapkan secara langsung. Untuk menguji tingkat kesiapan penerapan model, maka dilakukan analisis menggunakan koefisien persamaan linear yang menghubungkan  $f_oF2_{mod}$  dan  $f_oF2_{obs}$  sebagai berikut:

$$f_oF2_{obs} = a f_oF2_{mod} + b \quad (2)$$

Aplikasi model untuk menentukan pendekatan nilai  $f_oF2$  dilakukan mempertimbangkan nilai  $a$  dan  $b$  dari persamaan (2). Jika nilai  $a$  mendekati 1 dan  $b$  dekat dengan 0, maka  $f_oF2_{mod}$  hampir identik dengan  $f_oF2_{obs}$ . Model dengan nilai  $a$  dan  $b$  seperti ini dapat digunakan untuk menentukan pendekatan nilai  $f_oF2$  secara langsung tanpa langkah koreksi. Apabila  $a$  mendekati 1 tapi  $b$  tidak dekat dengan 0, maka penggunaan model yang diuji untuk pendekatan nilai  $f_oF2$  dilakukan dengan menambahkan  $b$  sebagai koreksinya. Jika nilai  $a$  tidak dekat dengan 1, maka penerapan model harus menggunakan persamaan (2) sebagai koreksinya.

#### 4. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengolahan data perbandingan secara grafis antara median  $f_oF2$  untuk masing-masing model dan median  $f_oF2$  hasil observasi di stasiun Pameungpeuk ditunjukkan pada Gambar 2. Garis sinambung pada panel atas adalah  $f_oF2_{mod}$  dan garis putus-putus merupakan  $f_oF2_{obs}$ , sedangkan area/bar pada panel bawah adalah selisihnya.

Pengujian model MSILRI dengan masukan R12 disajikan pada Gambar 2(a) yang menunjukkan bahwa selama 12 bulan  $f_oF2_{MSILRI-R12}$  terdapat selisih positif ( $f_oF2_{MSILRI-R12} > f_oF2_{obs}$ ) maupun negatif ( $f_oF2_{MSILRI-R12} < f_oF2_{obs}$ ) terhadap data observasi. Selisih positif dominan terjadi pada

bulan September hingga bulan Maret, sedangkan bulan April hingga Agustus kejadian selisih positif dan negatif didapati berimbang. Selain itu variasi nilai  $\Delta f_{MSILRI-R12}$  yang diperoleh antara -1,82 MHz hingga 2,52 MHz.

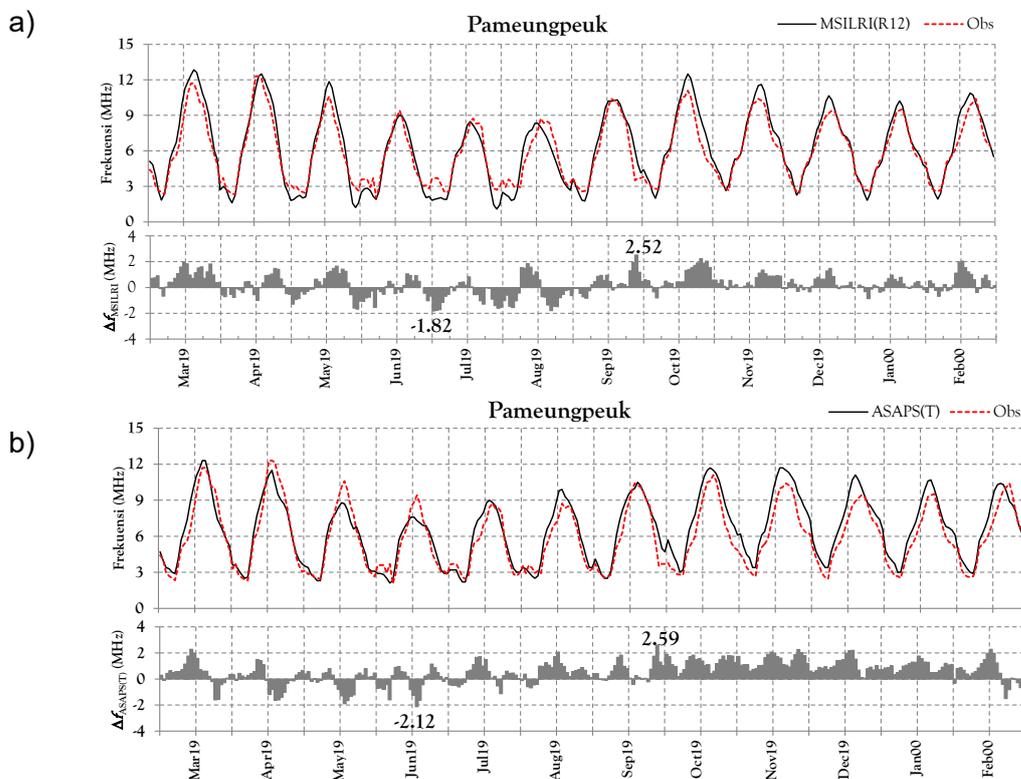
Kemudian, hasil pengujian untuk model ITU-R/CCIR, pada Gambar 2(b) terlihat bahwa selisih positif ( $f_oF2_{ASAPS-T} > f_oF2_{obs}$ ) lebih dominan terjadi pada bulan Juli hingga Maret, sedangkan pada bulan April, Mei, dan Juni selisih negatif ( $f_oF2_{ASAPS-T} < f_oF2_{obs}$ ) lebih dominan. Nilai  $\Delta f_{ASAPS-T}$  bervariasi antara -1,12 MHz dan 2,59 MHz. Hasil yang hampir sama ditunjukkan oleh Gambar 2(c) dan Gambar 2(d) untuk simulasi menggunakan masukan F10.7 dan R12. Variasi selisihnya  $-1,70 \text{ MHz} < \Delta f_{ASAPS-F10.7} < 2,79 \text{ MHz}$  dan  $-1,55 \text{ MHz} < \Delta f_{ASAPS-R12} < 2,99 \text{ MHz}$ .

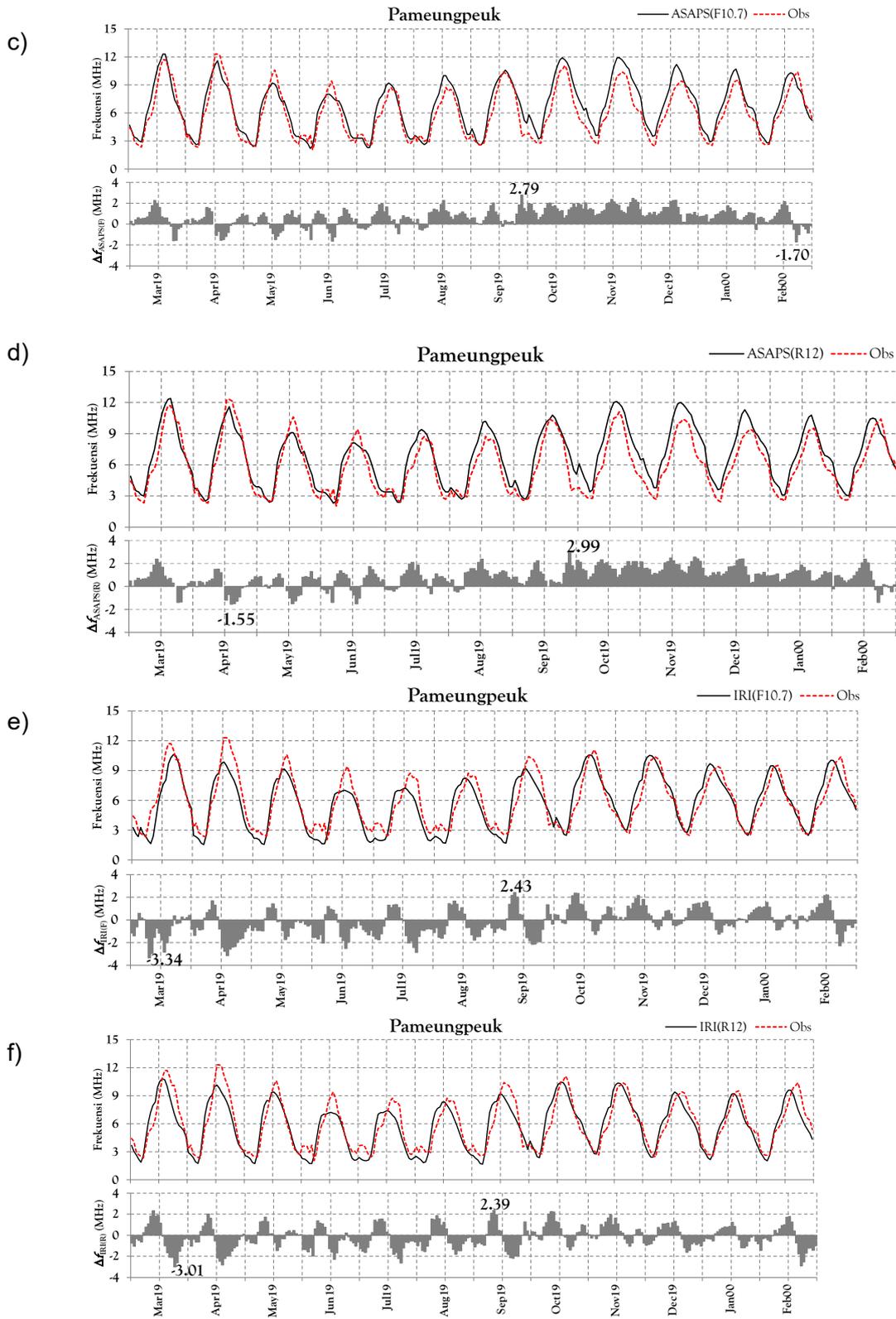
Selanjutnya, untuk simulasi model IRI2016/URSI dengan masukan F10.7 dihasilkan grafik pada Gambar 2(e). Selisih positif ( $f_oF2_{IRI-F10.7} > f_oF2_{obs}$ ) lebih dominan untuk bulan Oktober hingga Februari, sedangkan bulan-bulan Maret hingga September selisihnya lebih dominan negatif ( $f_oF2_{IRI-F10.7} < f_oF2_{obs}$ ). Fluktuasi selisihnya  $-3,34 \text{ MHz} < \Delta f_{IRI-F10.7} < 2,43 \text{ MHz}$ .

Gambar 2(f) menunjukkan hasil simulasi model IRI2016/URSI menggunakan masukan R12. Selisih positif ( $f_oF2_{IRI-R12} > f_oF2_{obs}$ ) dan negatif ( $f_oF2_{IRI-R12} < f_oF2_{obs}$ ) hampir berimbang selama bulan Maret hingga Februari tahun berikutnya. Nilai selisihnya ( $\Delta f_{IRI-R12}$ ) berada di antara -3,01 MHz dan 2,39 MHz.

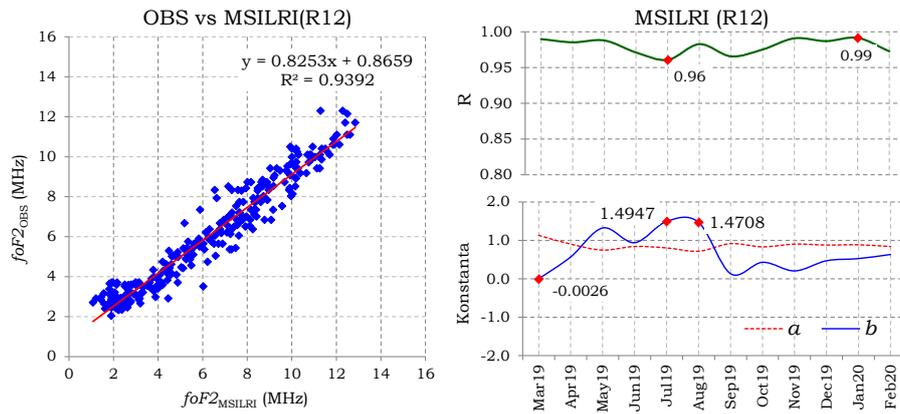
#### 4.1. Model Sederhana Ionosfer Lintang Rendah Indonesia

Dari Gambar 2(a) telah dilakukan pengolahan lebih lanjut dan dihasilkan rata-ran  $\Delta f_{MSILRI-R12} = 0,22 \text{ MHz}$  dan simpangan bakunya  $\sigma_{MSILRI-R12} = 0,85 \text{ MHz}$ . Rataan  $\Delta f_{MSILRI-R12} > 0$  ini mengindikasikan bahwa secara umum  $f_oF2_{MSILRI-R12}$  lebih tinggi dari hasil pengamatan. Setelah dilakukan pemisahan data siang dan malam hari, maka diperoleh bahwa untuk siang hari rata-ran  $\Delta f_{MSILRI-R12} = 0,49 \text{ MHz}$  dengan simpangan baku  $\sigma_{MSILRI-R12} = 0,75 \text{ MHz}$ , sedangkan pada malam hari rata-ran  $\Delta f_{MSILRI-R12} = -0,03 \text{ MHz}$  dengan simpangan baku  $\sigma_{MSILRI-R12} = 0,87 \text{ MHz}$ . Jadi terdapat perbedaan cukup besar antara siang dan malam hari dalam hal perilaku model.





Gambar 2. Grafik pola harian  $f_oF2$  pada masing-masing bulan (Maret 2019—Februari 2020) dari hasil simulasi menggunakan model (garis kontinu) dan perbandingannya dengan median  $f_oF2$  hasil observasi (garis putus-putus), serta selisih antara keduanya ( $\Delta f_{mod}$ ).



Gambar 3. Korelasi linear antara  $foF2_{MSILRI-R12}$  dengan  $foF2$  pengamatan dan diperoleh koefisien korelasi  $R_{MSILRI-R12} = 0,97$ ,  $a = 0,8253$ , dan  $b = 0,8659$  (gambar kiri); serta fluktuasi nilai  $R_{MSILRI-R12}$ ,  $a$ , dan  $b$  dari bulan Maret 2019 hingga Februari 2020 (gambar kanan).

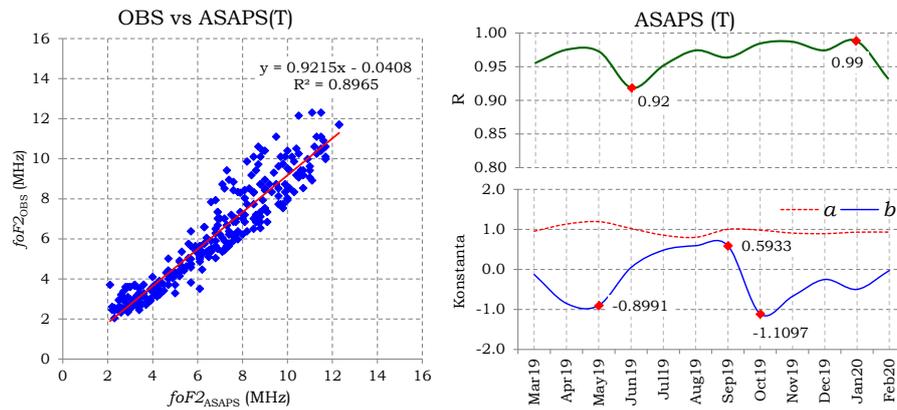
Berdasarkan data keseluruhan (12 bulan) dan data bulanan diperoleh koefisien korelasi ( $R$ ), konstanta  $a$  dan  $b$  dari persamaan linear (2) antara  $foF2_{MSILRI-R12}$  dengan  $foF2_{obs}$  ditunjukkan pada Gambar 3. Dari perbandingan ini diperoleh koefisien korelasi  $R_{MSILRI-R12} = 0,97$  dengan fluktuasi nilai setiap bulannya antara 0,96 (Juli 2019) sampai dengan 0,99 (Januari 2020). Mengacu kepada kategori korelasi yang digunakan Jiyo *et al.* (2019), maka korelasi antara  $foF2_{MSILRI-R12}$  dengan  $foF2_{obs}$  adalah sangat kuat ( $0,9 < R$ ). Hasil ini hampir sama dengan Martiningrum (2019) yang memperoleh nilai  $R$  antara  $foF2_{MSILRI-R12}$  dengan  $foF2$  hasil observasi di stasiun Sumedang adalah antara 0,94 – 0,97. Selain itu,  $R$  yang dihasilkan masih dalam rentang nilai  $R$  yang diperoleh Suhartini *et al.* (2015) yaitu antara 0,89 hingga 1.

*Fitting* antara hasil observasi dan simulasi model MSILRI menghasilkan nilai konstanta  $a = 0,8253$  dan  $b = 0,8659$ . Fluktuasi nilai  $a$  tidak terlalu besar, sedangkan konstanta  $b$  berfluktuasi antara 0 (Maret 2019) hingga 1,49 (Juli 2019). Nilai  $a$  cukup dekat dengan 1, akan tetapi nilai  $b$  cukup jauh dari 0, sehingga penerapan model MSILRI dalam

asimilasi data harus dikoreksi menggunakan persamaan  $foF2 = 0,8253foF2_{MSILRI-R12} + 0,8659$ .

#### 4.2. Model ITU-R/CCIR (ASAPS)

Perbandingan antara  $foF2_{ASAPS-T}$  menggunakan masukan indeks T-regional dengan  $foF2$  hasil observasi telah ditunjukkan pada Gambar 2(b). Untuk seluruh 12 bulan data  $foF2_{ASAPS-T}$  lebih tinggi dengan rentang  $\Delta f_{ASAPS-T}$  antara -2,12 MHz hingga 2,59 MHz dengan rata-rata 0,55 MHz dan simpangan baku  $\sigma_{ASAPS-T} = 0,88$  MHz. Rataan  $\Delta f_{ASAPS-T}$  yang positif ini menunjukkan bahwa secara umum nilai  $foF2_{ASAPS-T}$  relatif lebih tinggi dari  $foF2$  hasil observasi. Hasil ini menguatkan kesimpulan dari Suhartini *et al.* (2015) yang menyatakan bahwa pada saat aktivitas matahari rendah nilai  $foF2$  model ASAPS lebih tinggi dari observasi. Untuk data siang hari saja diperoleh rata-rata  $\Delta f_{ASAPS-T} = 0,68$  MHz dengan simpangan baku 1,03 MHz, sedangkan untuk malam hari rata-rata  $\Delta f_{ASAPS-T} = 0,48$  MHz dengan simpangan baku 0,71 MHz. Tidak ada perbedaan berarti antara siang dan malam dalam hal perilaku model.



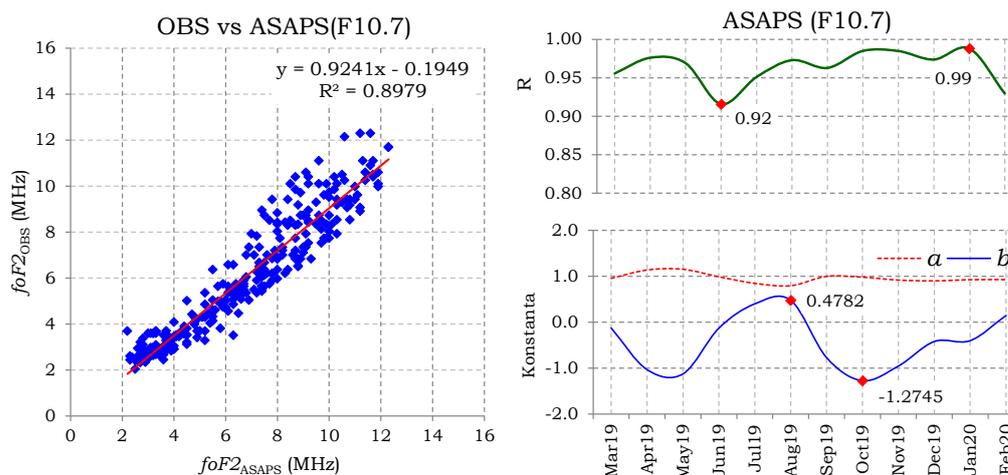
Gambar 4. Korelasi linear antara  $f_oF2_{ASAPS-T}$  dengan  $f_oF2$  pengamatan dan diperoleh koefisien korelasi  $R_{ASAPS-T} = 0,95$ ,  $a = 0,9215$ , dan  $b = -0,0408$  (gambar kiri); serta fluktuasi nilai  $R_{ASAPS-T}$ ,  $a$ , dan  $b$  dari bulan Maret 2019 hingga Februari 2020 (gambar kanan).

Dari Gambar 4 diperoleh koefisien korelasi antara  $f_oF2_{ASAPS-T}$  dengan  $f_oF2$  observasi adalah  $R_{ASAPS-T} = 0,95$  dengan rentang nilai bulanannya antara 0,92 (Juni 2019) hingga 0,99 (Januari 2020). Koefisien korelasi menunjukkan terjadinya korelasi sangat kuat antara  $f_oF2_{ASAPS-T}$  dengan  $f_oF2$  observasi, dan masih sesuai dengan hasil dari Suhartini, *et al.*, (2015). Meskipun koefisien korelasi  $R_{ASAPS-T}$  sedikit lebih rendah nilai dari  $R_{MSILRI}$ , namun korelasi ini masih dalam kategori sangat kuat.

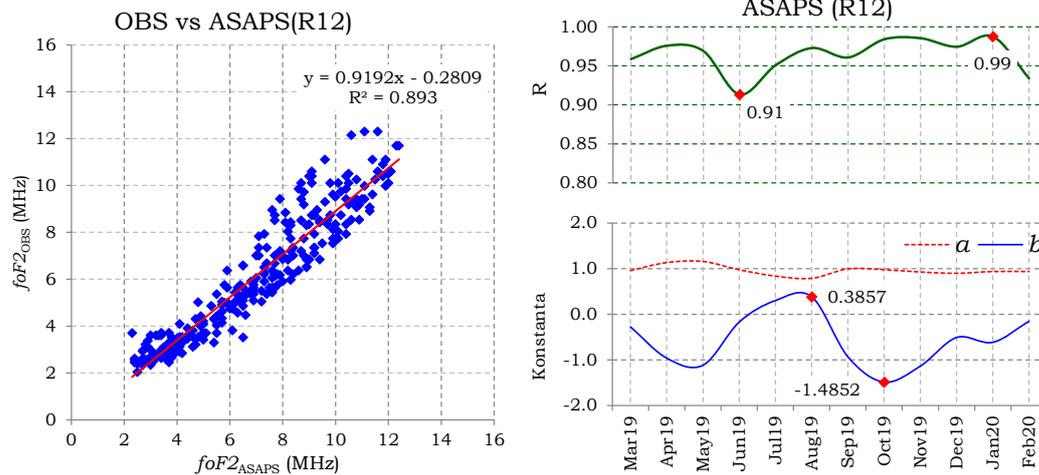
Kemudian, *fitting* linear menghasilkan konstanta  $a$  yang relatif konstan pada nilai 0,9215, sedangkan konstanta  $b = -0,0408$  dengan fluktuasi antara -1,1097 dan 0,5933. Jadi, persamaan (2) yang menghubungkan keduanya menjadi  $f_oF2 =$

$0,9215f_oF2_{ASAPS-T} - 0,0408$ . Karena nilai  $a$  yang dekat dengan 1 dan  $b$  mendekati 0, maka  $f_oF2$  keluaran model ITU-R/CCIR dengan masukan indeks T-regional dapat digunakan secara langsung untuk asimilasi tanpa langkah koreksi menggunakan persamaan tersebut.

Simulasi menggunakan model ITU-R/CCIR dengan masukan F10.7 menghasilkan  $f_oF2_{ASAPS-F10.7}$  dan perbandingannya dengan  $f_oF2$  hasil observasi ditunjukkan pada Gambar 2(c). Untuk seluruh 12 bulan rata-rata nilai  $\Delta f_{ASAPS-F10.7} = 0,70$  MHz dan  $\sigma_{ASAPS-F10.7} = 0,87$  MHz. Rataan  $\Delta f_{ASAPS-F10.7}$  bernilai positif ini menunjukkan bahwa secara umum nilai  $f_oF2_{ASAPS-F10.7}$  juga lebih tinggi dari  $f_oF2$  hasil observasi, seperti halnya  $f_oF2_{ASAPS-T}$ .



Gambar 5. Korelasi linear antara  $f_oF2_{ASAPS-F10.7}$  dengan  $f_oF2$  pengamatan dan diperoleh koefisien korelasi  $R_{ASAPS-F10.7} = 0,95$ ,  $a = 0,9241$ , dan  $b = -0,1949$  (gambar kiri); serta fluktuasi nilai  $R_{ASAPS-F10.7}$ ,  $a$ , dan  $b$  dari bulan Maret 2019 hingga Februari 2020 (gambar kanan).



Gambar 6. Korelasi linear antara  $f_oF2_{ASAPS-R12}$  dengan  $f_oF2$  pengamatan dan diperoleh koefisien korelasi  $R_{ASAPS-R12} = 0,94$ ,  $a = 0,9192$ , dan  $b = -0,2809$  (gambar kiri); serta fluktuasi nilai  $R_{ASAPS-R12}$ ,  $a$ , dan  $b$  dari bulan Maret 2019 hingga Februari 2020 (gambar kanan).

Untuk keseluruhan data, koefisien korelasi antara  $f_oF2_{ASAPS-F10.7}$  dengan  $f_oF2$  observasi  $R_{ASAPS-F10.7}$  adalah 0,95 dengan rentang koefisien korelasi untuk data bulanan berkisar antara 0,92 pada Juni 2019 hingga 0,99 pada bulan Januari 2020 (Gambar 5). Koefisien korelasi yang diperoleh menunjukkan bahwa korelasi antara  $f_oF2_{ASAPS-F10.7}$  dengan data observasi masih dalam kategori sangat kuat. Kemudian diperoleh konstanta persamaan linearnya adalah  $a = 0,9241$  dan  $b = -0,1949$ . Selama kurun waktu Maret 2019 – Februari 2020, nilai  $a$  relatif konstan di sekitar 1, sedangkan nilai  $b$  tidak cukup dekat dengan 0 dan berfluktuasi di antara -1,2745 dan 0,4782. Sebagai akibatnya, penerapan metode ini dengan masukan F10.7 untuk menentukan hampiran  $f_oF2$  harus menggunakan persamaan  $f_oF2 = 0,9241f_oF2_{ASAPS-F10.7} - 0,1949$ .

Perbandingan antara  $f_oF2_{ASAPS-R12}$  dengan  $f_oF2$  hasil observasi ditunjukkan pada Gambar 2(d). Untuk 12 bulan data  $f_oF2_{ASAPS-R12}$  diperoleh nilai rata-ran  $\Delta f_{ASAPS-R12} = 0,83$  MHz dan  $\sigma_{ASAPS-R12} = 0,89$  MHz. Nilai rata-ran  $\Delta f_{ASAPS-R12}$  positif ini menggambarkan bahwa secara umum nilai  $f_oF2_{ASAPS-R12}$  lebih tinggi dari  $f_oF2$  hasil observasi, seperti halnya  $f_oF2_{ASAPS-T}$  dan  $f_oF2_{ASAPS-F10.7}$ .

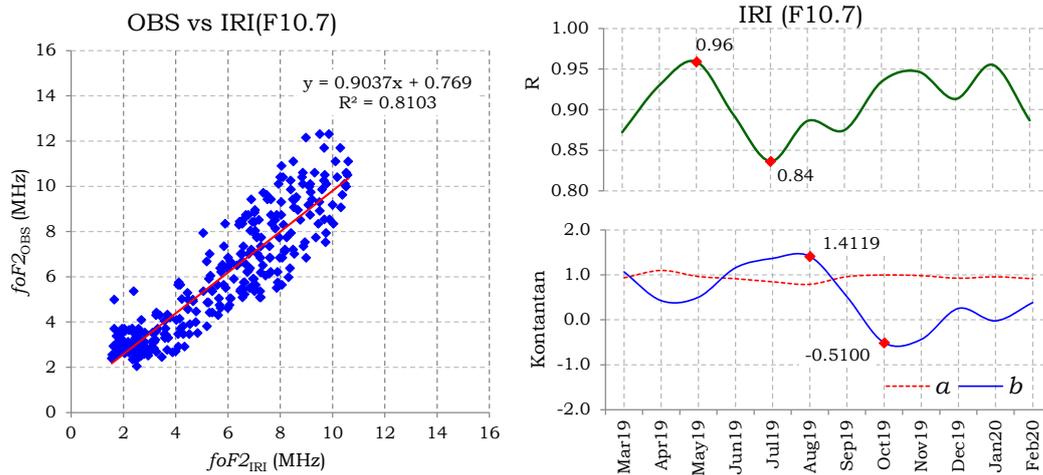
Kemudian koefisien korelasi antara  $f_oF2_{ASAPS-R12}$  dengan  $f_oF2$  observasi,  $R_{ASAPS-R12} = 0,94$  (Gambar 6). Koefisien korelasi untuk data bulanan berkisar antara 0,91 pada Juni 2019 hingga 0,99 pada bulan Januari 2020. Hal ini menunjukkan bahwa korelasi antara  $f_oF2_{ASAPS-R12}$  dengan  $f_oF2$

observasi juga termasuk kedalam kategori sangat kuat.

Koefisien korelasi yang diperoleh sedikit lebih rendah dari  $R_{ASAPS-F10.7}$  namun masih dalam kategori sangat kuat. Kemudian diperoleh konstanta persamaan linearnya adalah  $a = 0,9192$  dan  $b = -0,2809$ , sehingga persamaan (2) yang menghubungkan keduanya menjadi  $f_oF2_{obs} = 0,9192f_oF2_{ASAPS-R12} - 0,2809$ . Selama kurun waktu Maret 2019 – Februari 2020, nilai  $a$  relatif konstan di sekitar 1, sedangkan nilai  $b$  berfluktuasi di antara -1,4852 dan 0,3857.

### 4.3. Model IRI2016/URSI

Perbandingan antara  $f_oF2_{IRI-F10.7}$  dengan  $f_oF2$  hasil observasi ditunjukkan pada Gambar 2(e). Nilai rata-ran  $\Delta f_{IRI-F10.7}$  yang diperoleh adalah -0,21 MHz dengan simpangan baku,  $\sigma_{IRI-F10.7} = 1,18$  MHz. Nilai  $\Delta f_{IRI-F10.7} < 0$  ini mengindikasikan bahwa secara umum nilai  $f_oF2_{IRI-F10.7}$  lebih rendah dari  $f_oF2$  hasil observasi. Hasil ini sesuai dengan kesimpulan dari Liu *et al.*, (2019) dan Zhu *et al.* (2020) yang menguji model IRI2016 untuk ionosfer di wilayah China. Pengujian model ini menggunakan data IRO (*Ionospheric Radio Occultation*) seperti yang dilakukan oleh Bai *et al.* (2021) juga menyimpulkan bahwa  $f_oF2$  model ini cenderung lebih rendah dari data observasi. Pengujian model ini untuk ionosfer di atas wilayah Argentina yang dilakukan oleh González dan López (2020) juga menguatkan hasil ini, yaitu  $f_oF2$  model IRI2016 *underestimate*.



Gambar 7. Korelasi linear antara  $f_oF2_{IRI-F10.7}$  dengan  $f_oF2$  pengamatan dan diperoleh koefisien korelasi  $R_{IRI-F10.7} = 0,90$ ,  $a = 0,9037$ , dan  $b = 0,769$  (gambar kiri); serta fluktuasi nilai  $R_{IRI-F10.7}$ ,  $a$ , dan  $b$  dari bulan Maret 2019 hingga Februari 2020 (gambar kanan).

Kemudian, koefisien korelasinya dengan  $f_oF2$  observasi,  $R_{IRI-F10.7}$  adalah 0,90, dengan rentang nilai untuk data bulannya antara 0,84 pada Juli 2019 hingga 0,96 pada bulan Mei 2019 (Gambar 7). Nilai  $R$  yang dihasilkan menunjukkan bahwa  $f_oF2$  hasil metode ini termasuk kedalam kategori kuat ( $0,8 < R < 0,9$ ) hingga sangat kuat ( $0,9 < R$ ). Nilai  $R_{IRI-F10.7}$  yang diperoleh juga hampir sama dengan hasil dari Suhartini *et al.*, (2015). Korelasi ini sedikit lebih baik dibandingkan dengan hasil riset yang dilakukan Bai, *et al.*, (2021) yang memperoleh nilai  $R = 0,84$ .

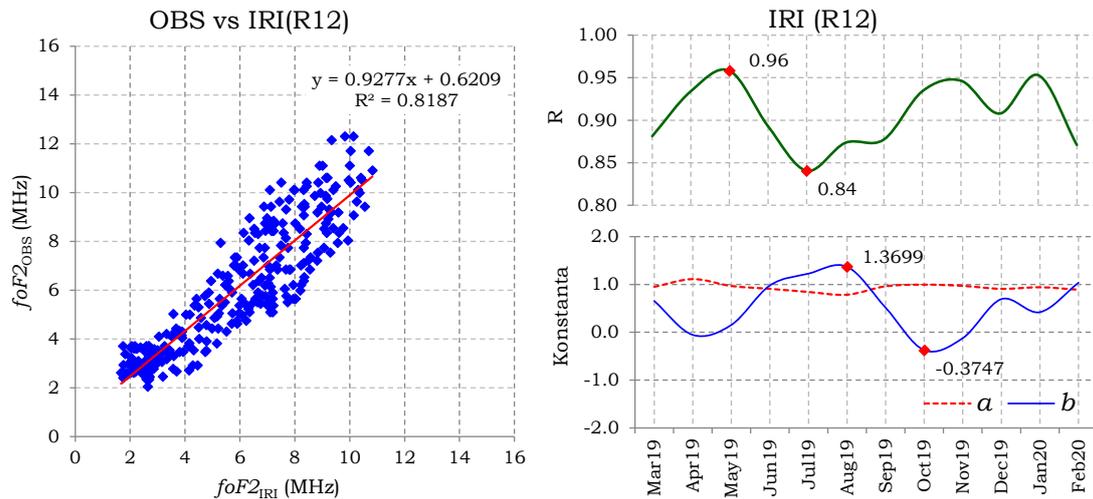
Dari Gambar 7 juga diperoleh konstanta  $a$  yang hampir konstan pada nilai 0,9037 dan konstanta  $b = 0,769$  dengan fluktuasi nilainya di antara -0,51 dan 1,4119. Nilai konstanta  $a$  cukup dekat 1, tetapi konstanta  $b$  nilainya cukup jauh dari 0. Oleh karenanya, nilai  $f_oF2$  yang ditentukan dengan metode ini harus dikoreksi menggunakan persamaan  $f_oF2 = 0,9037f_oF2_{IRI-F10.7} + 0,769$ .

Hasil perbandingan antara  $f_oF2_{IRI-R12}$  dengan  $f_oF2$  hasil observasi ditunjukkan pada Gambar 2(f). Untuk seluruh 12 bulan data diperoleh rata-rata  $\Delta f_{IRI-R12} = -0,20$  MHz dan  $\sigma_{IRI-R12} = 1,14$  MHz. Nilai  $\Delta f_{IRI-R12}$  negatif

menunjukkan bahwa secara umum nilai  $f_oF2_{IRI-R12}$  lebih rendah dari  $f_oF2$  hasil observasi. Hasil ini sama dengan penerapan model IRI2016/URSI dengan masukan F10.7 dan menguatkan hasil riset yang pernah dilakukan (Liu *et al.*, 2019; Bai *et al.*, 2021; Gonzales & Lopez, 2020).

Kemudian dari Gambar 8 diperoleh koefisien korelasi  $R_{IRI-R12} = 0,90$ . Dengan rentang nilai untuk data bulanan antara 0,84 (Juli 2019) hingga 0,96 (Mei 2019). Nilai ini persis sama dengan koefisien korelasi untuk metode IRI2016/URSI dengan masukan F10.7. Hasil ini juga mendukung hasil riset yang dilakukan oleh Suhartini *et al.*, (2015) dan Bai, *et al.*, (2021).

Selanjutnya diperoleh nilai konstanta  $a = 0,9277$  dan  $b = 0,6209$ . Nilai  $a$  relatif konstan untuk 12 bulan data, sedangkan nilai  $b$  berfluktuasi di antara -0,3747 dan 1,3699. Meskipun nilai  $a$  cukup dengan dengan 1, namun nilai  $b$  masih agak jauh dari 0, sehingga persamaan hampiran  $f_oF2$  yang diturunkan dengan model ini harus dikoreksi dengan persamaan  $f_oF2_{obs} = 0,9277f_oF2_{IRI-R12} + 0,6209$ .

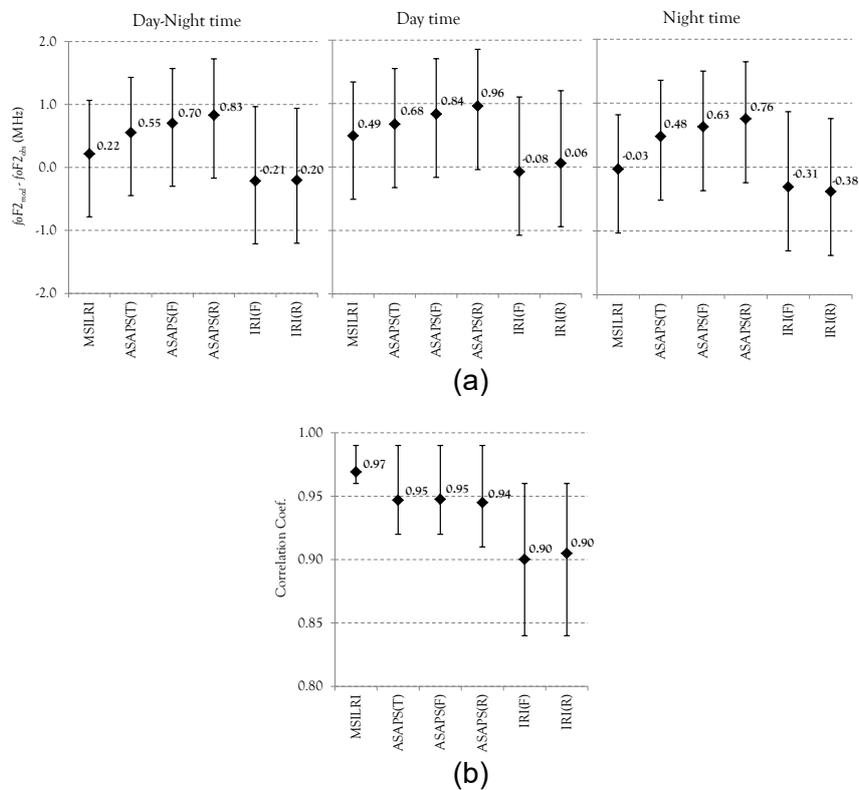


Gambar 8. Korelasi linear antara  $foF2_{IRI-R12}$  dengan  $foF2$  pengamatan dan diperoleh koefisien korelasi  $R_{IRI-R12} = 0,90$ ,  $a = 0,9277$ , dan  $b = 0,6209$  (gambar kiri); serta fluktuasi nilai  $R_{IRI-R12}$ ,  $a$ , dan  $b$  dari bulan Maret 2019 hingga Februari 2020 (gambar kanan).

**4.4. Perbandingan Model**

Berdasarkan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat disusun ikhtisar perbandingan  $foF2$  hasil tiga model tersebut berdasarkan selisih ( $\Delta f$ ) dan koefisien korelasinya (R) dengan data observasi (Gambar 9). Panel (a) gambar tersebut menunjukkan bahwa model MSILRI dan ITU-

R/CCIR cenderung menghasilkan  $foF2$  yang lebih tinggi dari hasil observasi, sedangkan model IRI2016/URSI menghasilkan nilai lebih rendah. Berdasarkan besaran nilai  $\Delta f$ , model ITU-R/CCIR memiliki simpangan paling tinggi dibandingkan 2 model lainnya dan model MSILRI memiliki simpangan paling rendah.



Gambar 9. Rataan  $\Delta f$  untuk semua model yang diuji (Daytime+Nighttime, Daytime only, Nighttime only) (a), dan koefisien korelasi masing-masing (b).

Untuk model MSILRI nilai simpangan pada siang hari (0,49 MHz) lebih tinggi dibandingkan simpangan pada malam hari (-0,03 MHz). Jadi, pada siang hari nilai  $f_oF_2$  dari model MSILRI cenderung lebih tinggi dari hasil observasi, sedangkan untuk malam hari nilainya sangat dekat dengan hasil observasi. Kemudian, simpangan untuk model ITU-R/CCIR, baik siang maupun malam hari nilai hampir sama. Model ITU-R/CCIR dengan masukan indeks T-regional menghasilkan  $f_oF_2$  lebih baik dibandingkan dengan masukan F10.7 dan R12. Untuk model IRI2016/URSI, simpangan  $f_oF_2$  siang dan malam hari juga hampir sama. Penggunaan masukan F10.7 maupun R12 untuk model tersebut juga menghasilkan nilai  $f_oF_2$  yang hampir sama.

Dari Gambar 9(b) dapat diperoleh perbandingan nilai R untuk ketiga model yang diteliti. Model MSILRI memiliki nilai R paling tinggi (0,97), sedangkan model IRI2016/URSI paling rendah (0,90) diantara model lainnya. Meskipun terdapat perbedaan R, namun perbedaannya tidak terlalu jauh dan ketiga model memiliki korelasi sangat kuat ( $0,9 < R$ ) dengan data observasi. Berdasarkan rentang nilai R, maka model MSILRI memiliki rentang yang paling sempit, sedangkan metode IRI2016/URSI memiliki rentang paling lebar.

## 5. Kesimpulan

Dari pembahasan hasil penerapan tiga model di stasiun Pameungpeuk pada saat aktivitas matahari minimum, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Nilai median  $f_oF_2$  yang ditentukan berdasarkan model MSILRI dan ITU-R/CCIR lebih tinggi dari hasil observasi, sedangkan model IRI2016/URSI menghasilkan nilai median  $f_oF_2$  lebih rendah.
- Model IRI2016/URSI menghasilkan median  $f_oF_2$  yang memiliki simpangan paling rendah (-0,20 MHz dan -0,21 MHz), kemudian model MSILRI (0,22 MHz), dan model ITU-R/CCIR menghasilkan simpangan paling besar (0,55 MHz, 0,70 MHz, dan 0,83 MHz).
- Ketiga model menghasilkan median  $f_oF_2$  yang berkorelasi sangat kuat dengan data observasi.
- Model MSILRI memiliki rentang nilai R paling sempit (0,96 – 0,99), disusul metode ITU-R/CCIR (0,91 – 0,99), dan metode IRI2016/URSI memiliki rentang nilai R paling lebar (0,84 – 0,96).

- Parameter median  $f_oF_2$  hasil model ITU-R/CCIR dengan masukan indeks T-regional dapat digunakan secara langsung tanpa koreksi, sedangkan yang lainnya harus disesuaikan menggunakan persamaan (2).
- Model IRI2016/URSI adalah yang paling mudah digunakan karena interaktif dan beroperasi secara daring dengan fitur lengkap; kemudian model ITU-R/CCIR dapat dijalankan secara daring dengan fitur terbatas; sedangkan model MSILRI saat ini hanya bisa dijalankan secara luring.

## Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih dan penghargaan disampaikan kepada Tim *Scaling* dan Interpretasi Data yang telah membantu menyediakan data  $f_oF_2$  hasil pengamatan, operator ionosonda di stasiun pengamatan Pameungpeuk yang telah membantu menyediakan data mentah.

## Pernyataan Kontribusi

Jiyo sebagai kontributor utama yang merencanakan riset, mengolah data dan menganalisis hasilnya, serta menyusun sebagian besar makalah. Rezy Pradipta membantu sebagai kontributor anggota membantu melakukan analisis dan menyusun sebagian makalah. Annis Siradj Mardiani sebagai kontributor anggota melakukan pengolahan sebagian data dan membantu analisis.

## Rujukan

- Bai, W., Tan, G., Sun, Y., Xia, J., Du, Q., Yang, G., Meng, X., Zhao, D., Liu, C., Yuerong Cai, Wang, D., Yin, C., & Hu, P. (2021). Global Comparison of F2-Layer Peak Parameters Estimated by IRI-2016 With Ionospheric Radio Occultation Data During Solar Minimum. *IEEE Access*, Vol. 9 January 14, 2021, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9314076>
- Bilitza, D., Brown, S.A., Wang, M.Y., Souza, J.R., & Roddy, P.A. (2012). Measurements and IRI model predictions during the recent solar minimum. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 86 (2012) 99–106. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2012.06.010>. [www.elsevier.com/locate/jastp](http://www.elsevier.com/locate/jastp)

- Bilitza, D. (2018). IRI the International Standard for the Ionosphere. *Adv. Radio Sci.*, 16, 1–11. <https://doi.org/10.5194/ars-16-1-2018>
- González, G. de L. & López, J. (2020). Variability of F2-layer peak characteristics at low latitude in Argentina for high and low solar activity and comparison with the IRI-2016 model. *Journal of the Earth and Space Physics*, Vol. 45, No. 4, Winter 2020, P. 143-164, DOI: 10.22059/jesphys.2019.252489.1006975, <https://arxiv.org/abs/2004.11520>
- Jiyo, Nugroho, N.D, & Mavin, R.B. (2019). Reliabilitas Frekuensi Kritis dan Ketinggian Lapisan Ionosfer Hasil *Scaling* Otomatis Menggunakan Sistem Pintar ESIR-CADI. *J. Sains Dirgantara*, Vol. 16, No. 2, halaman 105–118, <http://dx.doi.org/10.30536/j.jsd.2019.v16.a3066>
- Liu, Z., Fang, H., Weng, L., Wang, S., Niu, J., Meng, X. (2019). A comparison of ionosonde measured foF2 and IRI-2016 predictions over China. *Advances in Space Research*, Volume 63, Issue 6, 15 March 2019, Pages 1926-1936. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117719300250>
- Martiningrum, D.R. (2019). Validasi model foF2 GIM-MSILRI pada saat aktivitas matahari minimum tahun 2009 menggunakan data ionosonde Tanjungsari. *Center for Open Science* <https://doi.org/10.31227/osf.io/kxvec>
- Muslim, B., Asnawi, Martiningrum, D.R., Kurniawan, A., & Syarifudin. (2007). Model sederhana ionosfer lintang rendah Indonesia untuk parameter foF2 (MSILRI versi 2002), *Buku Ilmiah LAPAN*.
- Muslim, B. (2015). Pemodelan dan validasi hubungan antara frekuensi kritis lapisan F2 ionosfer (foF2) dengan total electron content (TEC) dari data ionosonda dan GPS. *Jurnal Fisika - Himpunan Fisika Indonesia* Volume 10 No. 1 - Juni 2010 (ISSN 0854-3046)
- Suhartini, S., Syidik, I.F., & Nurmali, D. (2015). Perbandingan foF2 keluaran MSILRI dengan data observasi di Biak, model IRI, dan ASAPS. *J. Sains Dirgantara*, Vol. 12, No. 2, halaman 117–126 [http://jurnal.lapan.go.id/index.php/jurnal\\_sains/article/view/2221](http://jurnal.lapan.go.id/index.php/jurnal_sains/article/view/2221)
- Witvliet, B.A., van Maanen, E., Petersen, G.J., Westenberg, A.J., Bentum, M.J., Slump, C.H., & Schiphorst, R. (2015). Near vertical incidence skywave propagation: elevation angles and optimum antenna height for horizontal dipole antennas. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 57, No. 1, February 2015, pages 129–146 <https://ieeexplore.ieee.org/document/7047674>
- Witvliet, B.A, & Alsina-Pages, R.M. (2017). Radio communication via near vertical incidence skywave propagation: an overview. *Telecommunication System*, 66, pages 295–309. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11235-017-0287-2>
- Yan, W., Xue, L., & Peng, L. (2020). Transmitter elevation angle prediction of near vertical incidence skywave communication link. *2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, 28–31 Oct. 2020. <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/9295648/proceeding>
- Zhu, P., Xie, C., Jiang, C., Yang, G., Liu, J., Li, Z., & Zhao, Z. (2020), Ionospheric Behavior of foF2 over Chinese EIA Region and Its Comparison with IRI-2016, *Universe* 2020, 6, 122; doi:10.3390/universe6080122. <https://www.mdpi.com/2218-1997/6/8/122>
- Zolesi, B., Cander, L.R., & De Franceschi, G. (1993). Simplified ionospheric regional model for telecommunication applications. *Radio Science*, Volume 28, Issue 4, July-August 1993, pages 603–612. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/93RS00276> )
- Walden, M.C. (2012). Comparison of propagation predictions and measurements for midlatitude HF incidence sky wave links at 5 MHz, *Radio Sci.*, 47, RS0L09, doi:10.1029/2011RS004914. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011RS004914>