E-ISSN : 3025-1311
https://ejournal.warunayama.org/kohesi

Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek
Volume 11 No 2 Tahun 2026

PENGEMBANGAN SISTEM AUTOSCALING IONOGRAM CADI BERBASIS PENGOLAHAN CITRA DIGITAL

Apriadi Rusli[1], Redi Ratiandi Yacoub[2], Neilcy Tjahjamooniarsih[3], Fitri Imansyah[4], Leonardus Sandy Ade Putra[5]
[1-5]Universitas Tanjungpura
[1]d1021221060@student.untan.ac.id, [2]rediyacob@ee.untan.ac.id,
[3]neilcy.mooniarsih@ee.untan.ac.id, [4]fitri.imansyah@ee.untan.ac.id,
[5]leonardusandy@ee.untan.ac.id

Abstrak

Proses *scaling* ionogram Canadian Advanced Digital Ionosonde (CADI) di BRIN Pontianak masih dilakukan secara manual sehingga memerlukan waktu pengolahan yang relatif lama dan berpotensi menghasilkan perbedaan interpretasi antaroperator. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi sistem *autoscaling* ionogram berbasis pengolahan citra digital untuk mengekstraksi parameter ionosfer berupa frekuensi minimum (fmin), frekuensi kritis lapisan E sporadis (foEs), ketinggian virtual lapisan F2 (h'F2), dan frekuensi kritis lapisan F2 (foF2). Penelitian dilakukan menggunakan pendekatan eksperimen melalui tahapan pengembangan sistem yang meliputi konversi citra ke *grayscale*, pemotongan area ionogram, *thresholding*, penyaringan derau, pemisahan lapisan E dan F, analisis gradien kurva, serta ekstraksi parameter. Kinerja sistem dievaluasi terhadap 2.495 citra ionogram dengan membandingkan hasil *autoscaling* dan *scaling* manual menggunakan metrik *Detection Rate*, *Mean Absolute Error*, *Root Mean Square Error*, dan *Relative Error*. Hasil pengujian menunjukkan nilai *Detection Rate* sebesar 95,74% untuk fmin, 73,75% untuk foEs, 95,80% untuk h'F2, dan 95,73% untuk foF2. Nilai *Relative Error* masing-masing parameter sebesar 15,16%, 6,57%, 9,83%, dan 6,93%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi parameter fmin, h'F2, dan foF2 dengan tingkat keberhasilan yang tinggi, meskipun kemampuan deteksi foEs masih perlu ditingkatkan. Sistem yang dikembangkan dapat digunakan sebagai alat bantu awal untuk mendukung proses analisis ionogram CADI secara lebih konsisten dan otomatis.

Kata kunci: A*utoscaling*, CADI, ionogram, ionosfer, pengolahan citra digital.

Article History
Received: July 2026
Reviewed: July 2026
Published: July 2026

Plagiarism Checker No 237.u873247.fh8374
Copyright : Author
Publish by : Kohesi

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

Abstract

The ionogram scaling process for the Canadian Advanced Digital Ionosonde (CADI) at BRIN Pontianak is currently performed manually, requiring considerable processing time and potentially producing variations in interpretation among operators. This study aims to develop and evaluate a digital image-processing-based ionogram autoscaling system for extracting ionospheric parameters, including the minimum frequency (fmin), the critical frequency of the sporadic E layer (foEs), the virtual height of the F2 layer (h'F2), and the critical frequency of the F2 layer (foF2). The study employed an experimental approach through a system development process consisting of grayscale conversion, ionogram region cropping, thresholding, noise filtering, separation of the E and F layers, curve-gradient analysis, and automatic parameter extraction. The system performance was evaluated using 2,495 ionogram images by comparing the autoscaling results with manual scaling results based on Detection Rate, Mean Absolute Error, Root Mean Square Error, and Relative Error. The results showed Detection Rates of 95.74% for fmin, 73.75% for foEs, 95.80% for h'F2, and 95.73% for foF2. The corresponding Relative Error values were 15.16%, 6.57%, 9.83%, and 6.93%, respectively. These findings indicate that the system achieved high detection performance for fmin, h'F2, and foF2, although its ability to detect foEs requires further improvement. The developed system can be used as a preliminary supporting tool for a more consistent and automated analysis of CADI ionograms.

***Keywords**: Autoscaling, CADI, digital image processing, ionogram, ionosphere.*

1. PENDAHULUAN

Ionosfer merupakan bagian atmosfer bumi yang mengandung partikel bermuatan dan memiliki peran penting dalam proses propagasi gelombang radio. Perubahan kondisi ionosfer dapat memengaruhi kualitas komunikasi radio, khususnya komunikasi pada pita High Frequency (HF), serta berhubungan dengan berbagai aplikasi seperti navigasi satelit dan pengamatan cuaca antariksa. Salah satu metode yang digunakan untuk mengamati karakteristik ionosfer adalah pengukuran menggunakan ionosonde. Hasil pengukuran tersebut disajikan dalam bentuk ionogram yang menggambarkan hubungan antara frekuensi gelombang radio dan ketinggian virtual lapisan ionosfer.

Salah satu instrumen yang digunakan untuk melakukan pengamatan ionosfer adalah Canadian Advanced Digital Ionosonde (CADI). Instrumen tersebut menghasilkan citra ionogram yang perlu dianalisis melalui proses scaling untuk memperoleh berbagai parameter penting, seperti frekuensi kritis lapisan F2 (foF2), frekuensi kritis lapisan E sporadis (foEs), ketinggian virtual lapisan F2 (h'F2), dan frekuensi minimum yang dapat diamati pada ionogram (fmin). Parameter-parameter tersebut dapat digunakan untuk menggambarkan kondisi ionosfer dan mendukung analisis propagasi gelombang radio, komunikasi HF, navigasi satelit, serta penelitian cuaca antariksa.

Pengolahan ionogram CADI di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Pontianak masih melibatkan proses scaling secara manual. Pada proses tersebut, operator harus mengidentifikasi jejak pantulan atau trace ionosfer secara visual pada setiap citra ionogram. Proses ini membutuhkan waktu yang relatif lama, terutama ketika jumlah ionogram yang dianalisis cukup besar. Selain itu, hasil scaling manual sangat bergantung pada pengalaman dan ketelitian operator sehingga berpotensi menghasilkan perbedaan interpretasi antaroperator. Kondisi tersebut dapat membatasi jumlah data yang diproses dan memengaruhi konsistensi hasil analisis ionogram.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk meningkatkan otomatisasi dan akurasi proses scaling ionogram. Themens et al.[1] membahas penggunaan skor kepercayaan pada sistem ARTIST untuk menilai tingkat keandalan hasil autoscaling ionogram. De La Jara dan Olivares [2] mengembangkan metode deteksi pantulan ionosfer pada ionogram digital menggunakan Convolutional Neural Network. Selanjutnya, Huang et al.[3] menerapkan Spatial Attention U-Net untuk memulihkan hasil pengukuran ionosfer dan mengekstraksi parameter ionosfer. Sementara itu, Fagre et al.[4] mengembangkan algoritma pengolahan citra untuk melakukan scaling otomatis pada lapisan F. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa pengolahan citra dan algoritma komputasi memiliki potensi untuk mengurangi ketergantungan pada proses scaling manual.

Pengembangan metode autoscaling terus berlanjut dengan memanfaatkan pendekatan pengolahan citra dan kecerdasan buatan. Wang et al. [5] mengusulkan metode ekstraksi dan perbaikan trace lapisan F pada ionogram menggunakan teknik pengolahan citra untuk meningkatkan kontinuitas dan kualitas trace sebelum proses penentuan parameter ionosfer. Xiao et al. [6] menerapkan metode *deep learning* untuk melakukan autoscaling ionogram secara otomatis sehingga mampu meningkatkan akurasi identifikasi parameter ionosfer dibandingkan pendekatan konvensional. Selanjutnya, Sherstyukov et al. [7] memanfaatkan *Convolutional Neural Network* (CNN) untuk mengenali parameter ionogram secara otomatis dengan tingkat akurasi yang tinggi. Di sisi lain, Bilitza et al. [8] menjelaskan bahwa *International Reference Ionosphere* (IRI) merupakan model acuan global yang banyak digunakan sebagai tolok ukur dalam evaluasi hasil pengukuran dan pemodelan ionosfer. Selain itu, Hsieh et al. [9] menunjukkan bahwa penerapan *deep learning* juga efektif untuk mengklasifikasikan profil ketinggian ionosfer dari data radio occultation, yang semakin memperkuat potensi pemanfaatan kecerdasan buatan dalam analisis karakteristik ionosfer.

Meskipun demikian, penelitian terdahulu memiliki fokus dan tingkat kompleksitas metode yang berbeda. Beberapa penelitian menggunakan pendekatan pembelajaran mendalam, sedangkan penelitian lainnya hanya berfokus pada lapisan atau parameter ionosfer tertentu. Oleh karena itu, masih diperlukan pengembangan sistem yang dapat diterapkan pada citra ionogram CADI dengan tahapan pengolahan yang lebih terstruktur untuk mendeteksi jejak ionosfer dan mengekstraksi beberapa parameter secara bersamaan. Sistem tersebut juga perlu dievaluasi dengan membandingkan hasilnya terhadap scaling manual sebagai nilai acuan.

Kebaruan yang ditawarkan dalam penelitian ini terletak pada pengembangan sistem autoscaling berbasis pengolahan citra digital yang menggabungkan tahapan konversi citra menjadi grayscale, pemotongan area ionogram, penyaringan derau, pemisahan lapisan E dan F berdasarkan ketinggian, analisis gradien kurva lapisan F, serta ekstraksi empat parameter ionosfer, yaitu fmin, foEs, h'F2, dan foF2. Berbeda dari penelitian yang hanya berfokus pada satu lapisan atau parameter, sistem yang dikembangkan diarahkan untuk mengekstraksi beberapa parameter ionosfer secara otomatis dari citra ionogram CADI. Kinerja sistem dievaluasi dengan membandingkan hasil autoscaling dan scaling manual menggunakan Detection Rate, Mean Absolute Error, Root Mean Square Error, dan Relative Error.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi sistem autoscaling ionogram CADI berbasis pengolahan citra digital untuk mendeteksi jejak pantulan serta mengekstraksi parameter fmin, foEs, h'F2, dan foF2 secara otomatis. Sistem yang dikembangkan diharapkan dapat menjadi alat bantu awal dalam mempercepat proses pengolahan ionogram, meningkatkan konsistensi hasil analisis, dan mengurangi ketergantungan terhadap interpretasi manual.

2. METODOLOGI

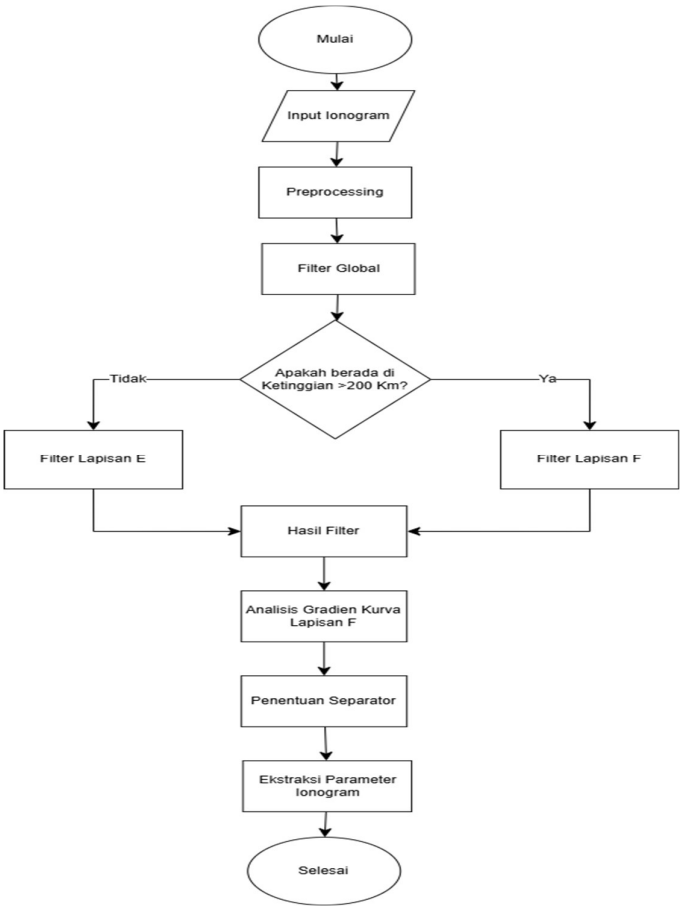
Data Penelitian

Data penelitian yang digunakan berupa ionogram hasil rekaman instrumen Canadian Advanced Digital Ionosonde (CADI) yang disimpan dalam format gambar. Jumlah data yang dianalisis sebanyak 2495 file ionogram, yang diperoleh dari hasil pengamatan selama bulan Agustus 2025, dengan total 96 ionogram setiap harinya dalam kondisi normal selama 28 hari. Seluruh data tersebut bersumber langsung dari instrumen CADI yang beroperasi di BRIN Pontianak.

Skema Arsitektur Sistem

Sistem *autoscaling* ionogram dirancang untuk menggantikan proses penskalaan manual yang memakan waktu dan rentan subjektivitas. Ionogram diskalakan dalam tiga langkah berikut. Langkah pertama adalah menghilangkan derau untuk mendapatkan ionogram yang bersih, langkah kedua adalah mengekstraksi jejak lapisan dari ionogram, dan langkah terakhir adalah mengidentifikasi parameter kritis ionogram. Dengan tahapan tersebut, sistem *autoscaling* ini dapat secara otomatis melakukan filtering, ekstraksi jejak, dan penentuan parameter Ionosfer utama. Berikut adalah diagram alir sistem *autoscaling* penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.1.

Gambar 2.1



Keterangan:
1. Citra ionogram dimasukkan ke dalam sistem sebagai data utama untuk proses *autoscaling*.
2. Pada tahap preprocessing, citra diubah menjadi grayscale dan dilakukan pemotongan pada area yang hanya memuat bagian ionogram yang relevan agar mengurangi gangguan dari area yang tidak diperlukan.
3. Proses filter global dilakukan pada seluruh bagian citra ionogram untuk memisahkan *trace* ionogram dari background secara umum.
4. Selanjutnya dilakukan pemilihan lapisan Ionosfer berdasarkan ketinggian, yaitu untuk membedakan antara lapisan E (≤ 200 km) dan lapisan F (> 200 km).
5. Jika data berada pada lapisan E, dilakukan proses filtering untuk mengekstraksi sinyal lapisan E sehingga bentuk kurva menjadi lebih jelas.
6. Jika data berada pada lapisan F, dilakukan proses filtering untuk mengekstraksi sinyal lapisan F yang memiliki pola lebih kompleks.
7. Hasil filtering dari lapisan E dan lapisan F kemudian digabungkan untuk menghasilkan citra ionogram yang lebih bersih.
8. Analisis gradien kurva pada lapisan F dilakukan untuk mengidentifikasi perubahan kemiringan kurva sehingga dapat digunakan untuk memisahkan lapisan F1 dan F2.
9. Berdasarkan hasil analisis gradien, ditentukan titik atau garis separator sebagai pembatas antara lapisan F1 dan F2.
10. Tahap akhir adalah ekstraksi parameter ionosfer dari hasil pengolahan citra.

3. METODE EVALUASI KINERJA SISTEM

Metode evaluasi kinerja sistem menggunakan empat metrik, yaitu *Detection Rate* (DR), *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Relative Error* (RE).

Detection Rate

Detection Rate digunakan untuk mengukur persentase keberhasilan sistem dalam mendeteksi parameter ionosfer dibandingkan dengan hasil scaling manual. Nilai DR dihitung menggunakan Persamaan berikut.

$$Detection\ Rate = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{N_{detected}}{N_{manual}}\ x\ 100\% \quad\right)$$

Keterangan:
1) $N_{detected}$: Jumlah Parameter Yang Berhasil Dideteksi Oleh Sistem *Autoscaling*
2) N_{manual} : Jumlah Parameter Berdasarkan Hasil *Scaling* Manual
3) n = Jumlah Data

Mean Absolute Error (MAE)

MAE mengukur rata-rata selisih absolut antara hasil autoscaling dan scaling manual. Nilai MAE yang lebih kecil menunjukkan akurasi yang lebih baik.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - y'_i|$$

Keterangan:
1) y_i = Nilai *Scaling* Mnaual
2) y'_i = Nilai *Autoscaling*
3) n = Jumlah Data

Root Mean Square Error (RMSE)

RMSE mengukur rata-rata kuadrat kesalahan antara hasil autoscaling dan scaling manual. Nilai RMSE yang lebih kecil menunjukkan tingkat ketepatan yang lebih tinggi.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - y'_i)^2}$$

Keterangan:
1) y_i = Nilai *Scaling* Manual
2) y'_i = Nilai *Autoscaling*
3) n = Jumlah Data

Relative Error (RE)

RE menyatakan persentase kesalahan relatif antara hasil autoscaling dan scaling manual. Semakin kecil nilai RE, semakin baik performa sistem.

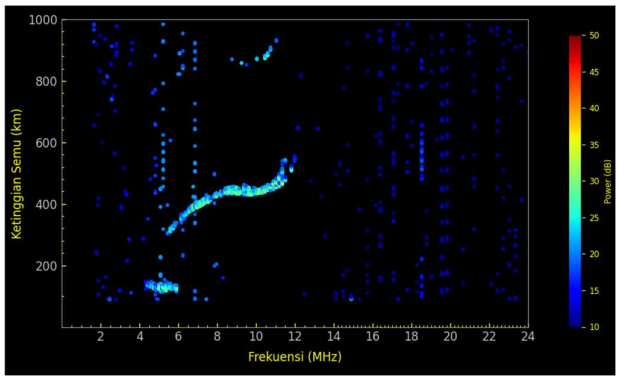
$$RE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{|y_i - y'_i|}{|y_i|}\ x\ 100\%\right)$$

Keterangan:
1) y_i = Nilai Manual
2) y'_i = Nilai Hasil Autoscaling
3) n = Jumlah Data

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Citra Awal

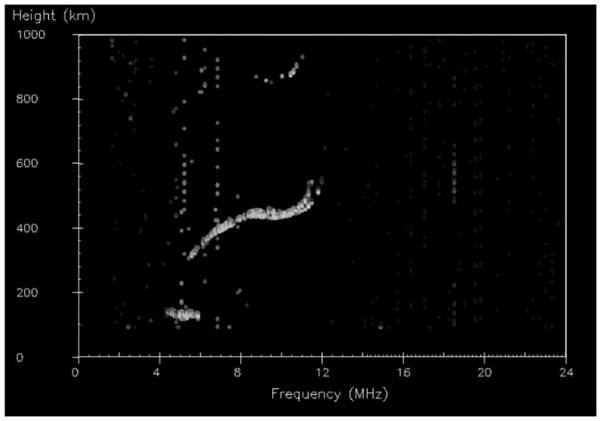
Citra awal merupakan ionogram hasil pengamatan CADI yang digunakan sebagai data masukan pada sistem. Citra ini masih mengandung berbagai objek selain *trace* ionosfer, seperti garis vertikal, *noise*, dan informasi teks, sehingga diperlukan tahapan pengolahan citra sebelum dilakukan ekstraksi parameter.



Gambar 4.1. Citra Awal

Hasil Preprocessing

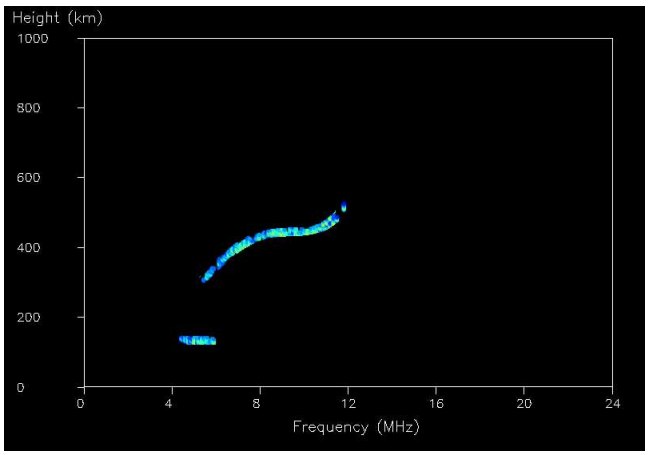
Tahap *preprocessing* bertujuan meningkatkan kualitas citra ionogram sebelum dilakukan pengolahan lebih lanjut. Proses ini meliputi konversi ke *grayscale* dan *cropping* untuk memfokuskan area ionogram serta menghilangkan bagian citra yang tidak diperlukan. Hasil *preprocessing* dapat dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4.2. Citra Hasil *Preprocessing*

Hasil Filtering

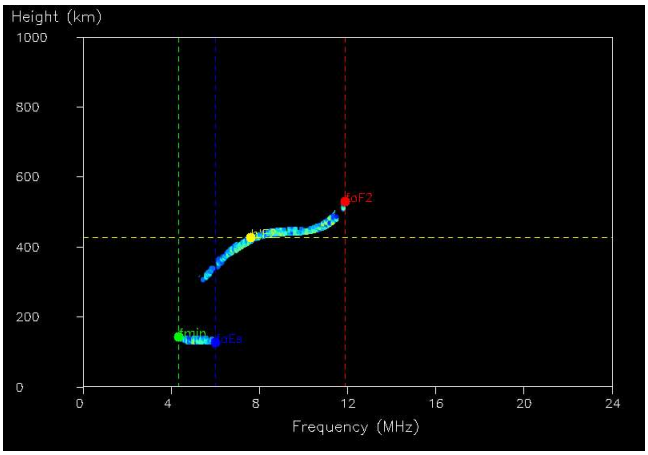
Tahap filtering dan pemisahan lapisan bertujuan untuk mengekstraksi informasi penting dari citra ionogram dengan menghilangkan noise dan memisahkan struktur berdasarkan karakteristiknya. Proses diawali dengan filter global yang diterapkan pada seluruh citra untuk memisahkan *trace* ionogram dari latar belakang menggunakan teknik thresholding. Selanjutnya dilakukan pemisahan lapisan Ionosfer berdasarkan ketinggian, yaitu lapisan E (≤ 200 km) dan lapisan F (> 200 km). Masing-masing lapisan kemudian diproses menggunakan teknik filtering yang sesuai untuk menghasilkan representasi kurva yang lebih jelas dan bersih. Citra hasil *filtering* dapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4.3. Citra Hasil *Filtering*

Hasil Ekstraksi Parameter

Tahap ekstraksi parameter dilakukan pada hasil *filtering* untuk memperoleh parameter ionosfer h'F2, foF2, fmin, dan foEs. Parameter ditentukan berdasarkan karakteristik *trace* ionosfer sehingga menghasilkan nilai parameter secara otomatis dari citra ionogram. Dapat dilihat pada gambar 4.4, Dimana tiap titik mewakili setiap parameter seperti titik merah(foF2), kuning (h'F2), hijau (fmin), dan biru (foEs).



Gambar 4.4 Citra Hasil Ekstraksi Parameter

Hasil Evaluasi

Evaluasi dilakukan terhadap parameter ionosfer fmin, foEs, h'F2, dan foF2 menggunakan 2495 citra ionogram sebagai data uji. Kinerja sistem dinilai menggunakan metrik *Detection Rate*, *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Relative Error* (RE). Sebelum evaluasi, dilakukan validasi data untuk menentukan jumlah data hasil *scaling* manual, *autoscaling*, dan data yang sesuai (*matched*) sebagai dasar perhitungan *Detection Rate*.

Tabel 4.1 Jumlah Data Per Parameter

Parameter	Data Manual	Data *Autoscaling*	Data *Matched*
Fmin	2440	2389	2336
foEs	682	600	503
h'F2	2478	2383	2374
foF2	2483	2382	2377

Hasil pengujian menunjukkan bahwa jumlah data yang berhasil dideteksi sistem *autoscaling* berbeda pada setiap parameter ionosfer. Parameter h'F2 memiliki jumlah *matched* tertinggi, sedangkan foEs memiliki jumlah *matched* terendah, sehingga menghasilkan nilai *Detection Rate* yang berbeda pada setiap parameter.

Selanjutnya, hasil evaluasi disajikan pada Tabel 4.2, dalam bentuk nilai *Detection Rate*, *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Relative Error* (RE) untuk menilai keberhasilan deteksi dan akurasi sistem terhadap hasil *scaling* manual.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian

Parameter	Pengujian			
	Detection Rate	MAE	RMSE	*Relative Error*
fmin	95,74%	0,42 Hz	0,70 Hz	15,16%
foEs	73,75%	0,41 Hz	0,90 Hz	6,57%
h'F2	95,80%	29,60 Km	44,41 Km	9,83%
foF2	95,73%	0,55 Hz	0,95 Hz	6,93%

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.2, sistem *autoscaling* menunjukkan performa yang cukup baik dalam menentukan parameter Ionosfer. Parameter h'F2 memiliki *Detection Rate* tertinggi sebesar 95,80%, sedangkan parameter foF2 dan fmin masing-masing memiliki nilai sebesar 95,73% dan 95,74%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi sebagian besar parameter dengan tingkat keberhasilan yang tinggi. Sementara itu, parameter

foEs memiliki *Detection Rate* sebesar 73,75%, yang menunjukkan bahwa lapisan *sporadic* E masih lebih sulit dideteksi dibandingkan parameter lainnya.

Nilai MAE dan RMSE pada parameter frekuensi seperti fmin, foEs, dan foF2 relatif kecil sehingga menunjukkan bahwa hasil *autoscaling* cukup mendekati hasil *scaling* manual. Pada parameter h'F2 diperoleh nilai MAE sebesar 29,60 km dan RMSE sebesar 44,41 km. Nilai tersebut lebih besar dibandingkan parameter lainnya karena parameter h'F2 menggunakan satuan kilometer. Selain itu, nilai *Relative Error* pada seluruh parameter masih berada di bawah 16%, yang menunjukkan bahwa sistem *autoscaling* memiliki tingkat akurasi yang cukup baik dan konsisten terhadap hasil *scaling* manual.

5. PENUTUP

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada pada pengembangan sistem pengolahan citra untuk deteksi *trace* dan ekstraksi parameter Ionosfer secara otomatis, serta hasil pengujian dan validasi terhadap metode *scaling* manual sebagai acuan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Penelitian ini berhasil mengimplementasikan algoritma pengolahan citra digital berbasis Python untuk melakukan deteksi jejak (*trace*) dan ekstraksi parameter Ionosfer secara otomatis dari citra ionogram CADI. Sistem yang dikembangkan mampu melakukan proses *autoscaling* secara sistematis melalui tahapan *preprocessing*, *filtering*, segmentasi, hingga ekstraksi parameter.
2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki performa yang cukup baik terhadap metode *scaling* manual. Parameter foF2 memiliki *Detection Rate* sebesar 95,73% dengan nilai MAE 0,55 Hz, RMSE 0,95 Hz, dan *Relative Error* 6,93%. Parameter h'F2 memiliki *Detection Rate* sebesar 95,80% dengan MAE 29,60 km, RMSE 44,41 km, dan *Relative Error* 9,83%. Parameter fmin menunjukkan *Detection Rate* sebesar 95,74% dengan MAE 0,42 Hz, RMSE 0,70 Hz, dan *Relative Error* 15,16%. Sementara itu, parameter foEs memiliki *Detection Rate* sebesar 73,75% dengan MAE 0,41 Hz, RMSE 0,90 Hz, dan *Relative Error* 6,57%.
3. Secara umum, sistem *autoscaling* yang dikembangkan mampu menghasilkan parameter Ionosfer yang mendekati hasil *scaling* manual, sehingga dapat digunakan sebagai alternatif awal dalam proses analisis ionogram CADI.

REFERENSI

[1] D. R. Themens, B. Reid, and S. Elvidge, "ARTIST Ionogram *Autoscaling* Confidence Scores: Best Practices," *URSI Radio Sci. Lett.*, vol. 4, pp. 1–5, 2022, doi: 10.46620/22-0001.

[2] C. De La Jara and C. Olivares, "Ionospheric Echo Detection in Digital Ionograms Using Convolutional Neural Networks," *Radio Sci.*, vol. 56, no. 8, 2021, doi: 10.1029/2020RS007258.

[3] G. H. Huang *et al.*, "The Development of Spatial Attention U-Net for the Recovery of Ionospheric Measurements and Extraction of Ionospheric Parameters," *Radio Sci.*, vol. 57, no. 8, pp. 1–17, 2022, doi: 10.1029/2022RS007471.

[4] M. Fagre *et al.*, "Algorithm for Automatic *Scaling* of the F-Layer Using Image Processing of Ionograms," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 59, no. 1, pp. 220–227, 2021, doi: 10.1109/TGRS.2020.2996405.

[5] J. Wang, L. Qiao, C. Yan, Z. Qiu, and K. Wang, "Trace Extraction and Repair of the F Layer from Pictorial Ionograms," Atmosphere (Basel)., vol. 15, no. 7, 2024, doi: 10.3390/atmos15070769.

[6] Z. Xiao, J. Wang, J. Li, B. Zhao, L. Hu, and L. Liu, "Deep-learning for ionogram automatic scaling," Adv. Sp. Res., vol. 66, no. 4, pp. 942–950, 2020.

[7] R. Sherstyukov, S. Moges, A. Kozlovsky, and T. Ulich, "A Deep Learning Approach for Automatic Ionogram Parameters Recognition With Convolutional Neural Networks," Earth Sp. Sci., vol. 11, no. 10, 2024, doi: 10.1029/2023EA003446.

[8] D. Bilitza, M. Pezzopane, V. Truhlik, D. Altadill, B. W. Reinisch, and A. Pignalberi, "The International Reference Ionosphere Model: A Review and Description of an Ionospheric Benchmark," Rev. Geophys., vol. 60, no. 4, 2022, doi: 10.1029/2022RG000792.
[9] M. C. Hsieh, G. H. Huang, A. V. Dmitriev, and C. H. Lin, "Deep Learning Application for Classification of Ionospheric Height Profiles Measured by Radio Occultation Technique," Remote Sens., vol. 14, no. 18, pp. 1–12, 2022, doi: 10.3390/rs14184521.