

KAJIAN LITERATUR: PENGARUH BADAI MATAHARI TERHADAP STRUKTUR PERUBAHAN IONOSFER DAN ALTERNATIF MENIMIMALISIR EFEK KEBERLANJUTANNYA

Tirta Rohmatain Solikah ¹
Ahmad Fauzi Hendratmoko ^{*2}
Eliza Kristiana Dewi ³
Astrid Dwika Anggraini ⁴

^{1,2,3,4} Pendidikan IPA, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya

*e-mail: tirtarohmatain.22038@mhs.unesa.ac.id¹, ahmadhendratmoko@unesa.ac.id²,
eliza.22045@mhs.unesa.ac.id³, astrid.22128@mhs.unesa.ac.id⁴

Abstrak

Badai matahari memiliki dampak signifikan terhadap lapisan ionosfer Bumi, dipengaruhi oleh flare matahari dan lontaran massa korona (CME) yang menghasilkan radiasi elektromagnetik. Fenomena ini mempengaruhi struktur dan kepadatan ionosfer, menyebabkan peningkatan kepadatan elektron di lapisan F ionosfer, variasi densitas plasma di wilayah Anomali Ionisasi Ekuator (EIA), dan peningkatan sintilasi ionosferik. Gangguan ini dapat mengganggu komunikasi radio, navigasi satelit, dan infrastruktur teknologi lainnya. Artikel ini membahas alternatif mitigasi seperti penggunaan model matematika, data Total Electron Content (TEC), metode multimodel, pengukuran Sinar-X, dan analisis O/N2 untuk memahami dan melindungi infrastruktur dan teknologi dari dampak negatif badai matahari.

Kata Kunci: Badai Matahari, Ionosfer Bumi, Flare Matahari.

Abstrak

Solar storms have a significant impact on the Earth's ionosphere, influenced by solar flares and coronal mass ejections (CME) which produce electromagnetic radiation. This phenomenon affects the structure and density of the ionosphere, causing an increase in electron density in the F layer of the ionosphere, variations in plasma density in the Equatorial Ionization Anomaly (EIA) region, and an increase in ionospheric scintillation. This interference can disrupt radio communications, satellite navigation, and other technological infrastructure. This article discusses mitigation alternatives such as the use of mathematical models, Total Electron Content (TEC) data, multimodel methods, X-Ray measurements, and O/N2 analysis to understand and protect infrastructure and technology from the negative impacts of solar storms.

Keywords: Solar Storms, Earth's Ionosphere, Solar Flares.

PENDAHULUAN

Ionosfer adalah lapisan di atmosfer Bumi yang terdiri dari ion yang terionisasi oleh radiasi dari matahari. Karena ionosfer memantulkan gelombang radio pada frekuensi tinggi pada 3-30 MHz, hal tersebut memungkinkan digunakannya lapisan ini dalam sistem komunikasi jarak jauh, termasuk komunikasi menggunakan HF atau high frequency wave. Cuaca antariksa, yang meliputi lontaran massa korona, CME (*Coronal Mass Ejection*), dapat menyebabkan gangguan. CME adalah pelepasan partikel bermuatan tinggi yang diemisikan dari matahari ke dalam atmosfer surya. Ketika CME mencapai Bumi, ia dapat mempengaruhi ionosfer. Hampir menjadi pasti bahwa gangguan dan komunikasi jarak jauh dalam penggunaan komunikasi radio terganggu. Dalam hal tersebut, para operator komunikasi harus secara cermat memantau cuaca antariksa dan, jika terjadi gangguan, harus segera mengambil tindakan pencegahan untuk memastikan bahwa sistem mereka beroperasi dengan lancar (Belekubun, *et al*, 2019).

Propagation gelombang radio dan komunikasi berbasis frekuensi radio, termasuk sistem komunikasi jarak jauh yang bergantung pada ionosfer. Hal tersebut dipengaruhi oleh partikel bermuatan yang dibawa oleh CME berinteraksi dengan lapisan ionosfer Bumi. Perubahan dalam jumlah elektron di ionosfer dapat disebabkan oleh interaksi ini. Selain itu, gangguan cuaca antariksa seperti CME juga dapat mempengaruhi sistem navigasi berbasis satelit seperti *Global Navigation Satellite System* (GNSS) dan *Global Positioning System* (GPS). Gangguan ini dapat

memengaruhi sinyal yang diterima oleh penerima GPS atau GNSS, yang pada gilirannya dapat mengurangi keakuratan pengukuran posisi yang dilakukan oleh sistem ini. Akibatnya, pengguna sistem navigasi berbasis satelit harus mempertimbangkan situasi-situasi tertentu ketika mereka menggunakan sistem navigasi berbasis satelit.

Sinyal GPS dapat terpengaruh saat melewati lapisan ionosfer. Ketika sinyal GPS atau GNSS melewati ionosfer, sinyal tersebut dapat mengalami perlambatan atau delay karena interaksi dengan elektron yang terionisasi di ionosfer. Faktor-faktor seperti kerapatan elektron, ketinggian, dan frekuensi sinyal akan memengaruhi seberapa besar perlambatan atau delay yang dialami oleh sinyal tersebut. Untuk mengatasi dampak dari perlambatan atau delay ini, pada penerima sistem GNSS, terutama yang mengandalkan frekuensi L-band, korelasi dilakukan terhadap delay berdasarkan model Total Electron Content (TEC) ionosfer. Model TEC ini memperhitungkan jumlah total elektron dalam jalur transmisi sinyal dan digunakan untuk mengestimasi jumlah perlambatan atau delay yang dialami oleh sinyal GPS atau GNSS saat melewati ionosfer. Dengan memperhitungkan delay berdasarkan model TEC ionosfer, penerima GPS atau GNSS dapat mengkompensasi dampak dari gangguan yang disebabkan oleh ionosfer, sehingga meningkatkan akurasi dalam menentukan posisi atau navigasi menggunakan sistem ini.

METODE

Jenis Penelitian

Metode yang digunakan studi literatur atau tinjauan pustaka. Studi literatur, juga disebut tinjauan pustaka, adalah metode penelitian yang mengumpulkan, meninjau, dan menganalisis berbagai literatur yang berkaitan dengan topik penelitian. Tujuan dari metode ini adalah untuk mendapatkan pemahaman yang luas tentang masalah yang telah diteliti sebelumnya, hasil penelitian, dan pendapat dari para peneliti sebelumnya dalam bidang yang bersangkutan (Herliandry et al., 2020).

Mengumpulkan Artikel

Penelusuran literatur dilakukan melalui database yang sesuai dengan topik penelitian, menggunakan pendekatan PRISMA. Analisis dilakukan terhadap jurnal-jurnal yang relevan dengan fokus untuk merangkum informasi yang mendukung tujuan penelitian. Prosedur pencarian jurnal mengikuti kriteria PICOT, di mana setiap pertanyaan penelitian terdiri dari elemen P (problem/populasi), I/E (implementasi/intervensi/exposure), C (control/intervensi perbandingan), dan T (time/waktu).

Dalam konteks penelitian ini, fokusnya adalah pada pengaruh badai matahari terhadap struktur lapisan ionosfer, di mana I/E adalah analisis terhadap dampak badai matahari pada struktur lapisan ionosfer. Waktu penelitian dilakukan selama periode yang relevan untuk memahami dampak badai matahari terhadap lapisan ionosfer. Penelitian ini tidak melibatkan intervensi perbandingan atau kontrol.

a. Metode Pengumpulan

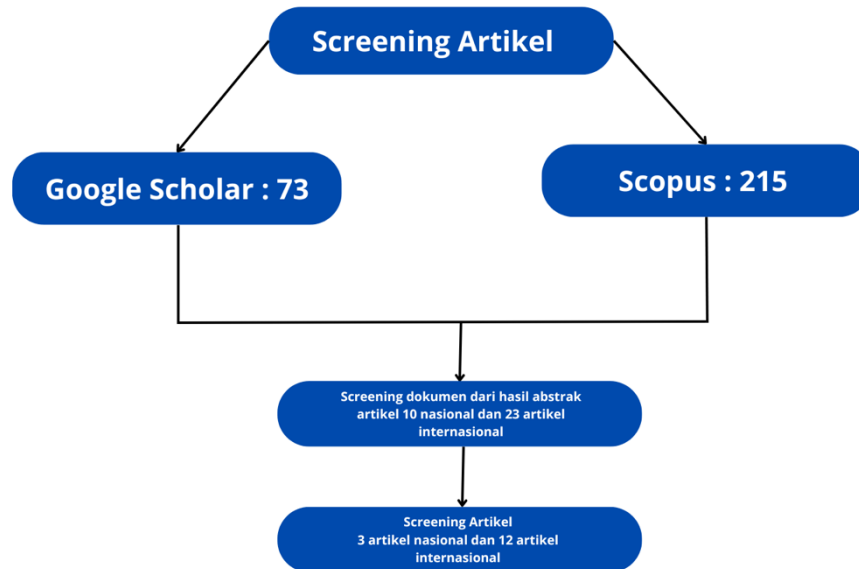
Strategi penelusuran literatur dilakukan dengan mengakses berbagai database jurnal nasional dan internasional yang tersedia secara online. Akses ke database ini dapat diperoleh melalui berbagai situs web yang menyediakan layanan tersebut.

b. Akses Penulisan

Dalam melakukan pencarian artikel yang direview, akses dilakukan melalui berbagai database pencarian seperti Google Scholar dan Scopus dengan menggunakan istilah pencarian "Pengaruh Badai Matahari Terhadap Struktur Perubahan Lapisan Ionosfer."

c. Rentang Waktu Artikel

Rentang waktu artikel pada tahun 2009, 2011, 2013, 2018, 2019, 2020, 2022. Penelitian ini menggunakan kriteria inklusi 16 daftar pustaka. Tahapan mengidentifikasi artikel terlebih dahulu dengan temuan sebanyak 73 artikel di *Google Scholar* dan 215 temuan di *Scopus*. Selanjutnya artikel tersebut di *screening* menjadi 10 artikel nasional dan 23 artikel internasional. Hasil *screening* yang sesuai dan yang dibutuhkan terdapat 3 artikel nasional dan 12 artikel internasional. Untuk mempermudah dari metode dapat dilihat pada gambar 1.

**Gambar 1.** Bagan Screening Artikel**Hasil**

Hasil penelitian yang akan disajikan akan dibagi menjadi dua tabel yang akan membahas jurnal-jurnal yang menjadi fokus kajian literatur. Table 1 akan menampilkan informasi tentang hasil penelitian, termasuk Tahun Terbit Artikel, Nama Jurnal, dan Jenis Terbitan. Sementara itu, tabel 2 akan membahas analisis kajian literatur, termasuk Nama Penulis, Metode Penelitian, dan hasil Penelitian. Informasi mengenai hasil penelitian akan disajikan secara terperinci pada tabel 1 untuk mempermudah pemahaman.

Tabel 1. Publikasi Jurnal Terindeks

Tahun	Nama Jurnal	Jumlah Artikel	Jenis Terbitan
2009	Badai Matahari Dan Pengaruhnya Pada Ionosfer Dan Geomagnet Di Indonesia	1	Scopus
2022	Solar And Interplanetary Events That Drove Two Cir-related Geomagnetic Storms Of 1 June 2013 And 7 October 2015, And Their Ionospheric Responses At The American And African Equatorial Ionization Anomaly Regions	1	Scopus
2019	Respon Ionosfer Terhadap Badai Matahari Berdasarkan Analisis Kandungan Elektron Total Dan Indeks Gangguan Geomagnetik	1	Scopus
2023	Respon Ionosfer Daerah Kupang (10,9° Ls – 123° Bt) Terhadap Badai Geomagnet Berdasarkan Analisis Parameter Jumlah	1	Scopus

	Kandungan Elektron Dan Indeks Gangguan Geomagnet		
2011	Pengaruh Ionosfer Pada Akurasi Penentuan Posisi Absolut Dengan Gps Single Frequency Pada Saat Terjadi Badai Matahari	1	Google Scholar
2018	Analisis Nilai Total Electron Content (Tec) Near Real Time Menggunakan Data Gps Dua Frekuensi	1	Google Scholar
2019	Respon Ionosfer Terhadap Badai Matahari Berdasarkan Analisis Kandungan Elektron Total dan Indeks Gangguan Geomagnet.	1	Google Scholar
2020	Global investigation of the ionospheric irregularities during the severe geomagnetic storm on September 7-8, 2017	1	Scopus
2023	Impact of the February 3-4, 2022 geomagnetic storm on ionospheric S4 amplitude scintillation index: Observations and implications	1	Scopus
2020	Geomagnetic solar flare effects: a review	1	Scopus
2013	Solar Flare Effects On The Ionosphere	1	Scopus
2019	An investigation of solar flare effects on equatorial ionosphere and thermosphere using co-ordinated measurements.	1	Scopus
2023	Space weather impacts on the ionosphere over the southern African mid-latitude region	1	Scopus
2023	Investigating the effect of large solar flares on the ionosphere based on novel digisonde data comparing three different methods	1	Scopus

Setelah tabel 1 yang menampilkan informasi tentang tahun terbit jurnal, nama jurnal, dan indeks jurnal disajikan, tabel 2 akan memperlihatkan informasi tentang nama penulis, metode penelitian, dan hasil penelitian yang berkaitan dengan pengaruh badai matahari terhadap perubahan struktur lapisan ionosfer. Tabel 2 ini disusun untuk mempermudah pemahaman terhadap hasil penelitian tersebut.

Tabel 2. Tabel Hasil Analisis Artikel Penelitian

No	Penulis	Metode	Temuan Hasil Penelitian
1.	Clara Y. Yatini, Jiyo, Mamat Ruhimat	Kuantitatif	Ledakan di matahari, yang dikenal sebagai flare dan lontaran massa korona akan mempengaruhi cuaca antariksa. Dari peristiwa aktivitas matahari yang dibahas di sini tampak bahwa flare dan CME yang terjadi mempunyai pengaruh yang kuat terhadap geomagnet dan ionosfer, sehingga untuk mengantisipasi dampak dari aktivitas matahari, perlu dilakukan prakiraan terhadap aktivitas matahari itu sendiri, terutama prakiraan munculnya flare dan CME
2.	Oluwole J. Oyedokun, P.O. Amaechi, A.O. Akala, K.G. Simi Aghogho Ogwala, E.O. Oyeyemi	Kualitatif	Badai geomagnetik dapat memiliki dampak signifikan pada lapisan ionosfer, terutama di wilayah Anomali Ionisasi Ekuator (EIA). Selama badai geomagnetik, terjadi variasi yang kuat dalam densitas plasma ionosferik dari tingkat normalnya. Respon ionosferik positif atau negatif terhadap badai dapat diamati, yang dapat mempengaruhi struktur densitas ionosferik dengan dampak yang signifikan pada infrastruktur berbasis ruang dan darat.
3.	Arwildo Fianly Belekubuna, Seni Herlina Juwita Tongkukuta, Asnawib, Dolfie Paulus Pandara	Kuantitatif	Adanya penurunan indeks DST sebesar -223nT pada tanggal 18 Maret 2015, yang diikuti oleh penurunan TEC sebesar 20,85 TECU dua jam setelahnya. Hal ini menunjukkan adanya korelasi antara badai matahari dan perubahan parameter ionosfer, di mana badai matahari mempengaruhi ionosfer dengan menurunkan jumlah kandungan elektron total (TEC)
4.	Angelikus Olla, Asnawi Husin, Yanti Boimau, dan Fernince Ina Pote	Kualitatif	Badai geomagnet pada tanggal 17 Maret 2015 menyebabkan badai ionosfer negatif sehari setelahnya, dengan penurunan nilai Total Electron Content (TEC) yang signifikan. Sementara pada tanggal 23 Juni 2015, terjadi badai ionosfer positif dengan peningkatan nilai TEC yang signifikan. Respons ionosfer terhadap badai geomagnet pada 20 Desember 2015 menunjukkan badai ionosfer positif pada hari yang sama, diikuti oleh badai ionosfer negatif sehari setelahnya. Temuan ini menunjukkan bahwa badai geomagnet memiliki pengaruh yang berbeda terhadap ionosfer, yang tercermin dalam

			perubahan nilai TEC dan pola respons ionosfer yang beragam.
5.	Sri Ekawati,dan Anwar Santoso	Kuantitatif	Dua badai geomagnet dengan klasifikasi yang sama dapat menghasilkan respons yang berbeda oleh ionosfer. Badai geomagnet pada tanggal 17 Maret 2015 menyebabkan badai ionosfer negatif, sementara badai geomagnet pada tanggal 23 Juni 2015 mengakibatkan badai ionosfer positif. Perbedaan respons ini kemungkinan disebabkan oleh faktor-faktor seperti proses elektrodinamika dan sistem arus listrik di ionosfer akibat perubahan medan magnet di magnetosfer
6.	Buldan Muslim	Kuantitatif	Ionosfer memiliki pengaruh signifikan terhadap akurasi penentuan posisi GPS, terutama selama badai matahari. Peningkatan Total Electron Content (TEC) dalam ionosfer dapat menyebabkan peningkatan kesalahan posisi absolut GPS hingga 8 meter, yang lebih besar dari peningkatan TEC sebesar 20 TECU yang setara dengan 3,2 meter (Page 14). Korelasi antara peningkatan simpangan TEC dan penurunan akurasi posisi GPS memiliki koefisien korelasi sekitar 0,6, menunjukkan hubungan yang signifikan antara kedua faktor ini (Page 15), (Page 16). Mitigasi terhadap dampak ionosfer pada penurunan akurasi posisi GPS dapat dilakukan dengan menggunakan model Klobuchar
7.	Almas Nandityo Rahadyan	Kuantitatif	Ionosfer mengandung elektron yang dapat mempengaruhi propagasi gelombang elektromagnetik berupa tambahan waktu tempuh penjarannya yang bergantung pada Total Electron Content (TEC) di ionosfer dan frekuensi sinyal GPS. karakteristik ionosfer dalam suatu wilayah biasanya diwakili oleh karakteristik dari TEC, yang sangat berguna untuk memonitor perubahan nilai elektron pada lapisan ionosfer, menyediakan data kalibrasi bagi pengguna GPS, dan dalam bidang telekomunikasi nilai TEC dapat digunakan untuk mengetahui sintilasi.
8.	Arwildo Fianly Belekubuna, Seni Herlina Juwita Tongkukuta,	Kuantitatif	Terjadi interaksi antara badai matahari yang terjadi pada tanggal 15 Maret pukul 10:00 WITA dengan magnetosfer bumi pada tanggal 18 Maret 2015 pukul 03:00

	Asnawib, Dolfie Paulus Pandaraa		WITA waktu Manado, Medan Geomagnet merespon dengan penurunan nilai Indeks DST hingga mencapai -223 nT pada tanggal 18 Maret 2015 pukul 07:00 WITA, Terjadi penurunan jumlah kandungan elektron total (TEC) pada hari yang sama saat badai Geomagnet terjadi, Fluktuasi nilai TEC terjadi mulai pukul 09:00 WITA atau 2 jam setelah Indeks DST mencapai nilai minimum, dan fluktuasi ini berlangsung selama 5 hari sejak tanggal 18 hingga 23 Maret 2015, Nilai deviasi maksimum TEC dari mediannya terjadi pada tanggal 18 Maret.
9.	Ramazan Atici , Selcuk Sagir	Kuantitatif	Peneliti menggunakan data Total Electron Content (TEC) dari lima puluh stasiun yang terhubung ke jaringan International GNSS System (IGS)-GPS untuk menganalisis perubahan kepadatan plasma ionosfer selama periode badai geomagnetik pada tanggal 7-8 September 2017. Hasil analisis menunjukkan adanya ketidakteraturan ionosfer yang signifikan, terutama di lintang tinggi belahan bumi selatan. Penyimpangan ionosfer tertinggi diamati di beberapa stasiun tertentu, menunjukkan variasi spasial yang signifikan dalam respons ionosfer terhadap gangguan cuaca luar angkasa. Secara keseluruhan, deskripsi yang diberikan dalam penelitian ini memberikan pemahaman yang mendalam tentang perubahan kepadatan plasma ionosfer selama badai geomagnetik dan respons ionosfer terhadap fenomena cuaca luar angkasa yang ekstrem.
10.	Yi Duann, Loren C. Chang, Jann-Yenq Liu	Kuantitatif	Respons ionosfer terhadap badai geomagnetik, termasuk badai magnet kecil selama kondisi matahari yang sangat tenang. Temuan menunjukkan bahwa bahkan badai magnet kecil dapat menghasilkan respons ionosfer yang kuat, yang diamati melalui analisis data TEC dan pengukuran O/N ₂ . Selain itu, pengaruh medan Prompt Penetration Electric (PPE) dan medan Disturbance Dynamo (DD) juga terungkap dalam studi ini, dengan bukti pengaruhnya pada indeks kilau amplitudo GNSS S4 selama badai geomagnetik tertentu.

			Variasi jarak yang diamati juga memberikan wawasan penting dalam pemahaman respons ionosfer terhadap peristiwa geomagnetik.
11.	Juan José Curto	Kuantitatif	Penelitian yang dilakukan oleh Friedman et al., yang menyimpulkan bahwa sinar-X dengan panjang gelombang antara 1 dan 100 Å merupakan agen utama yang menyebabkan efek ionisasi dari flare matahari. Temuan ini menyoroti pentingnya sinar-X dalam mempengaruhi ionosfer selama badai matahari. Selain itu, penelitian oleh Volland & Taubenhein menemukan bahwa efek geomagnetik dari flare matahari tidak hanya berupa peningkatan normal Sq, tetapi juga melibatkan perbedaan sistematis dalam bentuk sistem arus yang mendukung kedua sistem tersebut. Hal ini menunjukkan kompleksitas interaksi antara flare matahari dan struktur ionosfer.
12.	S.Guyer, Z.Can	Kuantitatif	Penelitian menunjukkan bahwa flare matahari, terutama X-Ray dan intensitas EUV, merupakan faktor utama yang menyebabkan peningkatan TEC yang disebut sebagai Sudden Increase in TEC (SITEC) di ionosfer. Peningkatan SITEC cenderung terjadi ketika sudut zenit matahari semakin kecil. Selain itu, flare matahari juga dapat mempengaruhi struktur lapisan ionosfer, terutama lapisan F, melalui faktor-faktor seperti durasi flare, jarak matahari-bumi, dan posisi heliosferik. Gangguan ini meliputi penyerapan tiba-tiba gelombang kosmik yang disebabkan oleh peningkatan kepadatan elektron secara tiba-tiba di lapisan D, redaman gelombang pendek, anomali fase tiba-tiba, anomali frekuensi tiba-tiba, efek magnetik flare matahari, dan peningkatan tiba-tiba dalam Total Electron Content (TEC).
13.	S. G. Sumod and Tarun Kumar Pant	Kuantitatif	Respons EEJ terhadap flare matahari menunjukkan peningkatan yang cepat selama puncak flare. Namun, setelah periode peningkatan ini, EEJ mengikuti pola yang mirip dengan hari kontrol dengan peningkatan tambahan akibat radiasi flare. Hal ini menunjukkan bahwa flare matahari dapat mempengaruhi aktivitas elektrodinamika di ionosfer.

			Selama flare matahari, terjadi pelemahan yang signifikan pada EIA, yang bertahan sepanjang hari. Hal ini menunjukkan bahwa flare matahari dapat mengakibatkan pelemahan pada medan listrik timur yang mengatur EIA. Penurunan ini diyakini terkait dengan pengurangan medan listrik timur akibat flare.
14.	Tshimangadzo Merline Matamba, Donald W. Danskin, Rendani R. Nndanganeni and Mpho Tshisaphungo	Kuantitatif	Selama periode badai geomagnetik pada 3-8 November 2021, teramati respons ionosfer negatif selama fase utama dan pemulihan badai geomagnetik. Hal ini menunjukkan adanya penurunan Total Electron Content (TEC) di wilayah mid-latitude selatan Afrika. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa kepadatan elektron ionosfer di wilayah mid-latitude dapat berkurang hingga faktor 2-5 (50-80%) selama efek negatif badai. Hal ini disebabkan oleh peningkatan energi magnetosfer selama badai geomagnetik yang dapat mengakibatkan penurunan signifikan dalam kepadatan elektron di lapisan F.
15.	Attila Buzás, Daniel Kouba, Jens Mielich, Dalia Burešová, Zbyšek Mošna, Petra Koucká Knížová and Veronika Barta	Kuantitatif	Selama periode flare matahari yang intens, terjadi peningkatan absorpsi elektromagnetik (EM) di ionosfer yang dapat mengakibatkan redaman radio sebagian atau bahkan total. Perubahan ini terutama terjadi dalam lapisan D dan E ionosfer, dengan variasi persentase yang signifikan tergantung pada intensitas flare, sudut zenith matahari, dan durasi peristiwa flare. Studi ini menunjukkan bahwa kombinasi dari tiga metode yang digunakan dalam penelitian tersebut merupakan pendekatan yang efisien untuk memantau respons ionosfer terhadap flare matahari.

PEMBAHASAN

Pada pembahasan akan mengungkapkan hasil analisis yang dilakukan kepada 15 artikel yang sudah dipaparkan pada hasil yang menjadi sumber penelitian. Pembahasan ini akan memaparkan Pengaruh Badai Matahari terhadap Struktur Perubahan Lapisan Ionosfer dan alternatif meminimalisir efek keberlanjutannya. Badai matahari merupakan fenomena alam yang dapat mempengaruhi lapisan ionosfer di atmosfer Bumi. Fenomena ini sering terjadi bersamaan dengan flare matahari, yaitu ledakan energi di atmosfer matahari, dan lontaran massa korona (CME), yaitu pelepasan besar-besaran materi dari korona matahari. Kedua fenomena ini menghasilkan radiasi elektromagnetik yang dapat mempengaruhi ionosfer Bumi. Selain itu, radiasi sinar-X dan ultraviolet dari flare matahari juga dapat meningkatkan ionisasi di ionosfer, yang mengakibatkan peningkatan kepadatan elektron.

Faktor-faktor yang mempengaruhi lapisan ionosfer meliputi flare matahari, lontaran massa korona (CME), radiasi sinar-X dan ultraviolet, serta medan magnet Bumi. Flare matahari adalah ledakan energi yang terjadi di atmosfer matahari dan menghasilkan radiasi elektromagnetik yang memengaruhi ionosfer Bumi. Lontaran massa korona (CME) merupakan pelepasan materi dari korona matahari yang melibatkan medan magnet dan plasma matahari (Yatini & Ruhimat, 2009). Ketika CME mencapai Bumi, ia dapat menyebabkan badai geomagnetik yang mempengaruhi ionosfer. Radiasi sinar-X dan ultraviolet dari flare matahari dan aktivitas matahari lainnya juga dapat meningkatkan ionisasi di ionosfer, yang memengaruhi kepadatan elektron (Atıcı & Sağır, 2020). Selain itu, medan magnet Bumi berperan penting dalam interaksi antara angin matahari dan lapisan ionosfer. Perubahan dalam medan magnet Bumi selama badai geomagnetik dapat mempengaruhi struktur dan kepadatan ionosfer. Variabilitas dalam komposisi atmosfer Bumi, seperti jumlah gas atmosfer dan kelembaban udara, juga dapat mempengaruhi ionosfer. Aktivitas manusia, seperti penggunaan radio frekuensi tinggi dan penggunaan senjata elektromagnetik, juga dapat mempengaruhi ionosfer.

Pengaruh badai matahari terhadap struktur ionosfer mencakup beberapa aspek penting. Salah satunya adalah peningkatan kepadatan elektron di lapisan F ionosfer selama badai matahari. Hal ini dapat menghasilkan peningkatan dalam Total Electron Content (TEC), yang berpotensi memengaruhi sistem navigasi satelit dan komunikasi radio. Selain itu, badai matahari juga dapat menyebabkan variasi yang kuat dalam densitas plasma di wilayah Anomali Ionisasi Ekuator (EIA), yang merupakan wilayah kritis untuk propagasi gelombang radio (Oyedokun et al., 2022). Variasi ini dapat mengganggu komunikasi radio di wilayah tersebut. Badai matahari juga dapat meningkatkan tingkat sintilasi ionosferik. Sintilasi ionosferik adalah variasi cepat dalam amplitudo, fase, atau frekuensi gelombang elektromagnetik saat melewati medium ionosfer (Nandityo, 2018). Peningkatan sintilasi ionosferik selama badai matahari dapat menyebabkan gangguan dalam komunikasi radio, terutama pada frekuensi tinggi.

Dampak dari badai matahari tidak hanya terbatas pada ionosfer, tetapi juga berdampak pada infrastruktur dan teknologi di Bumi. Salah satu dampaknya adalah gangguan pada komunikasi satelit. Badai matahari dapat menyebabkan gangguan pada sinyal komunikasi satelit, terutama pada frekuensi tinggi, yang dapat mengganggu layanan komunikasi global. Badai matahari juga dapat menyebabkan gangguan pada navigasi GPS. Peningkatan Total Electron Content (TEC) selama badai matahari dapat mempengaruhi akurasi navigasi GPS, terutama di wilayah tinggi lintang (Muslim & Antariksa, 2011). Gangguan ini dapat menyebabkan ketidakakuratan dalam penentuan posisi dan navigasi menggunakan GPS, yang dapat berdampak pada berbagai aplikasi yang bergantung pada sistem GPS. Selain dampak pada komunikasi dan navigasi, badai matahari juga dapat meningkatkan tingkat radiasi di lingkungan antariksa. Peningkatan tingkat radiasi ini dapat berdampak pada astronaut dan satelit di orbit Bumi. Radiasi yang lebih tinggi dapat meningkatkan risiko kesehatan bagi astronaut dan dapat menyebabkan kerusakan pada komponen satelit, yang dapat mengganggu operasi dan umur pakai satelit tersebut (Sumod & Tarun, 2019).

Dalam meminimalisir efek kerberlanjutan dari badai matahari terhadap ionosfer, beberapa alternatif dapat dilakukan. Pertama, penggunaan Model Klobuchar dapat membantu mengurangi dampak ionosfer pada penurunan akurasi posisi GPS (Muslim & Antariksa, 2011). Selain itu, data Total Electron Content (TEC) dapat digunakan untuk memantau perubahan nilai elektron pada lapisan ionosfer, yang bermanfaat dalam memberikan data kalibrasi bagi pengguna GPS dan untuk mengetahui sintilasi dalam bidang telekomunikasi. Kedua, metode multimodel juga dapat digunakan untuk mengurangi dampak efek kerberlanjutan dari badai matahari terhadap ionosfer. Penggunaan berbagai model dapat memberikan sudut pandang yang lebih lengkap dalam memahami perubahan yang terjadi pada ionosfer selama badai matahari. Selanjutnya, data Sinar-X dengan panjang gelombang antara 1 dan 100 Å, yang merupakan agen utama yang menyebabkan efek ionisasi dari flare matahari, juga dapat digunakan untuk memahami dampak badai matahari terhadap ionosfer dengan lebih baik (Curto, 2020). Terakhir, penggunaan data Total Electron Content (TEC) dan pengukuran O/N₂ juga dapat membantu dalam menganalisis efek geomagnetik dari flare matahari (Duann, 2023). Data ini dapat

memberikan bukti pengaruhnya pada indeks kilau amplitudo GNSS S4 selama badai geomagnetik tertentu, sehingga memungkinkan untuk mengambil langkah-langkah mitigasi yang sesuai (Duann, 2023). Dengan pemahaman yang lebih baik tentang interaksi antara matahari dan ionosfer, kita dapat mengambil langkah-langkah yang lebih efektif untuk melindungi infrastruktur dan teknologi kita dari dampak negatif badai matahari.

KESIMPULAN

Dari hasil analisis terhadap 15 artikel yang menjadi sumber penelitian, badai matahari terbukti memiliki dampak yang signifikan terhadap lapisan ionosfer Bumi. Fenomena ini, sering kali terjadi bersamaan dengan flare matahari dan lontaran massa korona (CME), menghasilkan radiasi elektromagnetik yang mempengaruhi ionosfer. Radiasi sinar-X dan ultraviolet dari flare matahari, serta medan magnet Bumi, juga berperan dalam mempengaruhi struktur dan kepadatan ionosfer. Dampak badai matahari terhadap ionosfer mencakup peningkatan kepadatan elektron di lapisan F ionosfer, variasi densitas plasma di wilayah Anomali Ionisasi Ekuator (EIA), dan peningkatan sintilasi ionosferik. Dampak ini dapat mengganggu komunikasi radio, navigasi satelit, dan infrastruktur teknologi lainnya. Gangguan pada komunikasi satelit, navigasi GPS, dan peningkatan tingkat radiasi di lingkungan antariksa juga dapat terjadi. Untuk meminimalisir efek kerberlanjutan dari badai matahari, beberapa alternatif dapat dilakukan. Penggunaan model matematika seperti Model Klobuchar dapat membantu mengurangi dampak ionosfer pada penurunan akurasi posisi GPS. Data Total Electron Content (TEC) dan metode multimodel dapat memberikan sudut pandang yang lebih lengkap dalam memahami perubahan ionosfer selama badai matahari. Selain itu, data Sinar-X dan pengukuran O/N2 juga dapat membantu dalam menganalisis efek geomagnetik dari flare matahari. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang interaksi antara matahari dan ionosfer, langkah-langkah mitigasi yang tepat dapat diambil untuk melindungi infrastruktur dan teknologi dari dampak negatif badai matahari. Ini penting untuk menjaga kelangsungan komunikasi dan navigasi, serta meminimalkan risiko pada astronaut dan satelit di lingkungan antariksa.

DAFTAR PUSTAKA

- Atıcı, R., & Sağır, S. (2020). Global investigation of the ionospheric irregularities during the severe geomagnetic storm on September 7–8, 2017. *Geodesy and Geodynamics*, 11(3), 211–221. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2019.05.004>
- Belekubun, et al. (2019). Respon Ionosfer Terhadap Badai Matahari Berdasarkan Analisis Kandungan Elektron Total dan Indeks Gangguan Geomagnet. *Jurnal MIPA UNSRAT ONLINE*. Vol 8(2). 82-85.
- Buzás, A., Kouba, D., Mielich, J., Burešová, D., Mošna, Z., Knížová, P. K., & Barta, V. (2023). Investigating the effect of large solar flares on the ionosphere based on novel Digisonde data comparing three different methods. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 10. <https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1201625>
- Curto, J. J. (2020). Geomagnetic solar flare effects: a review. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 10(27). <https://doi.org/10.1051/swsc/2020027>
- Duann, Y., Chang, L. C., & Liu, J. Y. (2023). Impact of the February 3–4, 2022 geomagnetic storm on ionospheric S4 amplitude scintillation index: Observations and implications. *Advances in Space Research*, 72(10), 4379–4391. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.09.036>
- Ekawati, S., & Santoso, A. (2018). Perbandingan Antara Pengaruh Badai Geomagnet 17 Maret Dan 23 Juni 2015 Terhadap Perbedaan Respons Tec Ionosfer (Comparison Between The 17 March And 23 June 2015 Geomagnetic Storm Effect On Different Response Of Ionospheric TEC). *Jurnal Sains Dirgantara*, 16(2), 67–78. <https://doi.org/10.30536/j.jsd.2019.v16.a3031>
- Fianly Belekubun, A., Herlina Juwita Tongkukut, S., & Paulus Pandara Jurusan Fisika, D. (2019). Respon Ionosfer Terhadap Badai Matahari Berdasarkan Analisis Kandungan Elektron Total dan Indeks Gangguan Geomagnet. *JURNAL MIPA UNSRAT ONLINE*, 8(2), 82–85.

- Matamba, T. M., Danskin, D. W., Nndanganeni, R., & Tshisaphungo, M. (2023). Space weather impacts on the ionosphere over the southern African mid-latitude region. *Earth, Planets and Space*, 75(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01894-5>
- Muslim, B., Pusat, P., & Antariksa, S. (2011). Pengaruh Ionosfer Pada Akurasi Penentuan Posisi Absolut Dengan Gps Single Frequency Pada Saat Terjadi Badai Matahari. *Jurnal Sains Dirgantara*, 9(1), 70–89.
- Nandityo Rahadyan, A. (2018). *Analisis Nilai Total Electron Content (Tec) Near Real Time Menggunakan Data Gps Dua Frekuensi (Studi Kasus: Surabaya)*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Olla, A., Husin, A., Boimau, Y., & Ina Pote, F. (2023). Respon Ionosfer Daerah Kupang (10,9° Ls – 123° Bt) Terhadap Badai Geomagnet Berdasarkan Analisis Parameter Jumlah Kandungan Elektron Dan Indeks Gangguan Geomagnet. *Jurnal Fisika Sains Dan Aplikasinya*, 8(2), 23–29.
- Oyedokun, O. J., Amaechi, P. O., Akala, A. O., Simi, K. G., Ogwala, A., & Oyeyemi, E. O. (2022). Solar and interplanetary events that drove two CIR-related geomagnetic storms of 1 June 2013 and 7 October 2015, and their ionospheric responses at the American and African equatorial ionization Anomaly regions. *Advances in Space Research*, 69(5), 2168–2181. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.12.027>
- Guyer, S., & Can, Z. (2013). *Solar flare effects on the ionosphere* (pp. 729–733). IEEE: Istanbul. <https://doi.org/10.1109/rast.2013.6581305>
- Sumod, S. G., & Pant, T. K. (2019). An investigation of solar flare effects on equatorial ionosphere and thermosphere using co-ordinated measurements. *Earth, Planets and Space*, 71(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1105-8>
- Yatini, C. Y., Jiyo, & Ruhimat, M. (2009). Badai Matahari Dan Pengaruhnya Pada Ionosfer Dan Geomagnet Di Indonesia. *Majalah Sains Dan Teknologi Dirgantara*, 4(1), 17–24.
- Herliandry, L. D., Nurhasanah, N., Suban, M. E., & Kuswanto, H. (2020). Pembelajaran Pada Masa Pandemi Covid-19. *JTP - Jurnal Teknologi Pendidikan*, 22(1), 65–70.