



Analisis Hubungan Parameter Angin Matahari Terhadap Sinyal Kontinu Antena Radio Tempoyak (Studi Kasus : Oktober 2025)

Muhamad Zacky Junanta
Muhamad.122290032@student.itera.ac.id
Program Studi Sains Atmosfer dan Keplanetan, Institut Teknologi
Sumatera, Lampung, Indonesia

Alka Budi Wahidin
alka.wahidin@sap.itera.ac.id
Program Studi Sains Atmosfer dan Keplanetan, Institut Teknologi
Sumatera, Lampung, Indonesia

Alfiah Rizky Diana Putri
alfiah.rizky@sap.itera.ac.id
Program Studi Sains Atmosfer dan Keplanetan, Institut Teknologi
Sumatera, Lampung, Indonesia

Annisa Novia Indra Putri
annisa.putri@sap.itera.ac.id
Program Studi Sains Atmosfer dan Keplanetan, Institut Teknologi
Sumatera, Lampung, Indonesia

Achmad Zainur Rozzykin
achmad.rozzykin@sap.itera.ac.id
Program Studi Sains Atmosfer dan Keplanetan, Institut Teknologi
Sumatera, Lampung, Indonesia

Artikel ini telah dipresentasikan pada kegiatan Seminar Nasional
Fisika (Sinafi 12.0)
Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia
08 Agustus 2026

Abstrak

Penelitian ini menganalisis hubungan antara parameter angin matahari dan indeks geomagnetik Dst terhadap variasi sinyal radio yang diterima antena Radio *Terrestrial and Extraterrestrial Monitoring Platform for Sky and Kosmos* (Tempoyak) di Institut Teknologi Sumatera pada periode Oktober 2025. Parameter angin matahari yang digunakan meliputi kecepatan angin matahari, komponen medan magnet antarplanet arah z (IMF Bz), dan kerapatan proton, sedangkan indeks Dst digunakan untuk merepresentasikan kondisi gangguan geomagnetik. Data parameter angin matahari dan Dst diperoleh dari NASA OMNIWeb dengan resolusi waktu satu jam, sedangkan data Radio Tempoyak diolah menjadi rata-rata per jam agar konsisten dengan resolusi data OMNI. Analisis dilakukan secara deskriptif melalui grafik deret waktu dan secara statistik menggunakan korelasi Spearman setelah detrending, koreksi autokorelasi menggunakan pendekatan *effective sample size* (Neff), dan koreksi perbandingan berganda menggunakan metode Benjamini–Hochberg. Pengamatan dilakukan pada enam hari dengan masing-masing 14 pasangan data per hari, sehingga total terdapat 84 pasangan data. Hasil menunjukkan bahwa sinyal Radio Tempoyak memiliki pola variasi diurnal yang relatif konsisten, dengan nilai maksimum umumnya terjadi pada pukul 12.00–14.00 WIB. Nilai koefisien korelasi Spearman antara sinyal Radio Tempoyak dan parameter cuaca antariksa berada pada rentang $-0,433$ hingga $0,749$. Korelasi terbesar diperoleh pada 26 Oktober 2025 antara sinyal Radio Tempoyak dan kerapatan proton dengan $r_s = 0,749$, tetapi setelah koreksi perbandingan berganda diperoleh $pFDR = 0,3533$ sehingga tidak signifikan pada $\alpha = 0,05$. Secara keseluruhan, tidak terdapat hubungan yang signifikan secara statistik dari 24 pengujian korelasi setelah koreksi autokorelasi dan Benjamini–Hochberg. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi sinyal Radio Tempoyak selama periode pengamatan belum dapat dikaitkan secara statistik secara konsisten dengan parameter angin matahari maupun indeks Dst. Pola diurnal, kondisi propagasi ionosfer, dan interferensi radio lokal kemungkinan turut memengaruhi variasi sinyal. Keterbatasan jumlah hari pengamatan dan belum dilakukannya pengendalian Radio Frequency Interference (RFI) menyebabkan hasil penelitian masih bersifat indikatif dan belum dapat digeneralisasi secara menyeluruh.

Keywords: Cuaca Antariksa · Radio Tempoyak · Itera · Ionosfer · Korelasi Spearman

PENDAHULUAN

Cuaca antariksa merupakan perubahan kondisi di lingkungan luar angkasa yang dipengaruhi oleh aktivitas Matahari, seperti *solar flare* dan *Coronal Mass Ejection* (CME), yang melepaskan radiasi elektromagnetik serta aliran partikel bermuatan yang dikenal sebagai angin Matahari (Pulkkinen, 2007). Karakteristik CME selama perambatannya menuju Bumi turut menentukan besarnya gangguan yang ditimbulkan terhadap lingkungan antariksa (Liu et al., 2021). Ketika mencapai Bumi, angin Matahari berinteraksi dengan magnetosfer dan dapat memicu badai geomagnetik yang berdampak pada berbagai sistem teknologi, seperti satelit, jaringan listrik, sistem navigasi, dan komunikasi radio (Martiningrum et al., 2012).

Karakteristik angin Matahari umumnya direpresentasikan oleh beberapa parameter utama, yaitu kecepatan angin Matahari (V), komponen medan magnet antarplanet arah z (IMF B_z), dan rapat proton (n) (Gonzalez et al., 1999). Kecepatan angin Matahari menentukan besarnya energi kinetik plasma yang dibawa menuju Bumi, sedangkan orientasi IMF B_z ke arah selatan meningkatkan efisiensi *magnetic reconnection* sehingga transfer energi ke magnetosfer menjadi lebih besar. Daya badai geomagnetik umumnya diukur menggunakan *Disturbance Storm Time* (Dst), yaitu indeks geomagnetik global dalam satuan nanotesla (nT) yang dihitung berdasarkan deviasi komponen horizontal medan magnet Bumi pada observatorium lintang rendah (Sugiura & Kamei, 1991). Nilai Dst yang semakin negatif menunjukkan badai geomagnetik yang semakin kuat akibat penguatan *ring current* di magnetosfer (NOAA National Centers for Environmental Information, 2023). Selain Dst, tingkat aktivitas geomagnetik juga umum diklasifikasikan menggunakan indeks K_p (Matzka et al., 2021).

Pengaruh aktivitas Matahari terhadap ionosfer terlihat jelas pada badai geomagnetik ekstrem tanggal 10–11 Mei 2024. Tulasi Ram et al., (2024) melaporkan bahwa badai tersebut memiliki nilai Sym-H di bawah -500 nT dan menyebabkan peningkatan *Total Electron Content* (TEC) ionosfer lebih dari 100% pada sisi siang Bumi. Perubahan kondisi ionosfer tersebut berdampak pada penurunan performa sistem *Global Positioning System* (GPS) dan komunikasi radio *High Frequency* (HF). Hasil tersebut menunjukkan bahwa dinamika cuaca antariksa dapat memengaruhi propagasi gelombang radio melalui perubahan karakteristik ionosfer.

Salah satu instrumen yang dapat dimanfaatkan untuk memantau perubahan propagasi gelombang radio HF adalah Radio Terrestrial and Extraterrestrial Monitoring Platform for Sky and Kosmos (Tempoyak) yang dioperasikan oleh Observatorium Astronomi ITERA (Observatorium Astronomi ITERA Lampung, 2024). Radio Tempoyak merupakan teleskop radio berbasis konsep Radio JOVE NASA yang bekerja pada rentang frekuensi HF 16–24 MHz dengan frekuensi operasional utama 20,110 MHz (NASA, 2024). Selain digunakan untuk pengamatan emisi radio Matahari, termasuk kejadian *solar radio burst*, instrumen ini juga berpotensi dimanfaatkan untuk mengamati variasi daya sinyal radio yang dipengaruhi oleh perubahan kondisi ionosfer (Om et al., 2021).

Berbagai penelitian telah memanfaatkan instrumen Radio JOVE untuk mengkaji pengaruh aktivitas Matahari terhadap sinyal radio. Abood dan Ebadi (2013) menganalisis hubungan aktivitas *sunspot* terhadap kualitas sinyal radio, sedangkan Agasha et al., (2020) mendeteksi gangguan ionosfer akibat *solar flare* melalui perubahan daya sinyal radio. Di Indonesia, Ramdhani (2025) berhasil mengembangkan teleskop radio berbasis Radio JOVE di Observatorium Astronomi ITERA yang mampu mendeteksi kejadian *solar radio burst* pada frekuensi 20,1 MHz. Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut masih berfokus pada deteksi fenomena Matahari atau gangguan ionosfer, sedangkan kajian yang menghubungkan parameter angin Matahari dan indeks Dst terhadap variasi daya sinyal Radio Tempoyak menggunakan data observasi lokal di wilayah ekuator masih sangat terbatas. Padahal, karakteristik ionosfer ekuator berbeda dengan lintang menengah sehingga pengamatan lokal diperlukan untuk meningkatkan pemahaman mengenai respons ionosfer terhadap dinamika cuaca antariksa.

Secara fisis, perubahan kondisi angin Matahari dapat memengaruhi sinyal radio frekuensi tinggi (HF) melalui rangkaian interaksi antara angin Matahari, magnetosfer, dan ionosfer. Ketika komponen medan magnet antarplanet (IMF B_z) menjadi semakin berarah ke selatan atau bernilai semakin negatif, rekoneksi magnetik pada sisi siang magnetosfer dapat menjadi lebih efektif sehingga meningkatkan transfer energi dan momentum dari angin Matahari ke magnetosfer. Peningkatan kopling magnetosfer

tersebut dapat mendorong peningkatan arus cincin (ring current) yang tercermin dalam penurunan indeks Disturbance Storm Time (Dst). Perubahan kondisi geomagnetik selanjutnya dapat memicu perubahan pada ionosfer, baik pada fase awal maupun fase utama badai ionosfer, yang dapat berupa peningkatan atau penurunan kerapatan elektron (Gonzalez et al., 1999; Lakhina & Tsurutani., 2016; Fejer et al., 2024; Tulasi Ram et al., 2024).

Perubahan kerapatan elektron ionosfer tersebut dapat memengaruhi karakteristik lapisan F, khususnya frekuensi kritis lapisan F2 (f_oF_2), serta *maximum usable frequency* (MUF) yang menentukan kemampuan ionosfer dalam memantulkan gelombang HF. Selain itu, perubahan kondisi ionosfer bagian bawah, terutama lapisan D, dapat mengubah tingkat absorpsi gelombang radio. Dengan demikian, perubahan f_oF_2 , MUF, dan absorpsi lapisan D secara teoritis dapat memengaruhi intensitas sinyal HF yang sampai pada antenna penerima (International Telecommunication Union, 1998; Kelley, 1989). Pada penelitian ini, Radio Tempoyak mengamati sinyal pada frekuensi 20,110 MHz, sehingga perubahan kondisi propagasi ionosfer tersebut secara potensial dapat tercermin sebagai variasi daya sinyal yang diterima pada frekuensi tersebut.

Namun demikian, penelitian ini tidak mengukur f_oF_2 , MUF, kerapatan elektron, maupun absorpsi lapisan D secara langsung. Oleh karena itu, parameter angin Matahari dan indeks Dst dalam penelitian ini digunakan sebagai indikator kondisi lingkungan ruang dekat Bumi yang secara teoritis dapat berkaitan dengan perubahan propagasi HF, sedangkan variasi daya sinyal Radio Tempoyak diperlakukan sebagai variabel observasi. Hubungan statistik yang diperoleh tidak dimaksudkan untuk membuktikan hubungan kausal secara langsung, tetapi untuk menguji apakah terdapat keterkaitan antara kondisi angin Matahari dan geomagnetik dengan variasi sinyal Radio Tempoyak pada periode pengamatan.

METODE

Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan data observasi selama periode Oktober 2025 yang dipilih berdasarkan indeks Kp untuk merepresentasikan kondisi aktivitas geomagnetik tinggi, sedang, dan rendah, dengan mempertimbangkan ketersediaan data observasi Radio Tempoyak. Tanggal yang terpilih meliputi 12 dan 13 Oktober 2025 (aktivitas geomagnetik tinggi), 21 dan 25 Oktober 2025 (aktivitas geomagnetik sedang), serta 16 dan 26 Oktober 2025 (aktivitas geomagnetik rendah). Data yang digunakan terdiri atas tiga jenis: 1. Parameter angin Matahari meliputi kecepatan angin Matahari (V), komponen medan magnet antarplanet arah z (IMF Bz), dan rapat proton (n). 2. *Indeks Disturbance Storm Time* (Dst). 3. Data sinyal Radio Tempoyak diperoleh dari Observatorium Astronomi ITERA yang direkam dengan resolusi temporal awal 0,1 detik dalam format *.sps*. Sistem penerimaan Radio Tempoyak terdiri atas dua antenna dipol dengan panjang masing-masing 7 m yang disusun secara paralel dan digunakan sebagai satu kesatuan array. Antena berorientasi timur–barat (E–W) dan memiliki pola radiasi yang diarahkan ke arah zenit. Sinyal diterima menggunakan perangkat Software Defined Radio (SDR) SDRPlay RSP1B dengan rentang frekuensi pengamatan 16–24 MHz. Pada penelitian ini, analisis difokuskan pada frekuensi 20,110 MHz. Konfigurasi dua antenna yang digunakan sebagai satu array, orientasi E–W, dan pola penerimaan ke arah zenit menjadi karakteristik geometris utama sistem pengamatan yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi daya sinyal yang diterima. Tinggi pemasangan antenna, bandwidth efektif antenna dan sistem penerimaan pada konfigurasi pengamatan, serta nilai gain antenna tidak tersedia dalam dokumentasi instrumen yang digunakan. Oleh karena itu, parameter tersebut tidak diasumsikan atau diestimasi dalam penelitian ini. Keterbatasan informasi tersebut perlu diperhatikan karena karakteristik antenna dan sistem penerima dapat memengaruhi sensitivitas serta respons daya sinyal yang terekam.

Pengolahan data

Data Radio Tempoyak terlebih dahulu divisualisasikan menggunakan perangkat lunak Radio-Sky Spectrograph, kemudian dikonversi ke format *.csv* untuk diambil data pada kanal frekuensi 20,110 MHz. Untuk menyamakan durasi rentang pengamatan antahari, dilakukan pemotongan data pada rentang pukul 10.00–23.59 WIB. Selanjutnya, data beresolusi 0,1 detik dirata-ratakan menjadi resolusi 1 jam

(hourly average) agar konsisten dengan resolusi temporal data NASA OMNIWeb. Daya sinyal kemudian dikonversi ke dalam satuan desibel (dB) menggunakan Persamaan (1):

$$dB = 10 \log_{10}(p) \quad (1)$$

dengan p merupakan nilai daya (power) sinyal radio. Seluruh data diselaraskan berdasarkan stempel waktu (timestamp) sebelum dilakukan analisis statistik. Pada penelitian ini, pembersihan terhadap Radio Frequency Interference (RFI) lokal tidak dilakukan.

Analisis data

Analisis data dilakukan menggunakan statistik deskriptif dan korelasi Rank Spearman. Statistik deskriptif digunakan untuk menggambarkan karakteristik data melalui visualisasi deret waktu (time series) serta perhitungan nilai rata-rata (mean), median, maksimum, minimum, dan simpangan baku (standard deviation). Korelasi Rank Spearman digunakan untuk mengevaluasi arah dan kekuatan hubungan monotonik antara daya sinyal Radio Tempoyak dengan parameter angin Matahari, yaitu kecepatan angin Matahari (V), komponen medan magnet antarplanet arah z (IMF Bz), dan rapat proton (n), serta indeks geomagnetik Dst. Koefisien korelasi (rs) dihitung menggunakan Persamaan (2) serta tingkat hubungan diinterpretasikan berdasarkan kategori pada Tabel 1:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (2)$$

Tabel 1. Koefisien Korelasi Spearman

Interval Koefisien	Tingkat Hubungan
0,000 – 0,199	Sangat Rendah
0,200 – 0,399	Rendah
0,400 – 0,599	Sedang
0,600 – 0,799	Kuat
0,800 – 1,000	Sangat Kuat

Sebelum pengujian korelasi, masing-masing deret waktu dilakukan detrending linier untuk mengurangi pengaruh kecenderungan linier (trend) terhadap hubungan antarvariabel. Koefisien korelasi Spearman (rs) kemudian dihitung menggunakan data hasil detrending. Nilai rs berada pada rentang -1 hingga 1, dengan tanda koefisien menunjukkan arah hubungan dan nilai absolut koefisien menunjukkan kekuatan hubungan.

Data yang digunakan dalam analisis korelasi memiliki resolusi waktu satu jam, dengan 14 pasangan data untuk setiap hari pengamatan. Karena data berbentuk deret waktu, setiap pengamatan tidak dapat dianggap sepenuhnya independen akibat adanya kemungkinan autokorelasi temporal. Oleh karena itu, signifikansi korelasi dikoreksi dengan memperhitungkan autokorelasi pada kedua deret waktu melalui pendekatan effective sample size (Neff). Pendekatan ini digunakan untuk menyesuaikan jumlah derajat kebebasan efektif akibat ketergantungan antarwaktu (Pyper & Peterman, 1998).

Nilai Neff dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$N_{eff} = \frac{N}{1 + 2 \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{N}{5} \rfloor} \left(\frac{N-k}{N} \right) \rho_{x(k)} \rho_{y(k)}} \quad (3)$$

dengan N merupakan jumlah pasangan data, k merupakan lag waktu, serta $\rho_x(k)$ dan $\rho_y(k)$ masing-masing merupakan koefisien autokorelasi deret waktu sinyal Radio Tempoyak dan parameter angin Matahari pada lag ke-k. Autokorelasi diperhitungkan hingga lag N/5. Nilai Neff selanjutnya digunakan

untuk menentukan derajat kebebasan efektif dalam perhitungan nilai p, sehingga signifikansi statistik mempertimbangkan ketergantungan temporal pada data (Pyper & Pterman, 1998)..

Nilai p yang telah dikoreksi berdasarkan Neff dihitung menggunakan statistik t dengan persamaan:

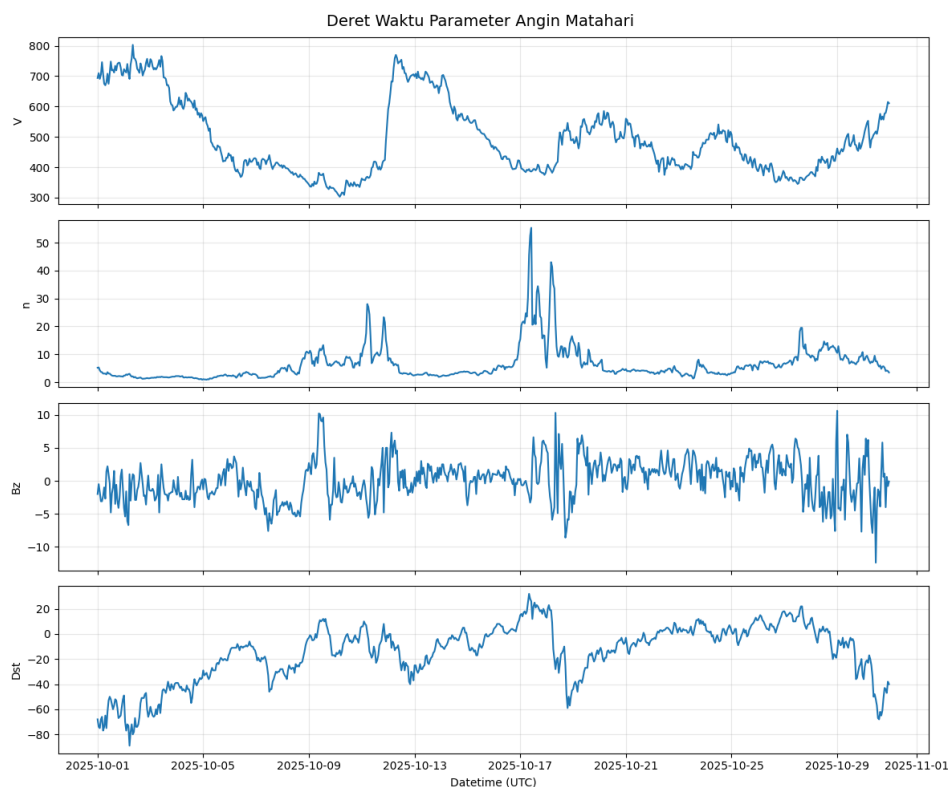
$$t = r_s \left(\frac{N_{eff}-2}{1-r_s^2} \right) \quad (4)$$

dengan derajat kebebasan sebesar $N_{eff} - 2$. Koreksi ini dilakukan terhadap nilai p tanpa mengubah nilai koefisien korelasi r_s . Selanjutnya, karena terdapat 24 pengujian statistik yang dilakukan, yaitu empat parameter (V, n, IMF Bz, dan Dst) pada enam hari pengamatan, dilakukan koreksi perbandingan berganda menggunakan metode Benjamini–Hochberg untuk mengendalikan false discovery rate (FDR) (Benjamini & Hochberg, 1995). Hubungan dinyatakan signifikan secara statistik apabila nilai p setelah koreksi FDR (pFDR) lebih kecil dari $\alpha = 0,05$. Hasil analisis korelasi disajikan dalam bentuk nilai r_s dan pFDR, sedangkan jumlah pasangan data (N), effective sample size (Neff), dan nilai p setelah koreksi autokorelasi digunakan dalam proses penentuan signifikansi statistik. Seluruh analisis data diolah menggunakan bahasa pemrograman Python pada platform Google Colab.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang digunakan terdiri atas data sinyal Radio Tempoyak pada frekuensi 20,110 MHz dan parameter cuaca antariksa dari NASA OMNIWeb selama enam hari pengamatan pada Oktober 2025. Keenam tanggal dipilih untuk mewakili kondisi aktivitas geomagnetik tinggi (12 dan 13 Oktober), sedang (21 dan 25 Oktober), serta rendah (16 dan 26 Oktober) berdasarkan klasifikasi indeks Kp dan ketersediaan data. Seluruh data Tempoyak diseragamkan pada rentang waktu pukul 10.00–23.59 WIB (± 504.000 titik data per hari) agar durasi observasi konsisten dan dapat dibandingkan secara langsung.

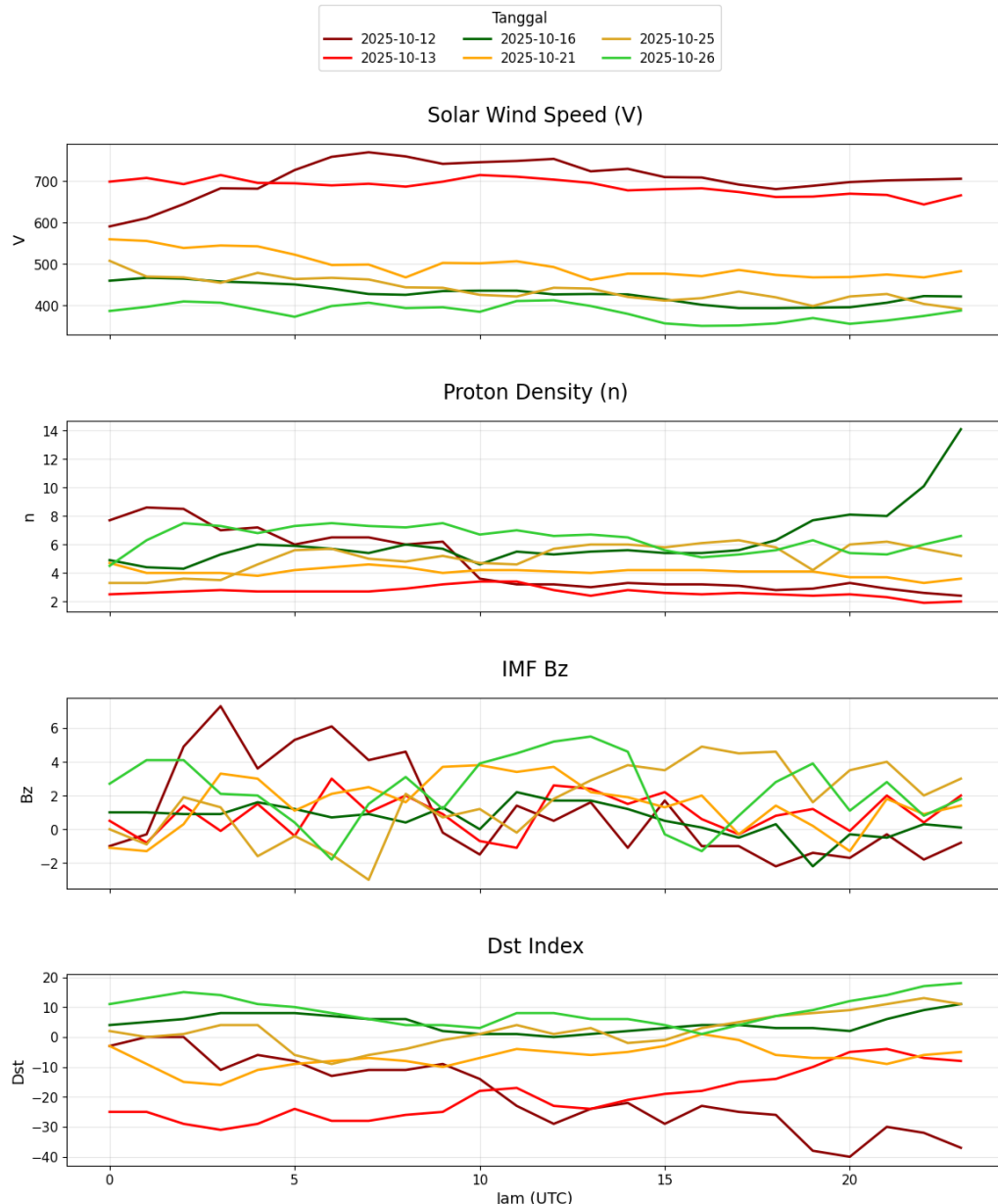
Karakteristik data parameter angin Matahari



Gambar 1. Time Series Angin Matahari Oktober 2025

Gambar 1 menunjukkan variasi parameter cuaca antariksa selama Oktober 2025. Secara umum, aktivitas Matahari pada periode tersebut bersifat dinamis yang ditandai oleh perubahan kecepatan angin Matahari (V), kerapatan proton (n), komponen medan magnet antarplanet arah z (IMF B_z), dan indeks Dst. Peningkatan kecepatan angin Matahari pada awal hingga pertengahan Oktober diikuti oleh kenaikan kerapatan proton dan penurunan nilai Dst hingga sekitar -80 nT, yang mengindikasikan terjadinya badai geomagnetik tingkat sedang. Selain itu, peningkatan kecepatan angin Matahari secara bertahap pada 11–14 Oktober menunjukkan karakteristik yang konsisten dengan Coronal Hole High-Speed Stream (CH HSS). Menurut NOAA/NWS Space Weather Prediction Center (2017), CH HSS dicirikan oleh peningkatan kecepatan angin Matahari secara bertahap yang didahului oleh kenaikan kerapatan proton akibat daerah kompresi (*compression region*). Berdasarkan variasi parameter tersebut, dipilih enam hari pengamatan yang mewakili kondisi aktivitas Matahari tinggi (12 dan 13 Oktober), sedang (21 dan 25 Oktober), serta rendah (16 dan 26 Oktober) untuk dianalisis lebih lanjut.

Deret Waktu Parameter Angin Matahari
6 Hari Pengamatan (Oktober 2025)



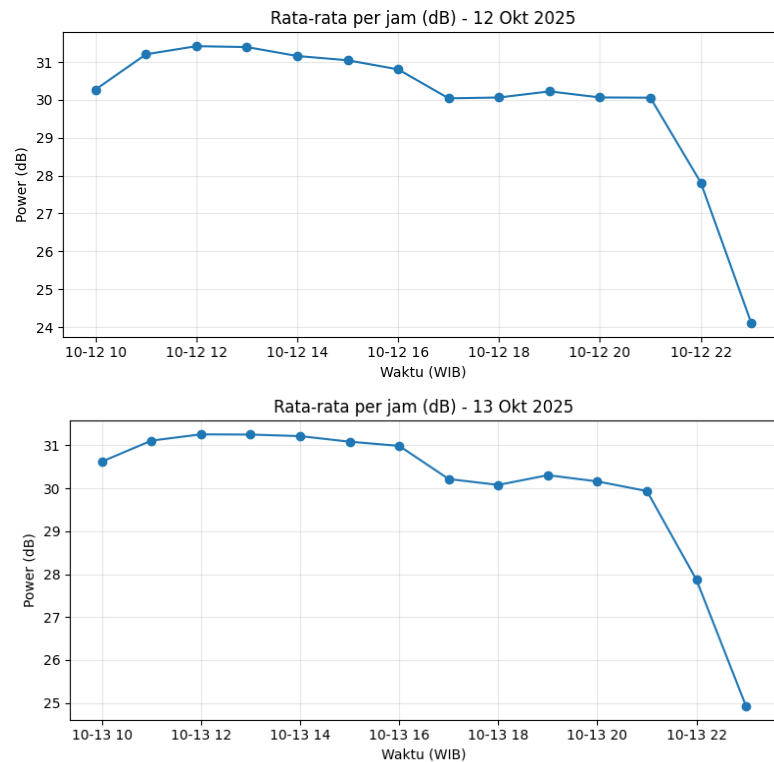
Gambar 2. Time Series Parameter Angin Matahari Pada Rentang Waktu Yang Berbeda

Tabel 2. Statistika Angin Matahari 6 Hari Pengamatan

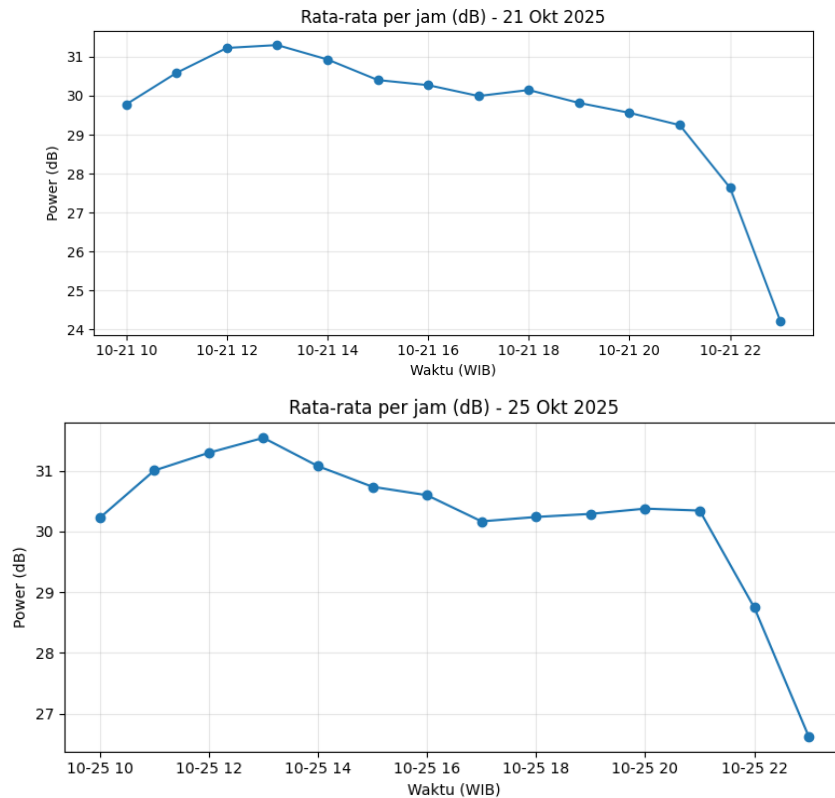
Tanggal	Parameter	Mean	Median	Max	Min	Std
2025-10-12	V	731,79	736,00	770,0	682,0	27,78
	n	4,86	4,80	7,2	3,0	1,72
	Bz	2,31	1,65	7,3	-1,5	2,86
	Dst	-16,64	-13,50	-6,0	-29,0	8,00
2025-10-13	V	696,00	695,50	715,0	678,0	11,96
	n	2,83	2,75	3,4	2,4	0,30
	Bz	1,10	1,25	3,0	-1,1	1,30
	Dst	-23,64	-24,00	-17,0	-31,0	4,52
2025-10-16	V	433,21	431,50	458,0	402,0	15,13
	n	5,52	5,50	6,0	4,6	0,36
	Bz	1,03	1,05	2,2	0,0	0,65
	Dst	4,07	3,50	8,0	0,0	3,00
2025-10-21	V	497,71	498,50	545,0	462,0	26,04
	n	4,18	4,20	4,6	3,8	0,20
	Bz	2,54	2,35	3,8	1,1	0,93
	Dst	-7,00	-7,00	1,0	-16,0	4,02
2025-10-25	V	442,71	443,00	479,0	412,0	20,87
	n	5,24	5,40	6,1	3,5	0,74
	Bz	1,11	1,25	4,9	-3,0	2,27
	Dst	-0,64	0,00	4,0	-9,0	4,27
2025-10-26	V	390,14	395,00	413,0	351,0	19,19
	n	6,79	6,90	7,5	5,1	0,70
	Bz	2,19	2,05	5,5	-1,8	2,38
	Dst	6,64	6,00	14,0	1,0	3,48

Berdasarkan Gambar 2 dan Tabel 2, kecepatan angin Matahari relatif stabil pada setiap hari pengamatan dengan kisaran sekitar $400\text{--}750\text{ km s}^{-1}$. Nilai rata-rata tertinggi diperoleh pada tanggal 12 dan 13 Oktober, sedangkan tanggal 21, 25, dan 26 Oktober menunjukkan kecepatan yang lebih rendah. Kondisi tersebut menunjukkan karakteristik yang konsisten dengan pola CH-HSS yang teramati pada periode tersebut. Rapat proton umumnya berada pada kondisi rendah hingga sedang. Namun, peningkatan rapat proton mulai terlihat pada akhir pengamatan tanggal 16 Oktober sebagai indikasi awal terbentuknya daerah kompresi plasma sebelum kejadian peningkatan aktivitas pada 17–19 Oktober. Sementara itu, komponen IMF Bz merupakan parameter yang paling berfluktuasi selama pengamatan, dengan perubahan orientasi dari positif ke negatif terutama pada tanggal 12 Oktober. Orientasi IMF Bz ke arah selatan meningkatkan efisiensi proses rekoneksi magnetik sehingga transfer energi dari angin Matahari menuju magnetosfer menjadi lebih besar, yang kemudian diikuti penurunan indeks Dst (Gonzalez et al., 1999; Lakhina & Tsurutani, 2016). Nilai Dst pada sebagian besar waktu berada pada kondisi tenang hingga gangguan geomagnetik lemah, dengan kisaran sekitar 0 hingga -40 nT . Gangguan geomagnetik paling jelas terjadi pada tanggal 12 dan 13 Oktober ketika nilai Dst turun hingga sekitar -40 nT , sedangkan tanggal 26 Oktober menunjukkan kondisi geomagnetik paling tenang dengan nilai Dst mendekati nol. Secara keseluruhan, parameter angin Matahari berhasil menggambarkan variasi kondisi cuaca antariksa mulai dari aktivitas tinggi hingga rendah yang kemudian digunakan sebagai dasar analisis terhadap variasi sinyal Radio Tempoyak.

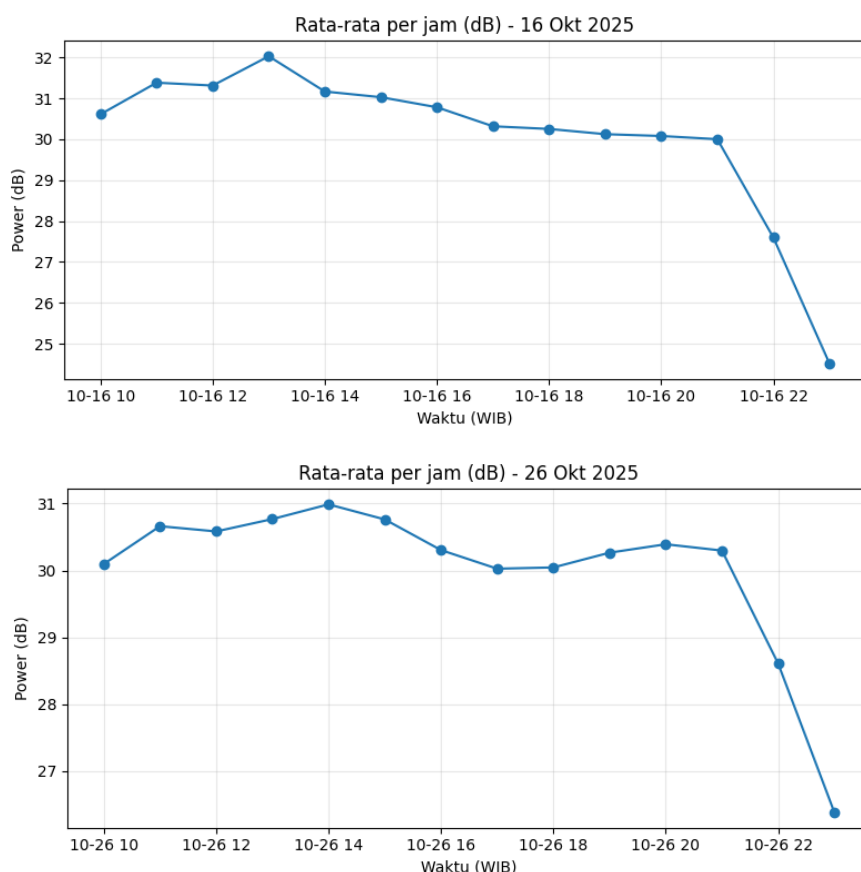
Karakteristik Data Radio Tempoyak



Gambar 3. Time Series Data Tempoyak Saat Aktivitas Matahari Tinggi



Gambar 4. Time Series Data Tempoyak Saat Aktivitas Matahari Sedang



Gambar 5. Time Series Data Tempoyak Saat Aktivitas Matahari Rendah

Berdasarkan Gambar 3 hingga Gambar 5, daya sinyal Radio Tempoyak pada seluruh kategori aktivitas Matahari menunjukkan pola variasi harian (diurnal) yang relatif serupa. Daya sinyal mulai meningkat sejak sekitar pukul 10.00 WIB, mencapai nilai maksimum pada kisaran pukul 12.00–14.00 WIB, kemudian menurun secara bertahap hingga malam hari. Kesamaan pola tersebut mengindikasikan bahwa variasi diurnal merupakan salah satu faktor utama yang mungkin memengaruhi perubahan sinyal selama periode pengamatan. Pola ini secara fisik dapat berkaitan dengan perubahan kondisi ionosfer akibat siklus penyinaran Matahari, selain kemungkinan pengaruh faktor instrumental dan lingkungan lokal. Pola tersebut sesuai dengan karakteristik propagasi gelombang radio HF di ionosfer. Pada siang hari, peningkatan radiasi Matahari meningkatkan proses ionisasi dan mengubah kerapatan elektron serta karakteristik propagasi gelombang HF. Perubahan tersebut dapat memengaruhi intensitas sinyal yang diterima, bergantung pada kondisi lapisan ionosfer dan frekuensi pengamatan. Ketika Matahari mulai terbenam, proses ionisasi berkurang dan rekombinasi elektron-ion mulai mendominasi. Namun, karena rekombinasi di lapisan F berlangsung relatif lambat akibat rendahnya kerapatan atmosfer dan dominasi ion oksigen (O^+), penurunan daya sinyal tidak terjadi secara tiba-tiba, melainkan berlangsung secara bertahap hingga malam hari (International Telecommunication Union, 1998; Kelley, 1989).

Meskipun pola diurnal pada ketiga grafik tampak hampir sama, terdapat perbedaan kecil pada nilai puncak maupun laju penurunan sinyal antahari yang diduga dipengaruhi kondisi geomagnetik dan *noise* lokal. Selain itu, pada seluruh hari pengamatan terlihat penurunan daya sinyal yang cukup tajam menjelang pukul 23.00 WIB (16.00 UTC). Pola tersebut muncul secara konsisten pada semua tanggal sehingga diduga bukan merupakan akibat langsung dari perubahan kondisi ionosfer maupun aktivitas Matahari. Hingga penelitian ini dilakukan, penyebab fenomena tersebut belum dapat dipastikan dan masih memerlukan kajian lebih lanjut. Kemungkinan faktor penyebab meliputi gangguan lokal pada

sistem observasi, interferensi radio (*Radio Frequency Interference*), maupun perubahan kondisi propagasi yang tidak tercakup dalam penelitian ini.

Korelasi Spearman

Analisis korelasi Spearman dilakukan untuk mengetahui hubungan antara daya sinyal Radio Tempoyak dengan parameter cuaca antariksa, yaitu kecepatan angin Matahari (V), rapat proton (n), komponen medan magnet antarplanet arah z (IMF Bz), dan indeks Dst. Metode Spearman dipilih karena mampu mengukur hubungan monoton antarvariabel tanpa mensyaratkan data berdistribusi normal maupun memiliki hubungan linear.

Tabel 3. Korelasi Spearman Parameter Angin Matahari terhadap Sinyal Tempoyak

Tanggal	V	n	Bz	Dst
12 Oktober 2025	0,481; 0,630	-0,191; 0,815	-0,200; 0,799	-0,002; 0,995
13 Oktober 2025	-0,015; 0,995	0,402; 0,630	0,314; 0,630	-0,341; 0,635
16 Oktober 2025	0,310; 0,635	0,116; 0,925	0,345; 0,630	-0,253; 0,670
21 Oktober 2025	-0,103; 0,925	0,191; 0,799	-0,037; 0,982	-0,073; 0,934
25 Oktober 2025	0,363; 0,630	0,499; 0,630	-0,349; 0,630	-0,433; 0,630
26 Oktober 2025	0,635; 0,536	0,749; 0,353	0,688; 0,487	0,090; 0,934

Keterangan : Setiap sel menunjukkan nilai r_s ; p_{FDR} . Nilai p_{FDR} merupakan nilai p setelah koreksi perbandingan berganda menggunakan metode Benjamini-Hochberg. Taraf signifikansi yang digunakan = 0,05.

Berdasarkan Tabel 3, tidak terdapat satu parameter cuaca antariksa yang menunjukkan hubungan yang konsisten terhadap variasi sinyal Radio Tempoyak pada seluruh hari pengamatan. Nilai koefisien korelasi Spearman (r_s) hasil analisis terkoreksi berada pada rentang -0,433 hingga 0,749. Arah dan kekuatan korelasi berbeda antarhari maupun antarparameter, sehingga hubungan antara sinyal Radio Tempoyak dengan kecepatan angin Matahari (V), rapat proton (n), komponen medan magnet antarplanet arah z (Bz), dan indeks Dst belum menunjukkan pola yang konsisten selama periode pengamatan. Korelasi positif relatif kuat diperoleh pada 26 Oktober 2025 antara sinyal Radio Tempoyak dengan rapat proton (n) dan Bz, masing-masing dengan $r_s = 0,749$ dan $r_s = 0,688$. Setelah koreksi terhadap autokorelasi, nilai p masing-masing sebesar 0,0147 dan 0,0406. Namun, karena penelitian ini melibatkan 24 pengujian korelasi, dilakukan koreksi perbandingan berganda menggunakan metode Benjamini-Hochberg. Setelah koreksi tersebut, nilai p_{FDR} untuk hubungan dengan n dan Bz masing-masing menjadi 0,3533 dan 0,4873, sehingga keduanya tidak signifikan secara statistik pada taraf $\alpha = 0,05$. Secara keseluruhan, seluruh 24 pengujian tidak menunjukkan hubungan yang signifikan setelah dilakukan koreksi autokorelasi dan perbandingan berganda. Selain pengaruh cuaca antariksa, variasi sinyal Radio Tempoyak juga dapat dipengaruhi oleh dinamika ionosfer harian, kondisi propagasi gelombang radio HF, dan interferensi radio lokal (*Radio Frequency Interference/RFI*). Pola diurnal yang relatif seragam pada hari-hari pengamatan menunjukkan bahwa variasi harian merupakan salah satu faktor yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi korelasi. Jumlah pengamatan yang terbatas pada enam hari juga menyebabkan hasil korelasi lebih merepresentasikan kondisi pada periode tersebut dan belum dapat menggambarkan karakteristik hubungan dalam jangka panjang. Selain itu, penelitian ini hanya menganalisis hubungan pada waktu yang sama (zero time lag), sehingga kemungkinan adanya jeda waktu (time lag) antara perubahan parameter angin Matahari dan respons sinyal Radio Tempoyak belum dievaluasi. Dengan demikian, meskipun beberapa hari menunjukkan nilai korelasi yang relatif kuat, hasil penelitian belum memberikan bukti statistik yang cukup untuk menyatakan adanya hubungan yang konsisten antara parameter cuaca antariksa dan sinyal Radio Tempoyak selama periode pengamatan.

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa selama periode pengamatan Oktober 2025, sinyal Radio Tempoyak pada frekuensi 20,110 MHz memiliki pola variasi diurnal yang relatif konsisten, dengan nilai maksimum umumnya terjadi pada pukul 12.00–14.00 WIB. Pola tersebut menunjukkan bahwa variasi harian merupakan salah satu faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi perubahan sinyal Radio Tempoyak. Analisis korelasi dilakukan pada enam hari pengamatan dengan masing-masing 14 pasangan data per hari, sehingga diperoleh total 84 pasangan data. Setelah dilakukan detrending, koreksi autokorelasi menggunakan pendekatan effective sample size (Neff), serta koreksi perbandingan berganda menggunakan metode Benjamini–Hochberg terhadap 24 pengujian, diperoleh nilai koefisien korelasi Spearman (r_s) antara $-0,433$ hingga $0,749$. Korelasi relatif kuat ditemukan pada 26 Oktober 2025 untuk rapat proton (n) dengan $r_s = 0,749$ dan IMF Bz dengan $r_s = 0,688$, tetapi keduanya tidak signifikan setelah koreksi FDR. Secara keseluruhan, tidak terdapat hubungan yang signifikan secara statistik antara parameter angin Matahari, indeks Dst, dan sinyal Radio Tempoyak selama periode pengamatan. Keterbatasan penelitian meliputi periode pengamatan yang hanya mencakup enam hari, belum dilakukannya identifikasi dan pengurangan Radio Frequency Interference (RFI), belum tersedianya pengukuran parameter ionosfer secara simultan, serta analisis yang masih terbatas pada hubungan tanpa mempertimbangkan time lag. Kondisi tersebut menyebabkan pengaruh cuaca antariksa terhadap variasi sinyal belum dapat dipisahkan secara kuantitatif dari pengaruh variasi diurnal, kondisi propagasi, dan gangguan lokal. Berdasarkan hasil penelitian, Radio Tempoyak berpotensi digunakan sebagai instrumen pendukung untuk pengamatan indikatif variasi sinyal radio yang berkaitan dengan kondisi cuaca antariksa di wilayah ekuator. Namun, berdasarkan data dan metode yang digunakan dalam penelitian ini, Radio Tempoyak belum dapat dinyatakan sebagai instrumen observasi cuaca antariksa kuantitatif secara mandiri. Pengujian lebih lanjut dengan periode observasi yang lebih panjang, pengendalian RFI, pengamatan parameter ionosfer secara simultan, dan analisis time lag diperlukan untuk menilai hubungan tersebut secara lebih kuat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abood, K. M., & Ebadi, N. M. (2013). Determination sky radio emission background using radio JOVE telescope. *Journal of College of Education for Women*, 24(2), 562–571.
- Agasha, A., Zheng, A., Athreya, S., & Tan, H. T. (2020). Investigation of the Sudden Solar Ionospheric Disturbance using Radio Telescope. *EPJ Web of Conferences*, 240, 1–9.
- Gonzalez, W. D., Tsurutani, B. T., & Clua de Gonzalez, A. L. (1999). Interplanetary Origin of Geomagnetic Storms. *Space Science Reviews*, 88(3), 529–562.
- International Telecommunication Union. (1998). *The Ionosphere and its Effects on Radiowave Propagation*. International Telecommunication Union. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-32-1998-PDF-E.pdf
- Kelley, M. C. (1989). *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*. Academic Press.
- Lakhina, G. S., & Tsurutani, B. T. (2016). Geomagnetic storms: Historical perspective to modern view. *Geoscience Letters*, 3(5), 1–11.
- Martiningrum, D. R., Purwono, A., Nuraeni, F., & Muhamad, J. (2012). *Fenomena Cuaca Antariksa: Edisi Revisi*. Pusat Sains Antariksa (Pussainsa), Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN).
- Matzka, J., Stolle, C., Yamazaki, Y., Bronkalla, O., & Morschhauser, A. (2021). The Geomagnetic Kp Index and Derived Indices of Geomagnetic Activity. *Space Weather*, 19(5), 1–21.
- NASA. (2024). *Radio JOVE Project*. <https://radiojove.gsfc.nasa.gov>

- NOAA National Centers for Environmental Information. (2023). *Geomagnetic Indices: Dst*. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/indices/dst.html>
- NOAA/NWS Space Weather Prediction Center. (2017). *Coronal Hole High Speed Streams (CH HSS)*. <https://www.swpc.noaa.gov/news/coronal-hole-high-speed-streams-ch-hss>
- Observatorium Astronomi ITERA Lampung. (2024). *Radio Tempoyak*. <https://sites.google.com/itera.ac.id/observatorium-itera/fasilitas/radio-tempoyak>
- Ramdhani, A. H. (2025). *Pengembangan Teleskop Radio Jove untuk Pengamatan Aktivitas Matahari di ITERA* [Skripsi, Program Studi Sains Atmosfer dan Keplanetan, Institut Teknologi Sumatera]. <https://repo.itera.ac.id/depan/submission/SB2507240055>
- Sugiura, M., & Kamei, T. (1991). *Equatorial Dst Index 1957–1986 (IAGA Bulletin No. 40)*. ISGI Publications Office.
- Tulasi Ram, S., Veenadhari, B., Dimri, A. P., Bulusu, J., Bagiya, M., & Gurubaran, S. (2024). Super-intense geomagnetic storm on 10–11 May 2024: Possible mechanisms and impacts. *Space Weather*, 22(10), 1–
- Om, K., Komarova, N., Jin, M., Veronig, A., & Nitta, N. V. (2021). Solar radio bursts associated with coronal mass ejections and solar flares. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 8, 743635.
- Liu, Y. D., Hu, H., Wang, R., Yang, Z., Zhu, B., Liu, Y. A., Richardson, J. D., & Luhmann, J. G. (2021). Sun-to-Earth characteristics of coronal mass ejections and their space weather effects. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 257(2), 55.
- Pyper, B. J., & Peterman, R. M. (1998). Comparison of methods to account for autocorrelation in correlation analyses of fish data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55(9), 2127–2140. <https://doi.org/10.1139/f98-104>
- Pulkkinen, A. (2007). Space weather: Terrestrial perspective. *Living Reviews in Solar Physics*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.12942/lrsp-2007-1>
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 57(1), 289–300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- Fejer, B. G., Navarro, L. A., & Chakrabarty, D. (2024). Recent results and outstanding questions on the response of the electrodynamics of the low latitude ionosphere to solar wind and magnetospheric disturbances. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 11, 1471140. <https://doi.org/10.3389/fspas.2024.1471140>