

# RELIABILITAS FREKUENSI KRITIS DAN KETINGGIAN LAPISAN IONOSFER HASIL *SCALING* OTOMATIS MENGGUNAKAN SISTEM PINTAR ESIR-CADI (RELIABILITY OF THE AUTO-SCALED IONOSPHERIC CRITICAL FREQUENCIES AND HEIGHT BY USING ESIR-CADI SMART SYSTEM)

Jiyo<sup>1,\*</sup>, Niko Danusaid Nugroho<sup>2</sup>, Robin Bravo Mavin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)

<sup>2</sup> Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Gunung Djati

<sup>3</sup>Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana

\*e-mail: jiyo@lapan.go.id

Diterima 19 November 2018; Direvisi 24 Agustus 2019; Disetujui 26 Agustus 2019

## ABSTRACT

Scaling is a specific method for determining and interpreting the ionospheric parameter from the ionograms that observed by using ionosonde. The scaling reference is the UAG-23A Report as the international standard reference for ionogram scaling. Previously, ionogram scaling was done manually by trained technicians. However, in the progress of the development of programming technology, ionogram scaling can be done automatically using a smart system or software. One such system is The Expert System for Ionogram Reduction (ESIR) that has been operating automatically and integrated to the CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde) that operated at Kupang-Undana (10.16°S, 123.67°E) and Manado-Tomohon (1.48°N, 124.85°E). The results of the ESIR-CADI automatic scaling are the critical frequencies of the ionosphere ( $f_oE$ ,  $f_oF1$ , and  $f_oF2$ ) and its virtual height ( $h'E$ ,  $h'F$ ,  $h'F2$ ). In this paper, we compare these auto-scaled parameters to the parameters that scaled manually. The data used are observed at these stations during the peak period of the solar activity cycle in 2013-2015. The research goal is to know the reliability of critical frequency and virtual height obtained by the ESIR-CADI software. The results show that both individual and median of  $f_oE$  and  $f_oF2$  which were obtained by ESIR-CADI at Kupang-Undana and Manado-Tomohon are reliable, while  $f_oF1$  and  $h'E$  are not reliable. Both individual and median  $h'F2$  values are reliable for ESIR-CADI at Kupang-Undana, whereas only the median of  $h'F2$  for Manado-Tomohon is reliable. The reliable  $h'F$  parameter is only the medium that scaled by ESIR-CADI at Kupang-Undana. Thus,  $f_oE$  and  $f_oF2$  values can be used to evaluate ionospheric conditions in the SWIFtS service system, while  $h'F2$  which can be used is only for Kupang-Undana.

Keywords: *scaling, critical frequency, virtual height, median value, individual value, reliability*

## ABSTRAK

*Scaling* adalah metode untuk membaca dan menginterpretasikan nilai parameter ionosfer dari ionogram yang diperoleh melalui pengamatan menggunakan ionosonde. Metode ini mengacu kepada Report UAG-23A yang telah digunakan sebagai rujukan baku secara internasional. Pada awalnya, *scaling* dilakukan secara manual oleh teknisi yang terlatih. Namun, seiring dengan perkembangan teknologi pemrograman, *scaling* dapat dilakukan secara otomatis menggunakan sistem pintar atau *software*. Salah satu *software* tersebut adalah *The Expert System for Ionogram Reduction* (ESIR) yang telah beroperasi secara otomatis bersamaan dengan ionosonde CADI (*Canadian Advanced Digital Ionosonde*) di stasiun Kupang-Undana (10,16°LS, 123,67°BT) dan Manado-Tomohon (1,48°LU, 124,85°BT). Hasil *scaling* otomatis menggunakan ESIR-CADI di antaranya berupa frekuensi kritis lapisan ionosfer ( $f_oE$ ,  $f_oF1$ , dan  $f_oF2$ ) dan ketinggiannya ( $h'E$ ,  $h'F$ , dan  $h'F2$ ). Dalam makalah ini kami membandingkan parameter-parameter tersebut dengan parameter yang sama hasil *scaling* secara manual. Data yang digunakan merupakan hasil pengamatan di dua stasiun tersebut pada saat puncak

siklus aktivitas Matahari tahun 2013-2015. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui reliabilitas frekuensi kritis dan ketinggian hasil *scaling* menggunakan ESIR-CADI. Hasil riset menunjukkan bahwa nilai individual dan median  $foE$  dan  $foF2$ , yang dihasilkan ESIR-CADI di stasiun Kupang-Undana dan Manado-Tomohon semuanya reliabel, sedangkan  $foF1$  dan  $h'E$  tidak. Nilai individual dan median  $h'F2$  yang reliabel hanya hasil *scaling* ESIR-CADI di stasiun Kupang-Undana, sedangkan untuk stasiun Manado-Tomohon hanya nilai mediannya saja. Parameter  $h'F$  yang reliabel hanya nilai median hasil *scaling* ESIR-CADI di Stasiun Kupang-Undana. Dengan demikian, nilai  $foE$  dan  $foF2$  hasil *scaling* ESIR-CADI dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi ionosfer pada sistem layanan SWIFtS, sedangkan  $h'F2$  yang dapat digunakan hanya hasil ESIR-CADI Kupang-Undana.

Kata kunci: *scaling*, frekuensi kritis, ketinggian ionosfer, nilai median, nilai individual, reliabilitas

## 1 PENDAHULUAN

*Scaling* adalah metode yang digunakan untuk membaca dan menginterpretasikan data parameter lapisan ionosfer dari sebuah ionogram hasil pengamatan menggunakan perangkat ionosonde. Metode ini mengacu kepada Report UAG-23A (Piggott & Rawer, 1978) yang telah menjadi rujukan konvensi *scaling* secara internasional. Pada awalnya, *scaling* dilakukan secara manual dengan cara membaca skala sumbu horizontal dan sumbu vertikal sebuah gambar ionogram menjadi nilai-nilai parameter lapisan ionosfer, menggunakan kaidah dan aturan yang terdapat dalam Report UAG-23A. Namun, seiring dengan perkembangan teknologi komputasi, *scaling* dapat dilakukan secara otomatis menggunakan sistem pintar yang berupa software tertentu (misalnya Ippolito *et al.*, 2018; Galkin *et al.*, 1996; Redding, 1996). Salah satu sistem pintar yang dimaksud adalah *The Expert System for Ionogram Reduction* (ESIR) yang beroperasi menyatu dengan operasional ionosonde *Canadian Advanced Digital Ionosonde* (CADI).

ESIR-CADI mampu menyediakan informasi tentang profil kerapatan elektron dan ketinggian sebenarnya, parameter baku, dan statistik pengamatan (Jiyo, 2015). Sistem ini juga telah digunakan untuk meneliti kerapatan elektron maksimum ( $NmF2$ ) dan ketinggiannya ( $hmF2$ ) (Filawati *et al.*, 2015), dan juga untuk meneliti kejadian *Spread F* (Jiyo dan Mardiani, 2015).

Selain itu, proses *scaling* menggunakan ESIR-CADI mampu menyediakan informasi parameter frekuensi kritis dan ketinggian semu lapisan ionosfer yang diperoleh secara cepat sehingga dapat dimanfaatkan untuk mendukung layanan informasi kondisi ionosfer yang merupakan bagian dari informasi cuaca antariksa.

Meskipun jumlah informasi yang disediakan oleh ESIR-CADI cukup banyak dan dapat dimanfaatkan untuk layanan informasi cuaca antariksa, namun reliabilitasnya belum diketahui secara pasti. Oleh karena itu, riset tentang hal itu perlu dilakukan. Karena hasil *scaling* manual dianggap lebih sah dibandingkan dengan hasil *scaling* otomatis, hasil *scaling* manual digunakan sebagai pembanding untuk mengetahui akurasi hasil *scaling* otomatis ESIR-CADI.

Tujuan dari riset ini adalah mengetahui reliabilitas parameter frekuensi dan ketinggian lapisan ionosfer yang diperoleh dari proses *scaling* otomatis menggunakan sistem pintar ESIR-CADI. Informasi tentang reliabilitas parameter ionosfer hasil *scaling* ESIR-CADI dapat digunakan sebagai rujukan penggunaan data tersebut untuk mengevaluasi kondisi lapisan ionosfer. Karena proses *scaling* otomatis menggunakan *software* tersebut sangat cepat, hasilnya dapat digunakan untuk keperluan layanan informasi kondisi ionosfer pada sistem layanan SWIFtS (*Space Weather Information and Forecast Services*).

## 2 LANDASAN TEORI

Hingga saat ini telah dipahami secara luas bahwa lapisan ionosfer terdiri dari lapisan *D*, lapisan *E*, dan lapisan *F* (misalnya Rishbeth & Garriot, 1969; Hunsucker & Hargreaves, 2003). Selain 3 lapisan utama tersebut, terdapat lapisan tambahan, yakni lapisan *E-Sporadis* (*Es*) yang terjadi pada rentang ketinggian lapisan *E*, lapisan *F1*, lapisan *F1.5*, dan lapisan *F3* yang muncul pada rentang ketinggian lapisan *F*. Pada saat muncul lapisan tambahan, lapisan *F* diberi nama lapisan *F2*.

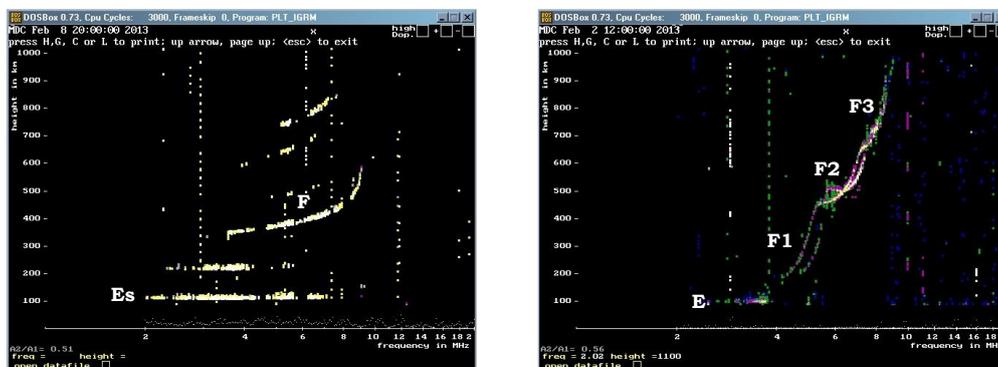
Lapisan *D* menempati ruang pada rentang ketinggian 60-90 km dan jejaknya tidak terekam dalam ionogram hasil pengamatan menggunakan ionosonde, karena batas bawah frekuensi yang digunakan ionosonde tidak memungkinkan terjadinya pemantulan gelombang radio oleh lapisan *D*. Parameter lapisan *D* yang dapat ditentukan dari ionogram adalah batas atas frekuensi gelombang radio yang diserap lapisan ini dan disebut *fmin*. Dengan kata lain, parameter *fmin* adalah frekuensi terendah gelombang radio yang dipantulkan oleh lapisan *E* atau lapisan *F*.

Lapisan *E* memiliki rentang ketinggian antara 90 km hingga 150 km dan jejaknya terekam dalam ionogram. Parameter lapisan *E* adalah frekuensi kritis, yaitu frekuensi tertinggi gelombang ordiner yang dipantulkan

oleh lapisan *E* dan dinotasikan sebagai *foE*. Demikian pula untuk lapisan *Es*, frekuensi kritisnya dituliskan sebagai *foEs*. Selain itu, parameter lain dari dua lapisan ini adalah *h'E* dan *h'Es*. Parameter *h'E* dan *h'Es* masing-masing menunjukkan ketinggian semu terendah dari lapisan *E* dan *Es*.

Lapisan *F* menempati rentang ketinggian 150 km hingga 1000 km dan jejak lapisan ini terekam dalam ionogram. Lapisan *F1* merupakan lapisan tambahan terendah dari lapisan *F*, kemudian disusul lapisan *F1.5* di atasnya. Lapisan *F3* adalah lapisan tambahan yang lebih tinggi dari lapisan *F2* yang umumnya terjadi pada ketinggian lebih dari 500 km. Masing-masing lapisan memiliki frekuensi kritis *foF1*, *foF1.5*, *foF2*, dan *foF3*, serta ketinggian semu *h'F*, *h'F1.5*, *h'F2*, dan *h'F3*. Selain frekuensi kritis, setiap lapisan juga bisa diperoleh frekuensi tertinggi dari jejak gelombang *extra-ordiner* yang terekam pada ionogram. Dalam hal ini, yang lazim dibaca (*scaled*) adalah *fxF2*, parameter khusus untuk lapisan *F2* atau *F*.

Lapisan *E* hanya muncul pada siang hari sehingga parameter *foE* dan *h'E* hanya diperoleh untuk pengamatan siang hari. Kemunculan lapisan *Es* bersifat tidak tentu (*sporadis*) yang bisa muncul pada siang dan malam hari sehingga parameter *foEs* dan *h'Es* juga tidak selalu ada.



Gambar 2-1: Ionogram hasil pengamatan pada malam hari (kiri) dan pada siang hari (kanan).

Lapisan  $F$  atau  $F2$  adalah lapisan yang paling stabil dan selalu muncul selama 24 jam sehingga parameternya juga akan selalu diperoleh. Pada malam hari, ketika hanya ada satu lapisan ionosfer pada ketinggian di atas 150 km, lapisan ini disebut lapisan  $F$ , sedangkan pada siang hari ketika muncul dua lapisan atau lebih, lapisan ini disebut lapisan  $F2$  (Gambar 2-1). Lapisan tambahan  $F1$ ,  $F1.5$ , dan  $F3$  hanya terjadi pada siang hari ketika intensitas energi Matahari yang masuk ke lapisan ionosfer lebih tinggi dan menyebabkan peningkatan ionisasi. Dengan demikian parameter 3 lapisan tambahan ini hanya akan diperoleh untuk siang hari.

Dari sekian banyak parameter ionosfer, hanya parameter lapisan  $E$ ,  $F1$ , dan  $F2$  yang akan dianalisis dalam makalah ini. Meskipun merupakan lapisan tambahan, lapisan  $E$  dan  $F1$  selalu muncul pada siang hari sehingga lebih sering digunakan sebagai objek penelitian dibandingkan dengan lapisan  $E_s$ ,  $F1.5$ , dan lapisan  $F3$ . Sementara itu, lapisan  $F2$  atau lapisan  $F$  merupakan lapisan yang paling stabil sehingga digunakan sebagai parameter utama lapisan ionosfer.

### 3 METODOLOGI

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah frekuensi kritis lapisan  $E$  ( $foE$ ), frekuensi kritis lapisan  $F1$  ( $foF1$ ), frekuensi kritis lapisan  $F2$  ( $foF2$ ), ketinggian semu lapisan  $E$  ( $h'E$ ), ketinggian semu lapisan  $F$  ( $h'F$ ), dan ketinggian semu lapisan  $F2$  ( $h'F2$ ). Data mentah diperoleh dari pengamatan menggunakan ionosonde CADI dan pemrosesan otomatis menggunakan *software* ESIR yang keduanya beroperasi secara serentak dan terintegrasi. Artinya, ketika ionosonde CADI beroperasi melakukan pengamatan, pada saat yang sama *software* ESIR melakukan tugas pengolahan secara otomatis sehingga diperoleh file-file yang dibutuhkan yaitu: `loc_yyyddd-foE.txt`, `loc_yyyddd-foF1.txt`, dan `loc_yyyddd-foF2.txt`. Tiga file ASCII

(*American Standard Code for Information Interchange*) tersebut memuat 6 parameter lapisan ionosfer yang akan dibandingkan dengan parameter hasil *scaling* secara manual.

Sesuai dengan aturan *scaling* dalam Report UAG-23A (Piggott & Rawer, 1978), nilai  $foE$  dan  $h'E$  diperoleh dari jejak lapisan  $E$ . Kemudian, nilai parameter  $foF1$  diperoleh dari jejak lapisan  $F1$ , sedangkan nilai  $h'F$  diperoleh dari jejak lapisan  $F1$  (siang hari) atau lapisan  $F$  (malam hari). Selanjutnya, nilai  $foF2$  diperoleh dari jejak lapisan  $F2$  (siang hari) atau jejak lapisan  $F$  (malam hari), dan nilai  $h'F2$  diperoleh dari jejak lapisan  $F2$ .

Pengamatan dilakukan di 2 (dua) stasiun pengamatan ionosfer yaitu stasiun kerja sama Kupang-UNDANA (10,16°LS, 123,67°BT) dan stasiun kerja sama Manado-Tomohon (1,48°LU, 124,85°BT). Pengamatan dilakukan selama tahun 2013 hingga 2015 yakni pada saat puncak aktivitas matahari siklus ke-24 dengan nilai bilangan bintik matahari (*smoothed*) 57,8 – 116,4. Dalam selang 1 jam, ESIR-CADI melakukan pengambilan sampel/data sebanyak 6 kali yaitu pada menit ke-3 atau ke-4, menit ke-6, menit ke-18 atau ke-19, menit ke-33 atau ke-34, menit ke-42, dan menit ke-48 atau ke-49. Untuk penelitian ini data yang digunakan adalah hasil pengamatan menit ke-3 atau ke-4 dengan pertimbangan bahwa data pembandingnya adalah hasil *scaling* manual yang dilakukan hanya untuk jam 0, 1, 2, ..., 23. Menit ke-3 atau ke-4 merupakan yang paling dekat dengan jam-jam tersebut.

*Scaling* manual dilakukan secara rutin oleh Tim *Scaling* dan Interpretasi Data (TSID) sehingga menghasilkan data ionosfer baku. Enam parameter ionosfer hasil *scaling* manual ini yang akan digunakan untuk penelitian ini dan merupakan bagian dari hasil *scaling* TSID. Tujuh parameter yang sama hasil *scaling* ESIR-CADI diperoleh dari 3 fail ASCII yang telah disebutkan.

Langkah yang dilakukan untuk mengetahui ketelitian hasil *scaling* otomatis ESIR-CADI adalah dengan menghitung koefisien korelasinya ( $R$ ) terhadap hasil *scaling* manual. Kekuatan korelasi dibagi menjadi lima kategori, yaitu sangat kuat ( $R \geq 0,9$ ), kuat ( $0,8 \leq R < 0,9$ ), cukup kuat ( $0,6 \leq R < 0,8$ ), lemah ( $0,3 \leq R < 0,6$ ), dan sangat lemah ( $R < 0,3$ ). Untuk kebutuhan penerapan, hanya parameter ionosfer dengan kategori korelasi cukup kuat hingga sangat kuat saja yang layak digunakan untuk mengevaluasi kondisi lapisan ionosfer. Jika level korelasinya lemah atau sangat lemah, parameter ionosfer hasil *scaling* ESIR-CADI tidak bisa digunakan untuk keperluan tersebut.

Langkah berikutnya adalah mengetahui faktor koreksi, yaitu kombinasi nilai gradien  $a$  dan konstanta  $b$  dari persamaan linear (3-1).

$$X_{\text{manual}} = aX_{\text{ESIR}} + b \quad (3-1)$$

dengan  $a$  dan  $b$  adalah konstanta yang diperoleh dari proses korelasi antara  $X_{\text{manual}}$  dan  $X_{\text{ESIR}}$ . Jika  $X_{\text{manual}}$  identik dengan  $X_{\text{ESIR}}$ , maka nilai  $a$  harus 1 dan  $b$  harus 0. Dalam kenyataannya tidak mungkin diperoleh nilai  $a$  dan  $b$  seperti itu. Jika nilai  $a$  mendekati 1 dan  $b$  mendekati 0, maka dapat disimpulkan bahwa  $X_{\text{ESIR}}$  makin mendekati  $X_{\text{manual}}$  dan artinya hasil *scaling* otomatis hampir sama dengan hasil *scaling* manual.

Faktor koreksi dituliskan dalam bentuk  $K = (a; b)$ . Jika  $K = (1; 0)$ , maka parameter ionosfer hasil *scaling* ESIR-CADI identik dengan hasil *scaling* manual. Artinya, *software* ESIR-CADI dapat melakukan *scaling* secara sempurna. Meskipun  $K \neq (1; 0)$ , jika korelasinya cukup kuat, konstanta  $a$  dan  $b$  masih bisa digunakan untuk mengoreksi hasil *scaling* ESIR-CADI.

Analisis dilakukan untuk dua kategori data, yaitu korelasi antarnilai individual dan korelasi antarmedian bulanan dari parameter ionosfer. Data individual diperoleh secara langsung dari

proses *scaling* terhadap ionogram, baik secara manual maupun otomatis menggunakan ESIR-CADI. Data individual hasil pengamatan satu bulan kemudian dihitung nilai mediannya untuk jam tertentu. Jadi, dalam satu bulan pengamatan diperoleh 24 nilai median bulanan, yakni median pada pukul 00 hingga 23 waktu lokal.

#### 4. PEMBAHASAN

Hasil pengolahan data dan perhitungan korelasi antara hasil *scaling* sistem pintar ESIR dengan hasil *scaling* manual ditunjukkan pada Gambar 4-1 hingga 4-6. Dalam gambar-gambar tersebut ditunjukkan konstanta-konstanta  $a$  dan  $b$ , serta koefisien determinasinya ( $R^2$ ). Dari koefisien determinasi dapat diperoleh koefisien korelasi  $R$  untuk setiap parameter ionosfer yang digunakan sebagai dasar untuk menentukan kekuatan korelasinya. Selanjutnya, konstanta  $a$  dan  $b$  digunakan sebagai komponen faktor koreksi  $K = (a; b)$  terhadap parameter ionosfer hasil *scaling* otomatis menggunakan ESIR-CADI.

##### 4.1 Frekuensi Kritis dan Ketinggian Lapisan E

Gambar 4-1 menunjukkan hasil korelasi antara parameter  $foE$  hasil *scaling* ESIR-CADI dengan hasil *scaling* manual. Panel (a) menunjukkan nilai konstanta  $a = 0,5899$  dan  $b = 1,3043$  dengan  $R^2 = 0,3613$  atau  $R = 0,60$  untuk stasiun Kupang-Undana. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun nilai  $a$  agak jauh dari 1, tetapi korelasinya cukup baik ( $R = 0,60$ ) dengan konstanta untuk koreksi sebesar 1,4328 MHz. Artinya, secara individual nilai  $foE$  hasil *scaling* ESIR 1,3043 MHz lebih tinggi dari hasil *scaling* manual dan keduanya memiliki korelasi **agak kuat**. Dari analisis ini diperoleh faktor koreksi  $K = (0,5899; 1,3043)$ . Gambar 4-1 panel (b) menunjukkan hasil korelasi  $foE$  individual untuk stasiun Manado-Tomohon. Nilai konstanta  $a = 0,6841$  dan  $b = 1,0476$  dengan koefisien korelasi  $R =$

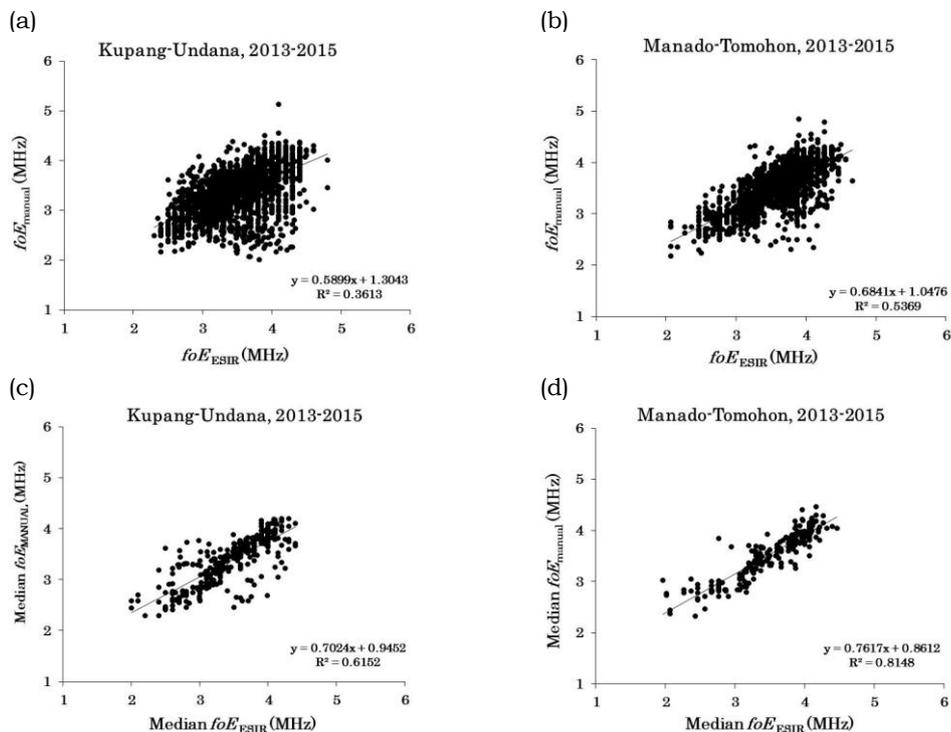
0,73 ( atau  $R^2 = 0,5369$ ). Hasil ini juga menunjukkan bahwa  $foE$  hasil *scaling* menggunakan ESIR memiliki korelasi **cukup kuat** dengan nilai  $foE$  hasil *scaling* manual dan dengan faktor koreksi  $K = (0,6841; 1,0476)$ .

Selanjutnya, Gambar 4-1 panel (c) menunjukkan hasil korelasi median  $foE$  untuk stasiun Kupang-Undana. Dari grafik ini diperoleh koefisien korelasi  $R = 0,78$  dan konstanta  $a$  dan  $b$  berturut-turut adalah  $0,7024$  dan  $0,9452$ . Ini menunjukkan bahwa median  $foE$  hasil *scaling* ESIR-CADI memiliki korelasi yang **cukup kuat** dengan hasil *scaling* manual, dengan faktor koreksi  $K = (0,7024; 0,9452)$ .

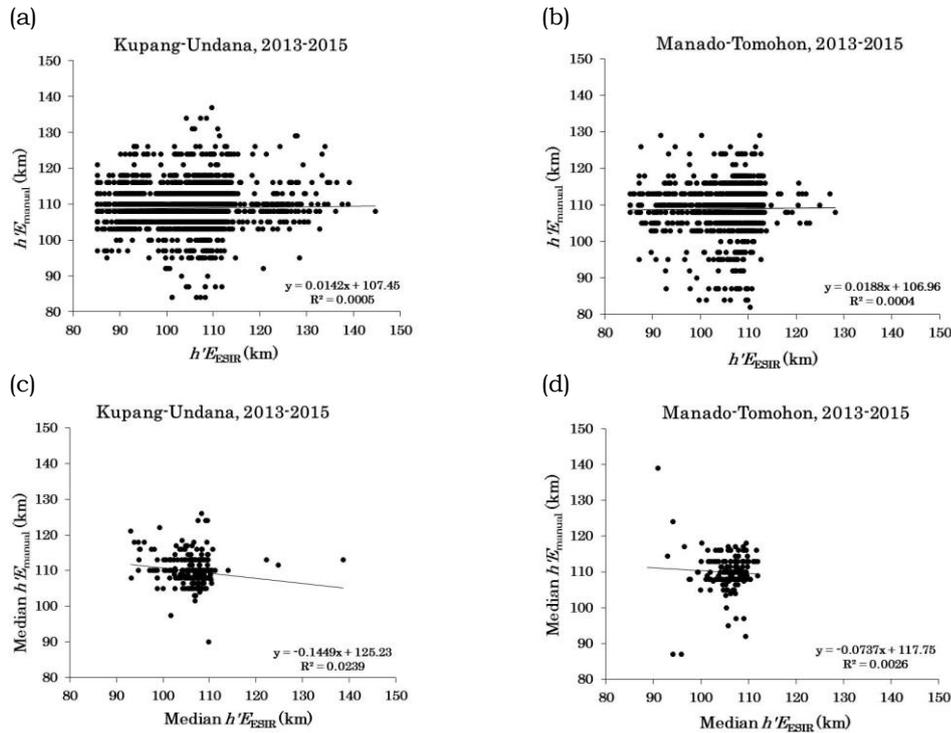
Kemudian Gambar 4-1 panel (d) menunjukkan hasil korelasi antara median  $foE$  hasil *scaling* ESIR-CADI dengan *scaling* manual di stasiun Manado-Tomohon. Koefisien korelasi **sangat kuat**, yaitu  $R = 0,90$  dan nilai konstanta  $a = 0,7617$  dan  $b = 0,8612$ .

Dengan demikian median  $foE$  hasil *scaling* otomatis ini layak digunakan dengan faktor koreksi  $K = (0,7616; 0,8612)$ .

Gambar 4-2 adalah hasil korelasi parameter ketinggian lapisan  $E$  antara hasil *scaling* ESIR-CADI dengan hasil *scaling* manual. Panel (a) menunjukkan bahwa korelasi antara keduanya **sangat lemah**, ditandai dengan nilai  $R$  hanya  $0,02$  dan nilai konstanta  $a$  juga sangat kecil, yaitu  $0,0142$  serta nilai  $b = 107,45$ . Hal yang hampir sama diperoleh dari panel (b) Gambar 4-2. Median  $h'E$  hasil *scaling* otomatis juga memiliki korelasi yang **sangat lemah** ( $R = 0,15$ ) dengan hasil *scaling* manual. Nilai konstanta  $a$  dan  $b$  berturut-turut adalah  $-0,1449$  dan  $125,23$ . Dengan hasil seperti ini, maka *scaling* otomatis menggunakan ESIR-CADI tidak akurat untuk menentukan nilai individual  $h'E$ .



Gambar 4-1: Korelasi antara frekuensi kritis lapisan  $E$  ( $foE$ ) hasil *scaling* otomatis menggunakan ESIR-CADI dengan hasil *scaling* secara manual: (a)  $foE$  individual hasil pengamatan di stasiun Kupang-Undana dan (b) di stasiun Manado-Tomohon; (c) median  $foE$  hasil pengamatan di stasiun Kupang-Undana dan (d) di stasiun Manado-Tomohon.



Gambar 4-2: Korelasi antara ketinggian (semu) lapisan E ( $h'E$ ) hasil *scaling* otomatis menggunakan ESIR-CADI dengan hasil *scaling* secara manual: (a)  $h'E$  individual hasil pengamatan di stasiun Kupang-Undana dan (b) di stasiun Manado-Tomohon; (c) median  $h'E$  hasil pengamatan di stasiun Kupang-Undana dan (d) di stasiun Manado-Tomohon.

Gambar 4-2 panel (c) dan (d) menunjukkan hasil serupa dari stasiun Manado-Tomohon. Parameter  $h'E$  hasil *scaling* ESIR-CADI untuk stasiun ini juga memiliki korelasi yang **sangat lemah** terhadap hasil *scaling* manual. Untuk  $h'E$  individual, diperoleh nilai  $R = 0,02$ ,  $a = 0,0188$ , dan  $b = 106,96$ , sedangkan untuk median  $h'E$  diperoleh nilai  $R = 0,05$ ,  $a = -0,0737$ , dan  $b = 117,75$ . Hasil ini juga menguatkan bahwa hasil *scaling* otomatis ESIR-CADI tidak akurat untuk menentukan nilai median  $h'E$ .

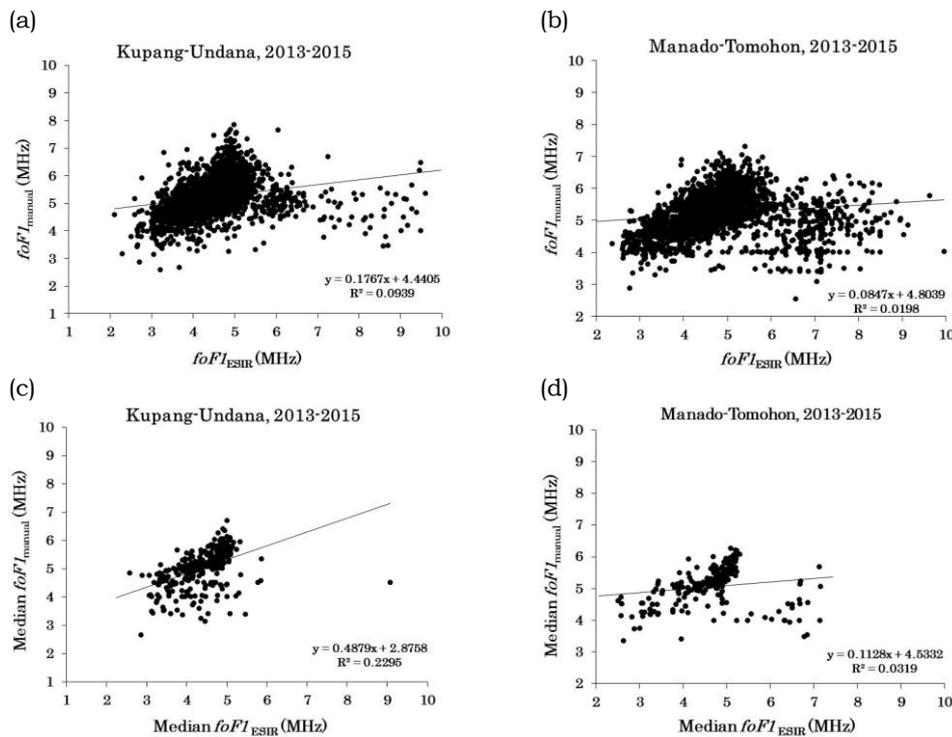
Hasil pengujian dua parameter lapisan E ini menunjukkan bahwa sistem pintar ESIR-CADI dapat digunakan untuk melakukan *scaling* parameter  $foE$ , tetapi tidak bisa digunakan untuk *scaling*  $h'E$ . Nilai  $foE$  (individual maupun median) dapat digunakan untuk evaluasi kondisi bulanan dari lapisan E, dengan menerapkan faktor koreksi  $K$  pada persamaan (3-1).

#### 4.2 Frekuensi Kritis Lapisan F1

Lapisan F1 merupakan lapisan tambahan yang hanya muncul pada

siang hari. Jejak lapisan ini juga rentan terhadap absorpsi dan pelemahan sinyal, serta dipengaruhi juga oleh kondisi kejadian *lacuna* (UAG 23A). Oleh karena itu, diperlukan pemahaman fisis yang lebih kompleks bagi operator. Sifat dan kondisi tersebut mengakibatkan sistem pintar yang dikembangkan pun belum tentu mampu mengintegrasikan pemahaman ini kedalam *software*. Indikasi akan adanya kelemahan ini terlihat pada hasil pengujian pada Gambar 4-3.

Hasil uji korelasi untuk parameter  $foF1$  individual hasil pengamatan di stasiun Kupang-Undana ditunjukkan oleh panel (a) Gambar 4-3. Koefisien korelasi diperoleh dengan nilai 0,31 yang menunjukkan bahwa  $foF1$  hasil *scaling* otomatis menggunakan ESIR-CADI memiliki hubungan **lemah** dengan hasil *scaling* manual. Hasil yang hampir sama diperoleh untuk median  $foF1$  hasil *scaling* ESIR-CADI (Gambar 4-3(c)). Korelasinya juga **lemah** dengan nilai koefisien korelasi sebesar 0,48.



Gambar 4-3: Korelasi antara frekuensi kritis lapisan *F1* hasil *scaling* otomatis menggunakan ESIR-CADI dengan *scaling* secara manual: (a) *foF1* individual hasil pengamatan di stasiun Kupang-Undana dan (b) di stasiun Manado-Tomohon; (c) median *foF1* hasil pengamatan di stasiun Kupang-Undana dan (d) di stasiun Manado-Tomohon.

Panel (b) Gambar 4-3 menunjukkan hasil uji korelasi antara *foF1* individual hasil *scaling* ESIR-CADI dengan hasil *scaling* manual untuk ionogram hasil pengamatan di stasiun Mando-Tomohon. Korelasi antara keduanya **sangat lemah** dengan  $R = 0,14$ . Sementara itu, panel (d) menunjukkan hasil yang hampir sama. Korelasi antara median *foF1* hasil *scaling* ESIR-CADI dengan hasil *scaling* manual **sangat lemah** dengan nilai  $R = 0,18$ .

Pengujian korelasi parameter *foF1* hasil *scaling* ESIR-CADI ini menunjukkan bahwa sistem pintar ESIR-CADI belum mampu menginterpretasikan parameter lapisan *F1* dengan baik. Dengan demikian, nilai *foF1* hasil *scaling* ESIR-CADI, baik individual maupun mediannya, tidak dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi lapisan ionosfer. Hasil ini juga berbeda dengan hasil pengujian *software scaling* otomatis *Autoscala* (Pezzopane dan Scotto, 2008; Enell, *et al.*, 2016), yang menyatakan bahwa hasil *scaling foF1* menggunakan *Autoscala* cukup

reliabel. Ini menunjukkan bahwa kelemahan *software* ESIR-CADI dalam melakukan *scaling foF1* masih bisa diatasi dengan meningkatkan kemampuan *software* yang dikembangkan.

### 4.3 Ketinggian Lapisan F

Seperti telah diuraikan pada Bab 3, ketinggian lapisan *F* (*h'F*) ditentukan dengan kriteria khusus. Pada siang hari nilai *h'F* ditentukan dari jejak lapisan *F1* dan pada malam hari ditentukan melalui jejak lapisan *F*. Prosedur yang agak rumit ini menjadi faktor kesulitan dalam membangun program komputer untuk sistem pintar ESIR-CADI. Hipotesis ini dikuatkan oleh hasil uji korelasi seperti pada Gambar 4-4.

Dari panel (a) Gambar 4-4 diperoleh koefisien korelasi  $R$  antara *h'F* hasil *scaling* ESIR-CADI dengan hasil *scaling* manual sebesar 0,41 yang menunjukkan hubungan yang **lemah** antara keduanya. Sementara itu, dari panel (c) diperoleh koefisien korelasi  $R = 0,61$  yang menunjukkan korelasi yang

**agak kuat**, dengan faktor koreksi  $K = (0,3046; 156,59)$ . Hasil ini menunjukkan bahwa dari stasiun Kupang-Undana, median  $h'F$  hasil *scaling* ESIR-CADI masih bisa digunakan untuk mengevaluasi kondisi ionosfer dengan koreksi dinyatakan oleh nilai  $K$ , sedangkan  $h'F$  individual tidak bisa digunakan.

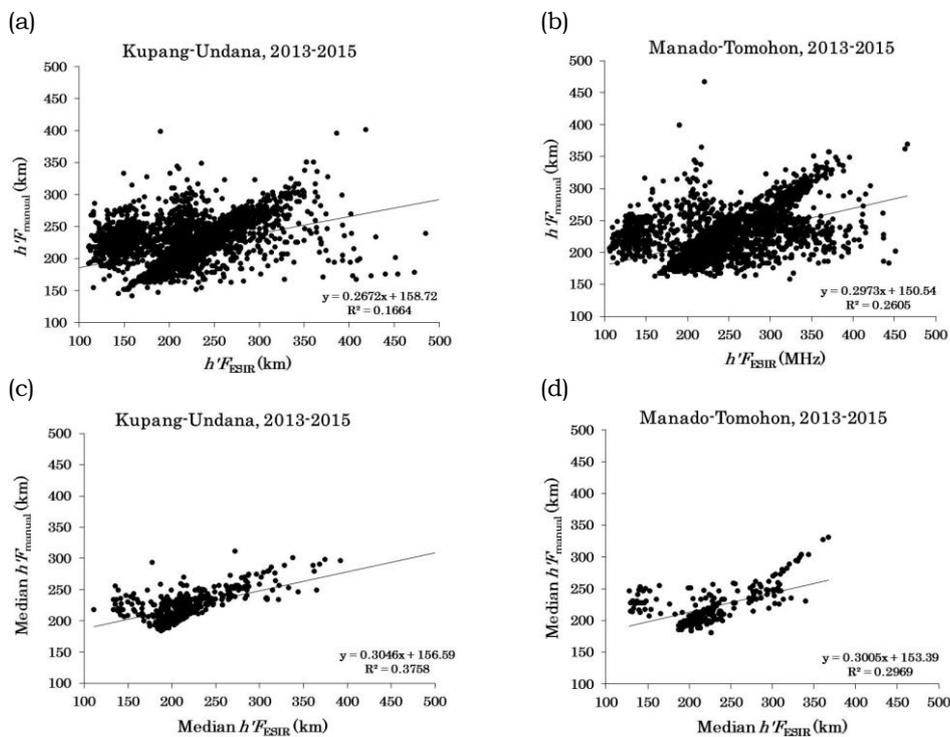
Kemudian dari panel (c) Gambar 4-4 diperoleh koefisien korelasi  $R = 0,51$  dengan nilai  $a = 0,2973$  dan  $b = 150,54$ . Hasil ini menunjukkan bahwa  $h'F$  individual hasil *scaling* ESIR-CADI memiliki korelasi **lemah** dengan hasil *scaling* manual. Demikian pula untuk median  $h'F$  pada panel (d) Gambar 4-4. Median  $h'F$  juga memiliki korelasi **lemah** dengan median  $h'F$  hasil *scaling* manual. Hal ini ditunjukkan oleh nilai  $R = 0,54$  dengan nilai  $a = 0,3005$  dan  $b = 153,39$ .

Hasil analisis untuk  $h'F$  ini juga menunjukkan bahwa *software* ESIR-CADI masih memiliki kekurangan dalam melakukan *scaling* terhadap lapisan  $F1$ , sebagaimana hasil analisis terhadap  $foF1$ . Dilihat dari nilai korelasinya, nilai

$R$  untuk  $h'F$  masih sedikit lebih tinggi dibandingkan nilai  $R$  untuk korelasi  $foF1$ . Hal ini dapat dipahami karena parameter  $h'F$  juga ditentukan dari jejak lapisan  $F$  (lapisan  $F2$  malam hari) yang lebih stabil dari lapisan  $F1$ , sehingga *software* ESIR-CADI mampu menentukan  $h'F$  dengan lebih tepat.

#### 4.4 Frekuensi Kritis Lapisan F2

Lapisan  $F2$  adalah bagian dari lapisan ionosfer yang paling stabil dan dianggap selalu ada, kecuali dalam kondisi ekstrem seperti pada saat terjadi badai Matahari yang sangat besar. Dibandingkan dengan lapisan  $E$  dan  $F1$ , lapisan  $F2$  lebih mudah diinterpretasikan karena jejaknya hampir selalu terlihat dengan jelas. Sifat ini memudahkan pengembangan metode *scaling* otomatis menggunakan sistem pintar dan menghasilkan nilai parameter yang cukup teliti sebagaimana hasil *scaling* secara manual. Hal ini ditunjukkan oleh hasil analisis terhadap parameter  $foF2$  dan  $h'F2$ .



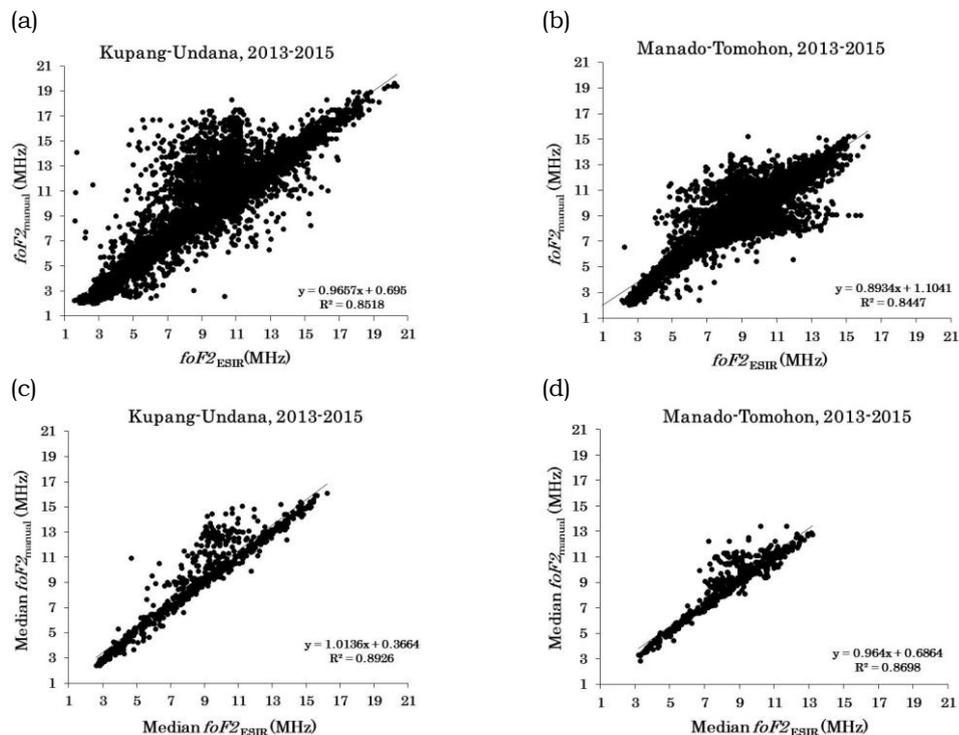
Gambar 4-4: Korelasi antara ketinggian lapisan  $F$  ( $h'F$ ) hasil *scaling* otomatis menggunakan ESIR-CADI dengan *scaling* secara manual: (a)  $foF1$  individual hasil pengamatan di stasiun Kupang-Undana dan (b) di stasiun Manado-Tomohon; (c) median  $foF1$  hasil pengamatan di stasiun Kupang-Undana dan (d) stasiun Manado-Tomohon.

Hasil pengamatan di stasiun Kupang-Undana seperti pada Gambar 4-5 menunjukkan bahwa parameter  $foF2$  hasil *scaling* ESIR-CADI dengan hasil *scaling* manual memiliki korelasi **sangat kuat**. Dari panel (a) diperoleh nilai koefisien korelasi  $R = 0,92$  dengan nilai  $a = 0,9657$  dan  $b = 0,695$ . Hasil ini menunjukkan bahwa  $foF2$  hasil *scaling* ESIR-CADI mempunyai korelasi sangat kuat dengan hasil *scaling* manual. Kemudian nilai  $a \sim 1$  menunjukkan bahwa  $foF2$  individual hasil *scaling* ESIR-CADI sangat dekat dengan hasil *scaling* manual; dan nilai  $b = 0,695$  menunjukkan bahwa selisih antara hasil *scaling* ESIR-CADI dengan *scaling* manual relatif dekat dengan batas ketelitian *scaling* dalam Report UAG-23A, yakni 0,5 MHz (atau  $5\Delta$ ). Dengan demikian diperoleh faktor koreksi  $K = (0,9657; 0,695)$ .

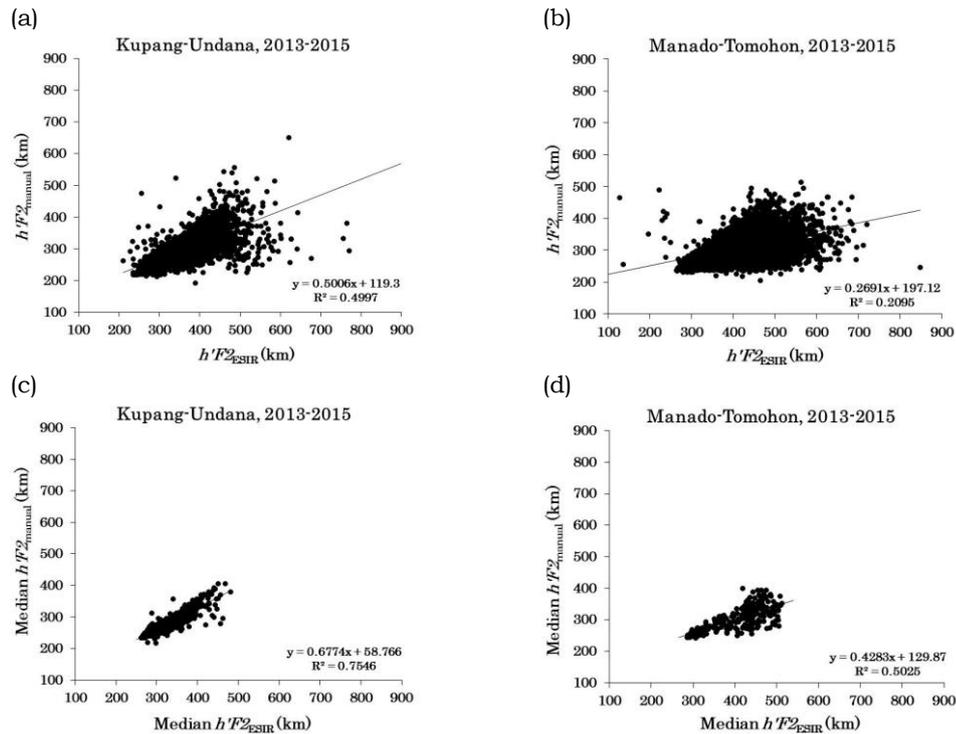
Selanjutnya panel (c) dari Gambar 4-5 menguatkan hasil pada panel (a). Parameter median  $foF2$  memiliki koefisien korelasi  $R = 0,94$ , konstanta  $a =$

1,0139, dan konstanta  $b = 0,3664$ . Median  $foF2$  hasil *scaling* ESIR-CADI dengan hasil *scaling* manual mempunyai korelasi **sangat kuat** dengan nilai yang sangat dekat dengan median  $foF2$  hasil *scaling*, ditunjukkan oleh nilai  $a$  yang sangat dekat dengan 1 dan nilai  $b < 0,4$ . Konstanta  $b$  ini menunjukkan bahwa selisih antara median  $foF2$  hasil *scaling* ESIR-CADI dengan hasil *scaling* manual kurang dari 0,4 MHz. Nilai faktor koreksi  $K = (1,0139; 0,3664)$ .

Hasil yang hampir sama juga diperoleh dari pengamatan di stasiun Manado-Tomohon. Gambar 4-5 (b) menunjukkan koefisien korelasi  $R = 0,92$  dengan nilai konstanta  $a = 0,8934$  dan  $b = 1,1041$ . Hasil ini menunjukkan bahwa  $foF2$  individual hasil *scaling* ESIR-CADI dari stasiun tersebut memiliki korelasi sangat kuat dengan hasil *scaling* manual. Nilai  $a$  dan  $b$  menunjukkan bahwa faktor koreksi untuk  $foF2$  individual hasil *scaling* ESIR-CADI adalah  $K = (0,8934; 1,1041)$ .



Gambar 4-5: Korelasi antara frekuensi kritis lapisan  $F$  ( $foF2$ ) hasil *scaling* otomatis menggunakan ESIR-CADI dengan *scaling* secara manual: (a)  $foF2$  individual hasil pengamatan di stasiun Kupang-Undana dan (b) di stasiun Manado-Tomohon; (c) median  $foF2$  hasil pengamatan di stasiun Kupang-Undana dan (d) stasiun Manado-Tomohon.



Gambar 4-6: Korelasi antara ketinggian lapisan  $F2$  ( $h'F2$ ) hasil *scaling* otomatis menggunakan ESIR-CADI dengan *scaling* secara manual: (a)  $h'F2$  individual hasil pengamatan di stasiun Kupang-Undana dan (b) di stasiun Manado-Tomohon; (c) median  $h'F2$  hasil pengamatan di stasiun Kupang-Undana dan (d) stasiun Manado-Tomohon.

Panel (d) Gambar 4-5 juga menguatkan hasil analisis sebelumnya. Dari panel ini diperoleh koefisien korelasi  $R = 0,93$  dengan nilai  $a = 0,964$  dan  $b = 0,6864$ . Hasil ini menunjukkan bahwa median  $foF2$  hasil *scaling* ESIR-CADI di stasiun Manado-Tomohon juga mempunyai korelasi **sangat kuat** dengan hasil *scaling* manual. Nilai  $a$  yang sangat dekat dengan 1 dan nilai  $b$  relatif dekat dengan 0,5 MHz ( $5\Delta$ ) menguatkan bahwa hasil *scaling* ESIR-CADI sangat dekat dengan hasil *scaling* manualnya. Dari analisis ini diperoleh faktor koreksi  $K = (0,964; 0,6864)$ .

Hasil analisis ini tidak terlalu mengejutkan karena sudah dapat diduga sebelumnya dan telah dibuktikan oleh hasil penelitian serupa (Ding *et al.*, 2007; Zheng *et al.*, 2013; Pillat *et al.*, 2013; Scotto dan MacDougall, 2012) yang juga menghasilkan hal yang hampir sama. Bahkan untuk ionogram *oblique*, nilai  $foF2$  juga dapat ditentukan secara akurat dengan metode *scaling* otomatis tanpa dipengaruhi oleh gangguan karena

kemunculan lapisan  $F1$  di bawahnya (Yaogai, *et al.*, 2015).

#### 4.5 Ketinggian Lapisan $F2$

Ketinggian lapisan  $F2$  ( $h'F2$ ) ditentukan dari jejak lapisan  $F2$  pada siang hari dan lapisan ini merupakan lapisan yang selalu ada sehingga interpretasinya lebih mudah dilakukan sebagaimana *scaling foF2*. Oleh karena itu, *scaling h'F2* lebih mudah dilakukan, termasuk dengan metode *scaling* otomatis. Hasil-hasil berikut menegaskan tentang hal ini.

Pada Gambar 4-6 (a) diketahui koefisien korelasi  $R$  untuk  $h'F2$  individual adalah 0,71 dengan nilai konstanta  $a = 0,5006$  dan  $b = 119,3$ . Hasil ini menunjukkan bahwa  $h'F2$  individual hasil *scaling* ESIR-CADI untuk stasiun Kupang-Undana memiliki korelasi yang **cukup kuat** dengan hasil *scaling* manual. Implikasinya, hasil *scaling* otomatis dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi ionosfer dengan faktor koreksi  $K = (0,5006; 119,3)$ . Hal yang hampir sama diperoleh dari analisis

korelasi median  $h'F2$  (Gambar 4-6(c)). Dari panel (c) ini diperoleh koefisien korelasi  $R = 0,87$  dengan  $a = 0,6774$  dan  $b = 58,766$ . Jadi, median  $h'F2$  hasil *scaling* ESIR-CADI memiliki korelasi kuat dengan hasil *scaling* manual dan faktor koreksinya  $K = (0,6774; 58,766)$ .

Analisis korelasi terhadap  $h'F2$  hasil pengamatan di stasiun Manado-Tomohon ditunjukkan pada Gambar 4-6 panel (b) dan panel (d). Hasil yang agak berbeda diperoleh dari panel (c), yaitu korelasi  $R = 0,46$  dengan nilai  $a = 0,2691$  dan  $b = 197,12$ . Hasil ini menunjukkan bahwa  $h'F2$  hasil *scaling* ESIR-CADI memiliki korelasi yang **lemah** terhadap hasil *scaling* manual sehingga parameter ini tidak bisa digunakan untuk mengevaluasi kondisi ionosfer. Kemudian dari panel (d) diperoleh hasil bahwa median  $h'F2$  memiliki korelasi yang **cukup kuat** yang ditunjukkan oleh nilai  $R = 0,71$  dengan nilai  $a = 0,4283$  dan  $b = 129,87$ . Dengan demikian, median  $h'F2$  hasil *scaling* ESIR-CADI di stasiun Manado-Tomohon dapat diterapkan untuk mengevaluasi kondisi lapisan ionosfer dengan faktor korelasi  $K = (0,4283; 129,87)$ .

**4.6 Resume Hasil Pengujian**

Nilai koefisien korelasi  $R$  yang diperoleh dari pengujian ditunjukkan pada Tabel 4-1. Berdasarkan kriteria  $R$  yang telah ditetapkan, dapat diambil kesimpulan bahwa parameter  $h'E$  dan  $foF1$  hasil *scaling* otomatis menggunakan ESIR-CADI tidak dapat digunakan untuk

mengevaluasi kondisi ionosfer, baik nilai individual maupun mediannya, karena korelasinya sangat lemah atau lemah. Sementara itu, parameter  $foE$ , baik nilai individual maupun mediannya, dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi lapisan ionosfer dengan menerapkan faktor koreksi pada Tabel 4-2 menggunakan persamaan (3-1). Sementara itu, parameter  $h'F$  hanya bisa digunakan nilai mediannya untuk stasiun Kupang-Undana.

Parameter  $foF2$  hasil *scaling* otomatis menggunakan ESIR-CADI dari stasiun Kupang-Undana dan Manado-Tomohon memiliki korelasi yang sangat kuat sehingga nilai individual maupun mediannya dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi lapisan ionosfer. Faktor koreksi untuk parameter ini terdapat pada Tabel 4-2 dan diterapkan menggunakan persamaan (3-1) untuk menentukan nilai  $foF2$  terkoreksi yang digunakan untuk evaluasi kondisi ionosfer.

Parameter  $h'F2$  hasil *scaling* otomatis menggunakan ESIR-CADI pengamatan di stasiun Kupang-Undana bisa digunakan untuk mengevaluasi kondisi lapisan ionosfer dengan faktor koreksinya. Pada parameter  $h'F2$  hasil pengamatan di stasiun Manado-Tomohon, hanya nilai mediannya saja yang bisa dimanfaatkan untuk mengevaluasi kondisi lapisan ionosfer, sedangkan nilai individualnya tidak bisa digunakan karena korelasinya lemah.

Tabel 4-1: KOEFISIEN KORELASI ANTARA PARAMETER HASIL SCALING OTOMATIS DENGAN HASIL SCALING MANUAL

Parameter	Kupang-Undana		Manado-Tomohon	
	Individual	Median	Individual	Median
$foE$	0,60	0,78	0,73	0,90
$h'E$	0,02	0,15	0,02	0,05
$foF1$	0,31	0,48	0,14	0,18
$h'F$	0,41	0,61	0,51	0,54
$foF2$	0,92	0,94	0,92	0,93
$h'F2$	0,71	0,81	0,46	0,71

Tabel 4-2: FAKTOR KOREKSI  $K$  UNTUK BEBERAPA PARAMETER IONOSFER HASIL SCALING ESIR-CADI

Parameter	Kupang-Undana		Manado-Tomohon	
	Individual	Median	Individual	Median
$foE$	(0,5899; 1,3043)	(0,7024; 0,9452)	(0,6841; 1,0476)	(0,7616; 0,8612)
$h'F$	-	(0,3046; 156,59)	-	-
$foF2$	(0,9657; 0,6950)	(1,0139; 0,3664)	(0,8934; 1,1041)	(0,9640; 0,6864)
$h'F2$	(0,5006; 119,30)	(0,6774; 58,766)	-	(0,4283; 129,87)

Dengan demikian, diketahui beberapa parameter hasil *scaling* otomatis menggunakan ESIR-CADI yang memiliki korelasi cukup kuat hingga sangat kuat, sehingga reliabel dan dapat dimanfaatkan untuk mengevaluasi kondisi lapisan ionosfer. Untuk menentukan parameter ionosfer yang sudah terkoreksi, dapat digunakan persamaan linear (3-1) dengan konstanta  $a$  dan  $b$  yang terkandung dalam faktor koreksi  $K$ .

## 5 KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat ditarik dari pembahasan adalah bahwa nilai individual dan median  $foF2$  yang dihasilkan oleh ESIR-CADI mendekati hasil *scaling* secara manual sehingga reliabel digunakan untuk mengevaluasi kondisi ionosfer. Demikian pula dengan parameter  $foE$  hasil *scaling* ESIR-CADI, nilai individual dan mediannya reliabel untuk evaluasi kondisi ionosfer. Sementara itu, parameter  $foF1$  dan  $h'E$ , baik nilai individual maupun mediannya, masih sangat jauh berbeda dengan hasil *scaling* manual sehingga tidak reliabel. Hal ini menunjukkan bahwa  $foE$  dan  $foF2$  hasil *scaling* ESIR-CADI dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi ionosfer pada sistem layanan SWIFtS.

Nilai individual dan median  $h'F2$  hasil *scaling* ESIR-CADI di stasiun Kupang-Undana juga reliabel, sedangkan untuk stasiun Manado-Tomohon hanya nilai mediannya yang reliabel. Dengan demikian, median  $h'F2$  dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi ionosfer. Untuk parameter  $h'F$  hasil *scaling* ESIR-CADI, hanya nilai median untuk stasiun

Kupang-Undana yang reliabel, sedangkan yang lainnya tidak. Dengan demikian,  $h'F2$  hasil *scaling* ESIR-CADI stasiun Kupang-Undana dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi ionosfer pada sistem layanan SWIFtS, sedangkan hasil stasiun Manado-Tomohon kurang reliabel.

Penerapan parameter ionosfer hasil *scaling* ESIR-CADI yang bisa digunakan untuk mengevaluasi kondisi ionosfer pada sistem layanan SWIFtS, dilakukan dengan menggunakan persamaan linear (3-1) dan konstanta faktor koreksi  $K$  seperti pada Tabel 4-2.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai oleh Insentif Riset Pratama (INSINAS) Tahun 2018 dengan judul "Pengembangan Sistem Layanan Informasi dan Prediksi Cuaca Antariksa". Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Tim *Scaling* dan Interpretasi Data Ionosfer yang telah menyediakan data parameter ionosfer, dan kepada operator ionosonde di Stasiun Kupang-Undana dan Manado-Tomohon yang telah membantu melakukan pengamatan dan menyediakan data mentah berupa ionogram.

## DAFTAR RUJUKAN

- Ding, Z.H., B.Q. Ning, W.X. Wan, dan L.B. Liu, 2007. *Automatic Scaling of F2-Layer Parameters from Ionograms based on the Empirical Orthogonal Function (EOF) Analysis of Ionospheric Electron Density*, Earth Planets Space, 59, 51–58.
- Enell, C.F., A. Kozlovsky, T. Turunen, T. Ulich, S. Väilitalo, C. Scotto, dan M. Pezzopane,

2016. *Comparison between Manual Scaling and Autoscala Automatic Scaling Applied to Sodankylä Geophysical Observatory ionograms*, Geoscientific Instrumentation Methods and Data System, 5, 53–64.
- Filawati, S., Jiyo, dan C. Mende, 2015. *Analisis Kerapatan Elektron dan Ketinggian Maksimum Lapisan Ionosfer di Atas Manado*, Prosiding Workshop Riset Cuaca Antariksa dan Peluang Pemanfaatannya.
- Galkin, I.A., B.W. Reinisch, G.A Ososkov, E.G. Zaznobina, dan S.P. Neshyba, 1996. *Feedback Neural Networks for ARTIST Ionogram Processing*, Radio Science, 31, 1119-1129.
- Hunsucker, R.D., J.K. Hargreaves, 2003. *The High-Latitude Ionosphere and Its Effects on Radio Propagations*, Cambridge University Press, pp 26-39.
- Ippolito, A., D. Altadill, C. Scotto, dan E. Blanch, 2018. *Oblique Ionograms Automatic Scaling Algorithm OIASA Application to the Ionograms Recorded by Ebro Observatory Ionosonde*, Journal of Space Weather and Space Climate, 8, A10
- Jiyo, 2015. *Analisis Kemampuan Sistem Pintar ESIR-CADI Untuk Mendukung Riset dan Layanan Informasi Ionosfer*, Majalah Sains dan Teknologi Dirgantara, 10, 23-32.
- Jiyo dan A.S. Mardiani, 2015. *Distribusi Kejadian Equatorial Spread F di Atas Stasiun Pengamatan Ionosfer Manado-Tomohon Berdasarkan Data Pengamatan ESIR-CADI*, Prosiding Workshop Riset Cuaca Antariksa dan Peluang Pemanfaatannya.
- Pezzopane, M., C. Scotto, 2008. *A Method for Automatic Scaling of F1 Critical Frequencies from Ionograms*, Radio Science, 43, RS2S91.
- Piggott, W.R. dan K. Rawer, 1978. *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction*, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, NOAA, Boulder, Colorado.
- Pillat, V.G., L.N.F. Guimarães, P.R. Fagundes, dan J.D. Da Silva, 2013. *A Computational Tool for Ionosonde CADI's Ionogram Analysis*, Journal Computers & Geosciences Archive, 52, 372-378.
- Rishbeth, H. dan O.K. Garriott, 1969. *Introduction to Ionospheric Physics*, New York: Academic Press, Inc.
- Redding, N.J., 1996. *The Autoscaling of Oblique Ionograms*, Technical Report DSTO-RR-0074, DSTO Electronics and Surveillance Research Laboratory, Australia.
- Scotto, C. dan J. MacDougall, 2012. *Application of Autoscala Software to the Canadian Advanced Digital Ionosonde*, International Journal of Remote Sensing, 33, 5574-5582.
- Yaogai, H., S. Huan, Z. Xianjian, dan Z. Zhengyu, 2015. *Real-Time Automatic Scaling Method of Oblique Ionogram Parameters Based on Morphological Operator and Inversion Technique*, Wuhan University Journal of Natural Sciences, 20.
- Zheng, H., G. Ji, G. Wang, Z. Zhao, dan S. He, 2013. *Automatic Scaling of F Layer from Ionograms based on Image Processing and Analysis*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 105-106, 110-118.