



Evaluasi Kejadian dan Indikator Fisis Skala Cuaca Antariksa berdasarkan Variasi Angin Matahari tahun 1963 – 2023

(Evaluation Occurance and Physical Indicators of Space Weather Scale based on Solar Wind Variations in 1963 to 2023)

Dhani Herdiwijaya ^{*,1,2,3}

¹ Kelompok Keahlian Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Ganesha 10 Bandung 40132

² Observatorium Bosscha, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Ganesha 10 Bandung 40132

³ Pusat Sains, Teknologi dan Inovasi Antariksa, Institut Teknologi Bandung, Ganesha 10 Bandung 40132
E-mail: dhani.herdiwijaya@itb.ac.id

Abstract — *Space weather refers to changes in environmental conditions in near-Earth space as a consequence of the behaviour of the Sun, the nature of the magnetic field of interplanetary space, and the Earth's atmosphere, in particular the magnetosphere and ionosphere layers. The components of space weather are plasma particles, electromagnetic energy and magnetic fields. Solar activity always emits plasma particles into space and creates a plasma stream known as the solar wind. The energetic phenomenon of solar activity comes from solar explosions and corona mass ejections that can cause extreme space weather, namely geomagnetic storms. The intense energy of these storms can damage satellites, disable satellite communications and navigation, disrupt power grids on Earth's surface, and be dangerous to spacecraft. The NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Agency) Space Weather Scale, USA was introduced as a way to communicate to the general public about current and future space weather conditions and their possible impacts on humans and space technology systems. The scale is useful for space technology users and those interested in the effects of space weather on spacecraft. The scale describes space environment disturbances for three types of events: geomagnetic storms, solar radiation storms, and radio blackouts. The scale has levels from low to high that are numbered 1 to 5, indicating severity. Each level also lists the likelihood of the impact occurring, the frequency with which the event occurs, and provides a measure of the intensity of the physical cause. The NOAA space weather scale evaluation was conducted for 60 years of solar wind data. Geomagnetic storms with Kp index indicator (N=525960) extreme scale (scale 5) with Kp index of 9 is only 0.11% (N=597). Solar radiation storms with an indicator of proton flux energy > 10 MeV (N = 365015) there are no extreme scale achievements, namely 100 000 particles. The highest flux was 67749 particles (scale 4). Most of the flux (99.85%) was below 1000 proton particles. The extreme radio storm (scale 5), with a solar flare strength of more than X20, has only occurred five times (from 1976 to 2023).*

Keywords — *Space weather, geomagnetic storms, solar radiation storms, radioblackout storms*

Abstrak — *Cuaca antariksa mengacu pada perubahan kondisi lingkungan di ruang angkasa dekat Bumi sebagai konsekuensi dari perilaku Matahari, sifat medan magnet ruang antarplanet, dan atmosfer Bumi, khususnya lapisan magnetosfer dan ionosfer. Komponen cuaca antariksa adalah partikel plasma, energi elektromagnetik, dan medan magnet. Aktivitas Matahari selalu memancarkan partikel plasma ke luar angkasa dan menciptakan aliran plasma yang dikenal sebagai angin matahari. Fenomena energetik aktivitas matahari berasal dari ledakan matahari dan lontaran massa korona yang dapat*

*Dhani Herdiwijaya
E-mail: dhani.herdiwijaya@itb.ac.id

menyebabkan cuaca antariksa ekstrim, yaitu badai geomagnet. Energi kuat badai ini dapat merusak satelit, melumpuhkan komunikasi dan navigasi satelit, mengganggu jaringan listrik di permukaan Bumi, dan berbahaya bagi antariksawan. Skala Cuaca Antariksa NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Agency), Amerika Serikat diperkenalkan sebagai cara untuk mengkomunikasikan kepada masyarakat umum tentang kondisi cuaca antariksa saat ini dan di masa depan serta kemungkinan dampaknya terhadap manusia dan sistem teknologi antariksa. Skala ini berguna bagi pengguna teknologi antariksa dan mereka yang tertarik dengan efek cuaca antariksa terhadap antariksawan. Skala ini menggambarkan gangguan lingkungan antariksa untuk tiga jenis peristiwa: badai geomagnetik, badai radiasi matahari, dan pemadaman radio. Skala ini memiliki tingkat-tingkat dari rendah ke tinggi yang diberi nomor 1 sampai 5, yang menunjukkan tingkat keparahan. Setiap tingkat juga mencantumkan kemungkinan dampak yang terjadi, frekuensi peristiwa tersebut terjadi, dan memberikan ukuran intensitas penyebab fisiknya. Evaluasi skala cuaca antariksa NOAA dilakukan untuk data angin matahari selama 60 tahun. Badai geomagnetik dengan indikator indeks Kp ($N=525960$) skala ekstrim (skala 5) dengan indeks Kp sebesar 9 hanya 0,11% ($N=597$). Badai radiasi matahari dengan indikator fluks proton energi >10 MeV ($N=365015$) tidak ada capaian skala ekstrim, yaitu 100 000 partikel. Fluks tertinggi sebesar 67749 partikel (skala 4). Sebagian besar fluks (99,85%) di bawah 1000 partikel proton. Badai gelombang radio ekstrim (skala 5) dengan kuat ledakan matahari lebih dari X20 hanya terjadi 5 kali (1976-2023).

Kata Kunci — Cuaca antariksa, badai geomagnet, badai radiasi matahari, badai radio.

I. PENDAHULUAN

Cuaca antariksa mengacu pada perubahan kondisi lingkungan antariksa yang berdampak terhadap teknologi dan kehidupan yang berada di luar atmosfer Bumi. Hal ini merupakan konsekuensi dari perilaku atau dinamika aktivitas Matahari yang mempengaruhi sifat medan magnet dan atmosfer Bumi, serta semua obyek langit dalam sistem tata surya. Unsur-unsur aktif dari cuaca antariksa adalah partikel plasma (elektron, proton, dan ion) atau angin matahari, energi elektromagnetik, dan medan magnet ruang antarplanet. Elemen-elemen ini berbeda dengan kontributor cuaca meteorologi yang lebih umum dikenal, yaitu air, suhu, dan udara. Batas awal lingkungan antariksa sering disebut sebagai batas Karman di lapisan ionosfer Bumi, yaitu ketinggian 80 km [1,2].

Matahari selalu memancarkan partikel plasma dan medan magnet ke luar angkasa, menciptakan aliran yang dikenal sebagai angin matahari. Partikel-partikel ini berasal dari atmosfer luar Matahari yang panas, dengan temperatur orde jutaan derajat Celsius, yang disebut lapisan korona. Ciri struktur magnetik yang sangat kompleks, sekaligus cerminan muatan listrik yang sangat tinggi. Angin matahari membawa partikel-partikel ini menuju Bumi dengan kecepatan rata-rata 400 km/s. Cuaca ekstrim antariksa atau badai matahari dapat memicu angin matahari kecepatan 2000 km/s. Bumi memiliki medan magnet dan atmosfer yang berfungsi seperti perisai, melindungi kehidupan dari angin matahari energi tinggi. Namun, terkadang partikel bermuatan mengalir melalui medan magnet Bumi ke arah kutub magnetik, sehingga menghasilkan fenomena aurora [3,4,5,6].

Cuaca antariksa dapat menimbulkan dampak yang berbahaya bagi antariksawan dan kerugian ekonomi yang besar. Selama badai matahari yang hebat, angin matahari menjadi lebih kuat. Badai ini dapat disebabkan oleh ledakan matahari dan lontaran massa korona, yang mengirimkan berton-ton energi ke seluruh ruang angkasa dengan kecepatan supersonik. Radiasi ekstra ini dapat merusak satelit, mengganggu jaringan listrik, dan berbahaya bagi antariksawan di luar angkasa [7,8,9,10,11,12].

Makalah ini mengkaji skala cuaca antariksa sebagai alat untuk mengkomunikasikan dampak terhadap fisis Bumi, teknologi dan biologi terhadap masyarakat, operator dan pengguna teknologi berbasis Antariksa. Manfaat dari kajian ini adalah diperolehnya prediksi dampak terburuk dari cuaca Antariksa ekstrim. Data yang dipergunakan berawal tahun 1963 sampai tahun 2019 atau selama 56 tahun.

II. LANDASAN TEORI

A. Gambaran Umum Cuaca Antariksa

Cuaca Antariksa adalah fenomena alam yang kompleks secara fisis dengan sebab utama didorong oleh aktivitas Matahari. Fenomena ini mencakup berbagai kondisi di luar angkasa yang dapat memengaruhi Bumi dan sistem teknologinya. Berikut ini adalah penjelasan rinci tentang penyebab cuaca antariksa:

1. Matahari sebagai penggerak utama. Bintang terdekat mempunyai aktivitas yang dinamis. Matahari secara terus menerus memancarkan aliran partikel bermuatan yang dikenal sebagai angin matahari. Angin ini terdiri dari plasma, materi terionisasi bermuatan listrik yang mengalir keluar dari Matahari ke segala arah dalam alur medan magnet Matahari. Angin matahari membawa serta medan magnet Matahari, menciptakan medan magnet antar planet (*Interplanetary Magnetic Field*, IMF) yang menembus tata surya [13].
2. Ledakan Matahari (*solar flare*) dan Lontaran Massa Korona (*coronal mass ejection*, CME) [14,15]. Dua peristiwa transien matahari berenergi tinggi yang paling signifikan dalam berkontribusi terhadap cuaca antariksa ekstrem.
 - a. Ledakan Matahari: Peristiwa transien ini melepaskan radiasi tinggi secara tiba-tiba dan intens yang disebabkan oleh pelepasan energi magnetik yang tersimpan di atmosfer Matahari. Ledakan matahari dapat memancarkan sinar-X dan radiasi ultraviolet, yang dapat mencapai Bumi dalam waktu sekitar delapan menit, yang akan meningkatkan laju ionisasi lapisan ionosfer dan membentuk kerapatan tinggi elektron, yang berpotensi mengganggu komunikasi satelit dan sistem navigasi
 - b. Lontaran Massa Korona (CME): CME adalah semburan besar angin matahari dan medan magnet yang naik di atas korona matahari atau dilepaskan ke luar angkasa. Ketika CME bertabrakan dengan magnetosfer Bumi, mereka dapat menyebabkan badai geomagnetik, yang dapat menyebabkan aurora, kegagalan jaringan listrik, dan gangguan pada operasi satelit.
3. Siklus Matahari sebagai siklus kenampakan bintik matahari mempunyai periode sekitar 11 tahun atau dikenal sebagai siklus matahari yang mempengaruhi frekuensi dan intensitas aktivitas matahari. Selama fase maksimum, Matahari menunjukkan lebih banyak bintik matahari, ledakan matahari, dan CME. Cuaca Antariksa ekstrem terjadi saat fase maksimum. Sebaliknya, selama fase minimum, aktivitas matahari menurun, yang menyebabkan peristiwa cuaca antariksa relatif tenang. Siklus Matahari mencerminkan iklim antariksa. Distribusi sinar kosmik atau proton energi sangat tinggi yang berasal dari luar tata surya mempunyai sifat antikorelasi dengan jumlah bintik matahari [16].
4. Magnetosfer Bumi berfungsi sebagai perisai pelindung terhadap angin matahari. Ini adalah wilayah ruang angkasa yang didominasi oleh medan magnet Bumi, yang membelokkan sebagian besar partikel angin matahari. Namun, selama peristiwa matahari yang intens, magnetosfer dapat terkompresi, memungkinkan partikel bermuatan untuk menembus lebih dalam ke atmosfer Bumi, menyebabkan badai geomagnetik.

B. Dampak Cuaca Antariksa

Cuaca antariksa dapat menimbulkan berbagai dampak di Bumi, diantaranya adalah

1. Gangguan Satelit: Partikel berenergi tinggi dapat merusak komponen satelit dan mengganggu operasi orbitnya, sehingga memengaruhi sistem komunikasi, navigasi, dan gerak dalam orbit [17].
2. Aurora: Partikel bermuatan dari angin matahari berinteraksi dengan medan magnet dan bertabrakan dengan molekul atmosfer Bumi di daerah lintang tinggi. Partikel-partikel tersebut dapat menciptakan tampilan cahaya yang indah yang dikenal sebagai aurora
3. Kegagalan Jaringan Listrik di Permukaan Bumi: Badai geomagnetik dapat menyebabkan arus listrik di atmosfer dan mengalir melalui kabel saluran listrik. Kelebihan beban listrik

dalam transformator gardu-gardu listrik menyebabkan panas berlebih, yang berpotensi kebakaran dan menyebabkan pemadaman listrik secara luas.

4. Bahaya Radiasi: Peningkatan tingkat radiasi selama peristiwa matahari dapat menimbulkan risiko bagi antariksawan dan penerbangan komersial di lintang tinggi, terutama di atas wilayah kutub.

Cuaca luar angkasa dapat secara signifikan mempengaruhi komunikasi satelit dalam beberapa cara:

1. Gangguan Sistem Komunikasi atau Navigasi: Komunikasi dan navigasi dari bumi ke satelit, dan sebaliknya dipengaruhi oleh cuaca antariksa karena gangguan ionosfer. Lapisan ionosfer, yang dapat memantulkan, membiaskan, atau menyerap gelombang radio, termasuk sinyal radio dari satelit *Global Positioning System* (GPS). Cuaca antariksa dapat mengubah struktur kerapatan elektron di ionosfer, sehingga menciptakan area dengan kerapatan elektron yang lebih tinggi. Modifikasi ionosfer ini membuat penalaran sinyal radio GPS menjadi kurang akurat dan bahkan dapat menyebabkan hilangnya sinyal karena ionosfer dapat bertindak sebagai lensa atau cermin bagi gelombang radio yang melewatinya. Cuaca antariksa dapat menyebabkan hilangnya komunikasi *High Frequency* (HF) secara total (*radio blackout*), karena atenuasi ketika sinyal radio melintasi ionosfer.
2. Kerusakan Satelit: Partikel berenergi tinggi dari cuaca antariksa dapat mempengaruhi lapisan pelindung dan komponen elektronik satelit, sehingga menyebabkan kesalahan operasi atau kerusakan peralatan yang dapat membuat satelit tidak dapat beroperasi.

Dengan demikian, cuaca antariksa dapat menimbulkan dampak yang signifikan terhadap komunikasi dan navigasi satelit, yaitu mempengaruhi keakuratan sistem GPS, menyebabkan kerusakan peralatan, dan bahkan menyebabkan hilangnya komunikasi secara total.

Berikut ini adalah beberapa contoh kerusakan satelit dan gangguan komunikasi satelit akibat badai matahari:

1. Satelit Starlink: Pada tanggal 4 Februari 2022, SpaceX meluncurkan 49 satelit sebagai bagian dari proyek internet Starlink milik Elon Musk, yang sebagian besar terbakar di atmosfer beberapa hari kemudian. Penyebab kegagalan senilai lebih dari \$50 juta ini adalah badai geomagnetik yang disebabkan oleh Matahari.
2. Badai Matahari pada tahun 1989 dan 2003: Selama badai matahari besar pada tahun 1989 dan 2003, sistem pertahanan kedirgantaraan Amerika dan Kanada, Norad, kehilangan jejak banyak satelitnya selama beberapa hari.
3. Badai Matahari pada tahun 2017: Pada tahun 2017, dua suar matahari yang sangat besar melesat keluar dari permukaan Matahari dan mengganggu perangkat seperti sistem navigasi GPS di Bumi.
4. Badai Matahari pada Mei 2024: Badai Matahari yang menyebabkan aurora yang menyilaukan di seluruh dunia pada Mei 2024 menyebabkan banyak satelit kehilangan ketinggian, sehingga berisiko tabrakan. Setelah aktivitas badai matahari Mei 2024, para peneliti menemukan bukti bahwa ribuan satelit di orbit rendah Bumi mulai “bermanuver secara massal” untuk mendapatkan kembali ketinggian yang semula.

Sebagian contoh-contoh ini menggambarkan bagaimana badai matahari dapat berdampak signifikan pada komunikasi satelit, menyebabkan gangguan dan bahkan kegagalan sistem satelit. Pemahaman dan prediksi cuaca antariksa sangat penting untuk memitigasi dampak ekonomi terhadap masyarakat yang sangat bergantung pada teknologi antariksa. Pemantauan aktivitas Matahari dan interaksinya dengan magnetosfer Bumi menjadi dasar para ilmuwan untuk meningkatkan prakiraan cuaca antariksa dan mengembangkan strategi untuk melindungi infrastruktur teknologi antariksa dari dampak yang berpotensi kerugian ekonomi yang sangat besar.

C. Skala Cuaca Antariksa

Teknologi telah berkembang, dan para ilmuwan telah memperoleh pengetahuan tentang peristiwa cuaca luar angkasa yang ekstrem setelah badai geomagnetik bersejarah seperti badai matahari Halloween pada bulan Oktober 2003 dan peristiwa Gannon pada bulan Mei 2024. Skala Cuaca Antariksa NOAA diperkenalkan pada tahun 1999 sebagai cara untuk mengkomunikasikan kepada masyarakat umum tentang kondisi cuaca antariksa saat ini dan di masa depan serta kemungkinan dampaknya terhadap manusia dan sistem keantariksaan. Saat itu cuaca antariksa mulai populer dengan diperkenalkannya teknologi baru, yaitu satelit dengan beragam detektor, untuk mempelajari cuaca di luar angkasa. Pesawat ruang angkasa dilengkapi dengan berbagai instrumen untuk mempelajari angin matahari dan juga memonitor aktivitas matahari dengan resolusi waktu detik. Cuaca antariksa benar-benar mulai berkembang sebagai ilmu pengetahuan yang diminati di berbagai sektor, termasuk industri pertahanan, karena ketika setiap teknologi baru diperkenalkan, dikembangkan, dan kerentanan terhadap cuaca antariksa pun berkembang semakin kompleks.

Banyak produk data dan prediksi cuaca antariksa yang menggambarkan lingkungan antariksa, tetapi hanya sedikit yang menggambarkan efek yang dapat dialami akibat gangguan lingkungan. Skala ini berguna bagi pengguna produk dan ilmuwan dan pengguna yang tertarik dengan efek cuaca antariksa terhadap sistem teknologi antariksa, terutama untuk kondisi ekstrim [18,19].

Skala ini menggambarkan gangguan lingkungan untuk tiga jenis peristiwa: badai geomagnetik (*geomagnetic storm*), badai radiasi matahari (*solar radiation storm*), dan badai radio (*radio blackout*). Skala cuaca antariksa dapat diakses melalui laman <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>. Skala ini memiliki tingkat-tingkat yang diberi nomor, serupa dengan badai, tornado, dan gempa bumi yang menunjukkan tingkat keparahan. Skala tersebut mencantumkan efek yang mungkin terjadi pada setiap tingkat. Skala ini juga menunjukkan seberapa sering peristiwa tersebut terjadi, dan memberikan ukuran intensitas penyebab fisiknya. Dengan demikian, Skala Cuaca Antariksa NOAA dibuat sebagai acuan atau standar untuk mengklasifikasikan kondisi cuaca antariksa dan mengkomunikasikan dampaknya terhadap manusia dan sistem dengan cara yang mirip dengan cara badai atau gempa bumi diklasifikasikan. Hal ini memudahkan semua orang untuk memahami potensi dampak keparahan dan dampak dari peristiwa cuaca Antariksa terhadap semua sistem berbasis antariksa.

Skala Cuaca Antariksa NOAA bekerja dengan menggambarkan gangguan lingkungan untuk tiga jenis peristiwa: badai geomagnetik, badai radiasi matahari, dan pemadaman radio. Berikut ini adalah gambaran singkat tentang cara kerjanya:

1. Tingkat Bernomor: Skala ini memiliki level-level bernomor, mirip dengan skala yang digunakan untuk badai, tornado, dan gempa bumi, yang menunjukkan tingkat keparahan kejadian cuaca antariksa. Setiap tingkat dikaitkan dengan efek spesifik yang dapat diperkirakan terjadi di Bumi dan di luar angkasa.
2. Jenis Kejadian: Skala ini dirancang untuk menggambarkan gangguan lingkungan untuk tiga jenis peristiwa tertentu:
 - a. Badai Geomagnetik (Tabel 1): Ini adalah gangguan pada magnetosfer Bumi yang disebabkan oleh perubahan angin matahari. Skala badai geomagnetik berkisar dari G1 (Kecil) hingga G5 (Ekstrem), dengan setiap tingkat menunjukkan tingkat keparahan kondisi dan potensi efeknya terhadap sistem daya tenaga listrik, operasi pesawat ruang angkasa, dan sistem lainnya dan fenomena alam, misalkan arus Listrik pada jaringan pipa, komunikasi radio HF, navigasi ataupun kenampakan aurora pada lintang tertentu.
 - b. Badai Radiasi Matahari (Tabel 2): Badai ini terjadi ketika letusan magnetik berskala besar, yang sering dikaitkan dengan suar matahari, mempercepat partikel bermuatan di atmosfer matahari dan mengirimkannya ke tata surya. Skala badai radiasi matahari berkisar dari S1 (Kecil) hingga S5 (Ekstrem), yang mengindikasikan tingkat keparahan radiasi matahari dan efek potensial pada manusia yang bekerja di

antariksa, permukaan planet selain Bumi, operasi pesawat ruang angkasa atau satelit, penerbangan ruang angkasa manusia, dan sistem komunikasi dan navigasi.

- c. Badai Radio (Tabel 3): Ini adalah gangguan yang memengaruhi lapisan ionosfer atmosfer Bumi dan disebabkan oleh emisi sinar-X dari Matahari. Skala pemadaman radio berkisar dari R1 (Kecil) hingga R5 (Ekstrem), yang menunjukkan tingkat keparahan terputusnya sinyal radio dan potensi dampaknya terhadap komunikasi radio frekuensi tinggi, sinyal navigasi, dan komunikasi frekuensi rendah yang digunakan pada jaringan listrik.
3. Efek yang Mungkin Terjadi: Setiap tingkat pada skala mencantumkan kemungkinan efek yang dapat terjadi pada tingkat tersebut. Sebagai contoh, badai geomagnet G5 (Ekstrem) dapat menyebabkan sistem tenaga listrik mengalami masalah kontrol tegangan yang meluas dan bahkan pemadaman listrik. Variasi dampak teknologi dan biologis bergantung terhadap laporan-laporan ataupun hasil penelitian.
4. Ukuran Fisik dan Frekuensi: Skala ini juga memberikan ukuran intensitas penyebab fisik dari kejadian-kejadian tersebut, dan menunjukkan seberapa sering kejadian tersebut kemungkinan terjadi. Hal ini biasanya diberikan dalam bentuk frekuensi rata-rata per siklus matahari, yaitu sekitar 11 tahun. Frekuensi kejadian masih merupakan bagian yang sulit diprediksi, karena banyak faktor-faktor mekanisme fisis Matahari yang belum diketahui, misalkan pergerakan bintik matahari, pemicu ledakan matahari dan lontaran massa korona, topologi dan pelepasan energi magnetik. Demikian pula, penyaluran energi di ruang antarplanet masih belum banyak dipelajari.

Prediksi cuaca antariksa adalah bidang yang kompleks dengan beberapa tantangan yang signifikan. Salah satu masalah utamanya adalah terbatasnya pemahaman tentang fenomena matahari. Ledakan matahari dan lontaran massa korona (CME) adalah penyebab utama cuaca antariksa, tetapi memprediksi kemunculan dan intensitasnya sulit dilakukan karena interaksi medan magnet di Matahari yang rumit dan belum sepenuhnya dipahami. Peristiwa ini dapat melepaskan sejumlah besar energi dan partikel bermuatan, yang berdampak pada magnetosfer Bumi dan sistem teknologi. Tantangan lainnya adalah kelangkaan dan kualitas data pengamatan. Cuaca antariksa bergantung pada data dari satelit dan instrumen berbasis di darat, tetapi sumber-sumber ini sering kali tidak terdistribusi secara seragam, dan terkadang tidak tersinkronisasi. Kurangnya data yang komprehensif ini menyulitkan pembuatan model dan prakiraan yang akurat. Selain itu, banyak satelit yang ada sudah menua, dan ada kebutuhan akan instrumen pemantauan cuaca antariksa yang lebih canggih dan berdedikasi. Model komputasi yang digunakan untuk prediksi cuaca antariksa juga merupakan rintangan yang signifikan. Tidak seperti model cuaca terestrial, yang telah diuntungkan oleh pengembangan selama beberapa dekade dan data yang sangat banyak, model cuaca antariksa masih relatif belum matang. Model-model ini membutuhkan peningkatan dalam hal resolusi, akurasi, dan kemampuan untuk mensimulasikan interaksi antara matahari dan bumi yang kompleks. Meningkatkan model-model ini menuntut sumber daya komputasi yang signifikan dan algoritme yang canggih. Komunikasi dan koordinasi antara berbagai lembaga pemantau cuaca antariksa di seluruh dunia bisa jadi tidak konsisten. Prediksi dan mitigasi cuaca antariksa yang efektif memerlukan pembagian data dan penyebaran peringatan yang tepat waktu. Namun, perbedaan format data, standar, dan protokol komunikasi dapat menyebabkan penundaan dan ketidakefisienan. Terakhir, ada tantangan kesadaran dan kesiapsiagaan masyarakat. Cuaca antariksa dapat berdampak parah pada operasi satelit, jaringan listrik, penerbangan, dan sistem komunikasi, namun hal ini tidak terlalu dikenal atau dipahami oleh masyarakat umum dan pembuat kebijakan. Meningkatkan kesadaran dan mengembangkan strategi mitigasi yang kuat sangat penting untuk meminimalkan risiko yang terkait dengan peristiwa cuaca antariksa.

TABEL 1. SKALA CUACA ANTARIKSA NOAA BADAI GEOMAGNET

Skala		Dampak	Acuan fisis, indeks Kp	Kejadian rata-rata / siklus
G 5	Ekstrim	Sistem daya: Masalah kontrol tegangan yang meluas dan masalah sistem proteksi dapat terjadi, beberapa sistem jaringan dapat mengalami keruntuhan atau pemadaman total. Transformator dapat mengalami kerusakan.	Kp = 9	4
		Operasi pesawat ruang angkasa: Dapat mengalami pengisian daya di permukaan (<i>surface charging</i>) yang ekstensif, masalah dengan orientasi, uplink/downlink, dan pelacakan satelit.		
		Sistem lainnya: Arus pipa dapat mencapai ratusan ampere, propagasi radio HF (frekuensi tinggi) mungkin tidak dapat dilakukan di banyak area selama satu hingga dua hari, navigasi satelit dapat mengalami degradasi selama sehari-hari, navigasi radio frekuensi rendah dapat mati selama berjam-jam, dan aurora dapat terlihat di Florida dan Texas selatan (biasanya 40° lintang geomagnetik).		
G 4	Parah	Sistem daya: Kemungkinan masalah kontrol tegangan yang meluas dan beberapa sistem proteksi akan secara keliru mematikan aset penting dari jaringan.	Kp = 8	100
		Operasi pesawat ruang angkasa: Mungkin mengalami masalah pengisian daya dan pelacakan permukaan, koreksi mungkin diperlukan untuk masalah orientasi.		
		Sistem lainnya: Arus pipa yang diinduksi mempengaruhi tindakan pencegahan, propagasi radio HF secara sporadis, navigasi satelit menurun selama berjam-jam, navigasi radio frekuensi rendah terganggu, dan aurora telah terlihat serendah Alabama dan California bagian utara (biasanya 45° lintang geomagnetik).		
G 3	Kuat	Sistem daya: Koreksi tegangan mungkin diperlukan, alarm palsu terpicu pada beberapa perangkat perlindungan.	Kp = 7	200
		Operasi pesawat ruang angkasa: Pengisian daya permukaan dapat terjadi pada komponen satelit, hambatan dapat meningkat pada satelit yang mengorbit rendah di Bumi, dan koreksi mungkin diperlukan untuk masalah orientasi.		
		Sistem lainnya: Navigasi satelit yang terputus-putus dan masalah navigasi radio frekuensi rendah dapat terjadi, radio HF mungkin terputus-putus, dan aurora telah terlihat serendah Illinois dan Oregon (biasanya pada lintang geomagnetik 50°).		
G 2	Sedang	Sistem daya: Sistem daya lintang tinggi dapat mengalami alarm tegangan, badai berdurasi panjang dapat menyebabkan kerusakan transformator.	Kp = 6	600
		Operasi pesawat ruang angkasa: Tindakan korektif terhadap orientasi mungkin diperlukan oleh kontrol darat; kemungkinan perubahan dalam hambatan mempengaruhi prediksi orbit.		
		Sistem lainnya: Perambatan radio HF dapat memudar pada lintang yang lebih tinggi, dan aurora telah terlihat serendah New York dan Idaho (biasanya pada lintang geomagnetik 55°).		
G 1	Lemah	Sistem daya: Fluktuasi jaringan listrik yang lemah dapat terjadi.	Kp = 5	1700
		Operasi pesawat ruang angkasa: Mungkin terjadi dampak kecil pada operasi satelit.		
		Sistem lainnya: Hewan-hewan yang bermigrasi terpengaruh pada tingkat ini dan tingkat yang lebih tinggi; aurora biasanya terlihat di lintang tinggi (Michigan utara dan Maine).		

TABEL 2. SKALA CUACA ANTARIKSA NOAA BADAI RADIASI MATAHARI

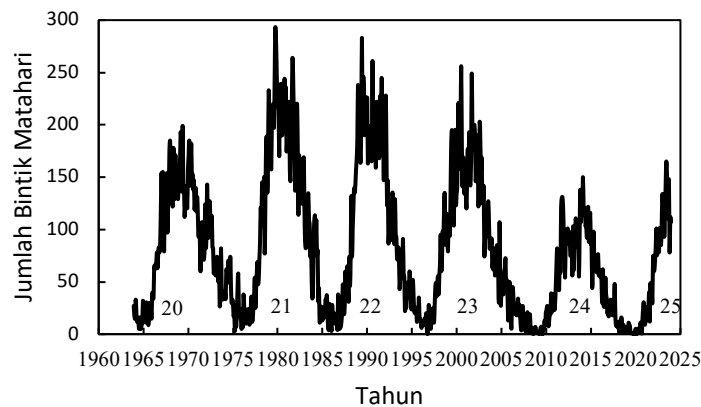
Skala		Dampak	Acuan fisis, fluks proton, $E \geq 10$ MeV	Kejadian rata-rata / siklus
S 5	Ekstrim	Biologis: Bahaya radiasi tinggi yang tidak dapat dihindari bagi para astronot dalam EVA (aktivitas ekstra kendaraan); penumpang dan kru dalam pesawat yang terbang tinggi di lintang tinggi dapat terpapar risiko radiasi.	100000	0-1
		Operasi satelit: Satelit dapat menjadi tidak berguna, dampak memori dapat menyebabkan hilangnya kendali, dapat menyebabkan gangguan serius pada data gambar, pelacak bintang mungkin tidak dapat menemukan sumbernya; kerusakan permanen pada panel surya mungkin terjadi.		
		Sistem lainnya: Pemadaman total komunikasi HF (frekuensi tinggi) mungkin terjadi di daerah kutub, dan kesalahan posisi membuat operasi navigasi menjadi sangat sulit.		
S 4	Parah	Biologis: Bahaya radiasi yang tidak dapat dihindari oleh astronot dalam EVA; penumpang dan kru dalam pesawat yang terbang tinggi di lintang tinggi dapat terpapar risiko radiasi.	10000	3
		Operasi satelit: Dapat mengalami masalah perangkat memori dan kebisingan pada sistem pencitraan; masalah pelacak bintang dapat menyebabkan masalah orientasi, dan efisiensi panel surya dapat menurun.		
		Sistem lainnya: Kemungkinan terjadi pemadaman komunikasi radio HF di daerah kutub dan peningkatan kesalahan navigasi selama beberapa hari.		
S 3	Kuat	Biologis: Penghindaran bahaya radiasi direkomendasikan untuk astronot dalam EVA; penumpang dan awak dalam pesawat yang terbang tinggi di lintang tinggi dapat terpapar risiko radiasi.	1000	10
		Operasi satelit: Gangguan pada kejadian tunggal, gangguan pada sistem pencitraan, dan sedikit penurunan efisiensi pada panel surya mungkin terjadi.		
		Sistem lainnya: Penurunan propagasi radio HF melalui daerah kutub dan kemungkinan kesalahan posisi navigasi.		
S 2	Sedang	Biologis: Penumpang dan awak pesawat yang terbang tinggi di lintang tinggi dapat terpapar risiko radiasi yang tinggi.	100	25
		Operasi satelit: Gangguan tunggal yang jarang terjadi mungkin terjadi.		
		Sistem lainnya: Efek kecil pada propagasi HF melalui daerah kutub dan navigasi di lokasi kutub mungkin terpengaruh.		
S 1	Lemah	Biologis: Tidak ada.	10	50
		Operasi satelit: Tidak ada.		
		Sistem lainnya: Dampak kecil pada radio HF di daerah kutub.		

TABEL 3. SKALA CUACA ANTARIKSA NOAA BADAI RADIO

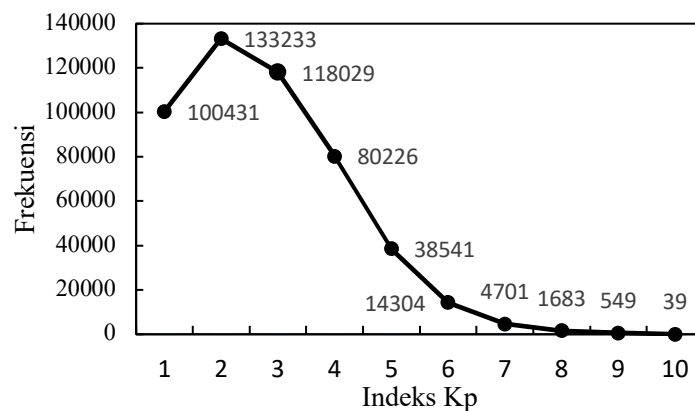
Skala		Dampak	Acuan fisis, intensitas maks. sinar-X ledakan matahari	Kejadian rata-rata / siklus
R 5	Ekstrim	Radio HF: Pemadaman total radio HF (frekuensi tinggi) di seluruh sisi Bumi yang diterangi matahari yang berlangsung selama beberapa jam. Hal ini mengakibatkan tidak ada kontak radio HF dengan pelaut dan penerbang dalam perjalanan di sektor ini.	X20	0-1
		Navigasi: Sinyal navigasi frekuensi rendah yang digunakan oleh sistem penerbangan maritim dan penerbangan umum mengalami pemadaman di sisi Bumi yang diterangi matahari selama berjam-jam, sehingga menyebabkan hilangnya penentuan posisi. Meningkatnya kesalahan navigasi satelit dalam penentuan posisi selama beberapa jam di sisi Bumi yang diterangi matahari, yang dapat menyebar ke sisi malam.		
R 4	Parah	Radio HF: Pemadaman komunikasi radio HF di sebagian besar sisi Bumi yang disinari matahari selama satu hingga dua jam. Kontak radio HF hilang selama waktu ini.	X10	8
		Navigasi: Pemadaman sinyal navigasi frekuensi rendah menyebabkan peningkatan kesalahan dalam penentuan posisi selama satu hingga dua jam. Gangguan kecil navigasi satelit mungkin terjadi di sisi Bumi yang disinari matahari.		
R 3	Kuat	Radio HF: Pemadaman komunikasi radio HF di area yang luas, kehilangan kontak radio selama sekitar satu jam di sisi Bumi yang disinari matahari.	X1	175
		Navigasi: Sinyal navigasi frekuensi rendah menurun selama sekitar satu jam.		
R 2	Sedang	Radio HF: Pemadaman terbatas komunikasi radio HF di sisi yang diterangi matahari, kehilangan kontak radio selama puluhan menit.	M5	350
		Navigasi: Penurunan sinyal navigasi frekuensi rendah selama puluhan menit.		
R 1	Lemah	Radio HF: Degradasi komunikasi radio HF yang lemah atau kecil pada sisi yang diterangi matahari, sesekali kehilangan kontak radio.	M1	2000
		Navigasi: Sinyal navigasi frekuensi rendah terdegradasi untuk interval singkat.		

III. DATA PENELITIAN

Parameter fisis untuk mengkuantisasi tiga jenis skala cuaca Antariksa diperoleh dari laman <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>. Interval waktu data yang dipergunakan adalah rata-rata setiap satu jam. Gambar 1 memperlihatkan distribusi jumlah bintang matahari dalam rentang tahun 1963-2023, yang mencakup 6 siklus matahari dengan periode rata-rata sekitar 11 tahun. Aktivitas matahari semakin kuat untuk puncak siklus yang tinggi atau jumlah maksimal bintang yang tinggi. Sebaliknya, puncak jumlah bintang yang rendah berkorelasi dengan aktivitas matahari yang lebih tenang.



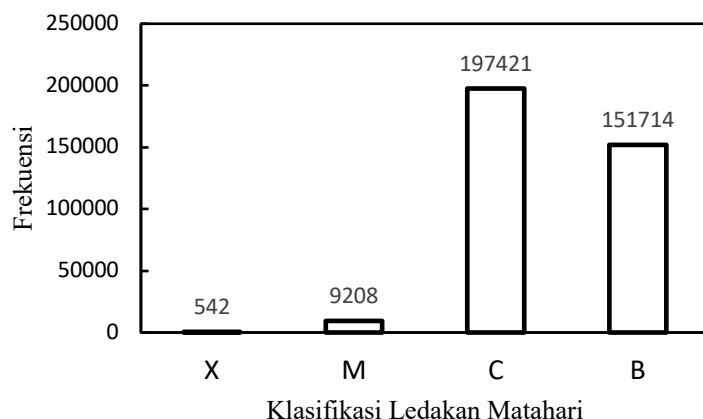
Gambar 1. Distribusi jumlah bintang matahari rata-rata bulanan sebagai cerminan siklus matahari ke-20 sampai 25.



Gambar 1. Distribusi indeks Kp dalam skala Badai Geomagnet dalam rentang tahun 1963-2019 (N= 491736)

Skala Cuaca Antariksa NOAA menggunakan indeks Kp karena indeks ini merupakan indikator yang sangat baik untuk gangguan pada medan magnet bumi. Indeks Kp mengukur aktivitas geomagnet pada skala 0 hingga 9, dengan nilai yang lebih tinggi menunjukkan gangguan yang lebih signifikan¹. Skala ini membantu NOAA untuk mengkomunikasikan tingkat keparahan badai geomagnet dan potensi dampaknya terhadap sistem seperti jaringan listrik, operasi pesawat ruang angkasa, dan komunikasi radio secara efektif¹².

Indeks Kp diperoleh dari pengukuran yang dilakukan oleh magnetometer di berbagai observatorium di seluruh dunia, memastikan representasi yang komprehensif dan akurat dari aktivitas geomagnet global



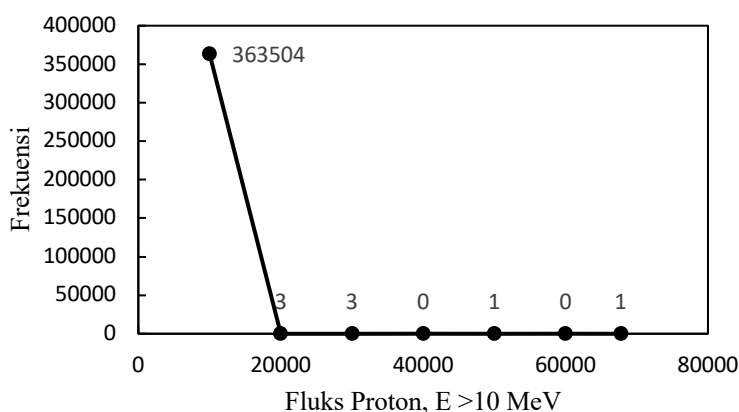
Gambar 2. Distribusi klasifikasi ledakan matahari dalam skala Badai Radiasi rentang tahun 1986-2023 (N= 358885).

Skala Cuaca Antariksa NOAA menggunakan intensitas sinar-X dari ledakan matahari kelas X dan M, karena klasifikasi ini secara efektif mengkomunikasikan potensi dampak ledakan matahari di Bumi. Intensitas ledakan matahari kelas X dan M merupakan erupsi matahari yang paling kuat, dengan kelas X sebagai yang terkuat. Suar ini dapat menyebabkan gangguan signifikan pada komunikasi radio frekuensi tinggi (HF), sinyal navigasi, dan bahkan jaringan listrik.

2. Prediktabilitas dan Kesiapsiagaan: Dengan mengklasifikasikan ledakan matahari ke dalam kategori seperti X dan M, NOAA dapat memberikan informasi yang jelas dan dapat ditindaklanjuti. Sebagai contoh, suar kelas M dapat menyebabkan pemadaman radio singkat di kutub, sementara suar kelas X dapat menyebabkan gangguan yang lebih luas dan parah.

3. Standardisasi: Sistem klasifikasi (A, B, C, M, X) didasarkan pada puncak emisi sinar X melalui seri satelit *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), Amerika Serikat, sehingga menjadi cara yang terstandarisasi untuk mengukur dan mengomunikasikan intensitas ledakan matahari.

Sistem ini membantu para ilmuwan, insinyur, dan masyarakat untuk memahami potensi risiko dan mengambil tindakan pencegahan yang diperlukan.



Gambar 3. Distribusi indeks fluks proton ($E > 10$ MeV) dalam skala Badai Radio dalam rentang tahun 1963-2019 (N= 363512)

IV. HASIL PENELITIAN

Skala Cuaca Antariksa NOAA menggunakan proton matahari dengan energi lebih besar dari 10 MeV (mega-elektron volt) karena proton ini merupakan indikator signifikan badai radiasi matahari. Badai ini menimbulkan berbagai dampak pada sistem satelit, komunikasi frekuensi tinggi (HF), sistem navigasi, dan bahkan efek biologis pada antariksawan dan penerbangan komersial di ketinggian >10 km. Ambang batas 10 MeV dipilih karena proton pada tingkat energi ini cukup energik untuk menembus magnetosfer dan atmosfer bumi, menyebabkan gangguan. Skala ini membantu dalam mengkomunikasikan tingkat keparahan badai ini dan potensi dampaknya kepada publik, pemangku kepentingan terkait dan operator komunikasi/navigasi.

Dalam Tabel 4, rata-rata semua tingkat skala badai geomagnet (skala G) lebih tinggi dari acuan NOAA, lebih dari 100% untuk semua tingkatan. Kelas G5, sebagai skala ekstrim mempunyai frekuensi kejadian 195% relatif terhadap acuan NOAA. Potensi gangguan atau kemungkinan dampak buruk Badai Geomagnet terhadap sistem daya tenaga listrik, operasi pesawat ruang angkasa, dan sistem lainnya dan fenomena alam, misalkan arus listrik pada jaringan pipa, komunikasi radio HF, dan navigasi juga akan meningkat. Demikian pula dalam Tabel 5, skala badai radiasi matahari, frekuensi kejadian per siklus jauh lebih tinggi dibandingkan nilai acuan NOAA, yaitu untuk kelas S1-S3 yang melebihi 1000%. Tetapi kondisi ekstrim, S1 masih sesuai dengan acuan NOAA. Tabel 6 juga memperlihatkan kejadian rata-rata per siklus yang lebih tinggi dari nilai acuan NOAA. Tingkatan ekstrim dan parah terjadi lebih sering sebesar 167% dan 100%. Dari sisi aspek kejadian rata-rata per siklus, skala NOAA memerlukan revisi nilai acuan.

TABEL 4. PERBANDINGAN KEJADIAN RATA-RATA DALAM SKALA BADAI GEOMAGNET

Skala NOAA		Indeks Kp	Acuan NOAA /siklus	Kejadian Rata-rata					Relatif terhadap NOAA (%)
				Siklus 20	Siklus 21	Siklus 22	Siklus 23	Siklus 24	
				Okt1964-Mar1976	Mar1976-Sep1986	Sep1986-Ags1996	Ags1996-Des2008	Des2008-Des2019	
G 5	Ekstrim	>9	4	12	9	6	12	0	195.0
G 4	Parah	8-9	100	105	126	144	162	12	109.8
G 3	Kuat	7-8	200	318	453	456	387	63	167.7
G 2	Sedang	6-7	600	891	1251	1281	912	324	155.3
G 1	Lemah	5-6	1700	3000	3687	3573	2661	1239	166.6

TABEL 5. PERBANDINGAN KEJADIAN RATA-RATA DALAM SKALA BADAI RADIASI MATAHARI

Skala NOAA		Fluks proton $E \geq 10$ MeV	Acuan NOAA /siklus	Kejadian Rata-rata					Relatif terhadap NOAA (%)
				Siklus 20	Siklus 21	Siklus 22	Siklus 23	Siklus 24	
				Okt1964-Mar1976	Mar1976-Sep1986	Sep1986-Ags1996	Ags1996-Des2008	Des2008-Des2019	
S 5	Ekstrim	100,000	0-1	0	0	0	0	0	0.0
S 4	Parah	10,000	3	8	0	0	0	0	53.3
S 3	Kuat	1000	10	77	58	176	138	76	1050.0
S 2	Sedang	100	25	372	380	468	618	261	1679.2
S 1	Lemah	10	50	1210	1432	1350	1448	1178	2647.2

TABEL 6. PERBANDINGAN KEJADIAN RATA-RATA DALAM SKALA BADAI RADIO

Skala NOAA	Kelas Ledakan Matahari Sinar-X	Acuan NOAA/siklus	Kejadian Rata-rata			Relatif terhadap NOAA (%)
			Siklus 22 Sep1986- Ags1996	Siklus 23 Ags1996- Des2008	Siklus 24 Des2008- Des2019	
R5 Ekstrim	>X20	0-1	0	5	0	166.7
R4 Parah	$10 \leq X < 20$	8	17	5	2	100.0
R3 Kuat	$1 \leq X < 10$	175	251	173	75	95.0
R2 Sedang	$\geq M5; < X1$	350	339	217	109	63.3
R1 Lemah	$1 \leq M < 5$	2000	4451	2567	1163	136.4

V. KESIMPULAN

Berdasarkan frekuensi kejadian dalam rentang tahun 1963-2023, maka nilai acuan dalam skala cuaca antariksa NOAA jauh lebih kecil dari frekuensi kejadian sebenarnya. Dengan kata lain, dampak yang ditimbulkan oleh variabilitas cuaca antariksa berpotensi lebih besar dari yang diperkirakan, yaitu kerugian ekonomi berupa gangguan sampai kerusakan sistem teknologi antariksa. Skala Badai Geomagnet tingkat kuat (G3) sampai ekstrim (G5), kejadian sebenarnya melebihi 109-195%. Adapun skala Badai Radiasi Matahari Tingkat kuat (S3) sampai ekstrim (S5), berkisar antara 0-1050%. Dalam rentang 5 siklus matahari, tidak pernah terjadi kondisi cuaca antariksa tingkat S5. Parameter fisis untuk Badai Radiasi Matahari memerlukan parameter tambahan. Sedangkan skala cuaca Antariksa, Badai Radio Tingkat kuat (R3) sampai ekstrim (R5) mempunyai kejadian sebenarnya lebih tinggi sebesar 95-166%.

Penelitian penyebab cuaca antariksa sebagai permasalahan magnetohidrodinamika masih sangat terbuka untuk perolehan solusinya dengan tujuan meningkatkan kemampuan dalam prediksi cuaca antariksa. Pemahaman fisis Matahari, magnetosfer dan ionosfer akan menentukan parameter-parameter fisis dalam penyusunan skala cuaca Antariksa. Untuk mengatasi tantangan ini, diperlukan pendekatan multidisiplin, yang menggabungkan kemajuan dalam fisika matahari, peningkatan kemampuan pengamatan, model komputasi yang lebih baik, serta kolaborasi dan komunikasi internasional yang lebih baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih atas terbitnya naskah ini pada Seminar Nasional Sains Teknologi dan Inovasi Indonesia 2024 sebagai bagian kolaborasi/kerjasama penelitian antara Institut Teknologi Bandung dengan Akademi Angkatan Udara.

REFERENSI

- [1] L.J. Lanzerotti, "Space Weather: Historical and Contemporary Perspectives", *Space Sci Rev.*, vol. 212, pp. 1253–1270, 2017.
- [2] A.K. Singh, A. Bhargawa, D. Siingh, and R.P. Singh, "Physics of Space Weather Phenomena: A Review", *Geosciences*, vol. 11, pp. 286, 2021.
- [3] M. Temmer, "Space weather: the solar perspective", *Living Rev Sol Phys*, vol. 18, pp. 4, 2021.
- [4] A.K. Singh, D. Siingh, and R.P. Singh, "Space Weather: Physics, Effects and Predictability", *Surv Geophys*, vol. 31, pp. 581–638, 2010.
- [5] P. Riley, D. Baker, Y.D. Liu, et al., "Extreme Space Weather Events: From Cradle to Grave", *Space Sci Rev*, vol. 214, pp. 21, 2018.

-
- [6] Y. Kubo, et al. *Impact of Space Weather on Various Fields*. In: Kusano, K. (eds) *Solar-Terrestrial Environmental Prediction*. Springer, Singapore, 2023.
 - [7] J. P. Eastwood, E. Biffis, M. A. Hapgood, L. Green, M. M. Bisi, R. D. Bentley, R. Wicks, L.-A. McKinnell, M. Gibbs, and C. Burnett, "The Economic Impact of Space Weather: Where Do We Stand?" *Risk Analysis*, vol. 37, pp. 206, 2017.
 - [8] Eastwood, J. P., Hapgood, M. A., Biffis, E., Benedetti, D., Bisi, M. M., Green, L., et al. "Quantifying the economic value of space weather forecasting for power grids: An exploratory study", *Space Weather*, vol. 16(12), pp. 2052–2067, 2018.
 - [9] Oughton, E. J., Skelton, A., Horne, R. B., Thomson, A. W. P., and Gaunt, C. T., "Quantifying the daily economic impact of extreme space weather due to failure in electricity transmission infrastructure", *Space Weather*, vol. 15(1), pp. 65–83, 2017.
 - [10] Oughton, E. J., Hapgood, M., Richardson, G. S., Beggan, C. D., Thomson, A. W. P., Gibbs, M., et al., "A risk assessment framework for the socioeconomic impacts of electricity transmission infrastructure failure due to space weather: An application to the United Kingdom", *Risk Analysis*, vol. 39(5), pp. 1022–1043, 2019.
 - [11] Hapgood, M., Angling, M.J., Attrill, G., Bisi, M., Cannon, P.S., Dyer, C., et al., "Development of space weather reasonable worst-case scenarios for the UK national risk assessment", *Space Weather*, vol. 19(4), pp. e2020SW002593, 2021.
 - [12] E.K. Fry, "The risks and impacts of space weather: Policy recommendations and initiatives", *Space Policy*, vol. 28(3), pp. 180–184, 2012.
 - [13] Richardson, I. G., "Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere", *Living Reviews in Solar Physics*, vol. 15(1), pp. 1, 2018.
 - [14] Palmerio, E., Lee, C. O., Mays, M. L., Luhmann, J. G., Lario, D., Sánchez-Cano, B., et al., "CMEs and SEPs during November–December 2020: A challenge for real-time space weather forecasting", *Space Weather*, vol. 20(5), pp. e2021SW002993, 2022.
 - [15] Vourlidas, A., Patsourakos, S., and Savani, N. P., "Predicting the geoeffective properties of coronal mass ejections: Current status, open issues and path forward", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 377(2148), pp. 20180096, 2019.
 - [16] A.N.I. Putri, D. Herdiwijaya, and T. Hidayat, "On the Correlation of Cosmic-Ray Intensity with Solar Activity and Interplanetary Parameters", *Solar Physics*, vol. 299, pp. 12, 2024.
 - [17] N. Ahmad, D. Herdiwijaya, T. Djamaluddin, T. et al., "Diagnosing low earth orbit satellite anomalies using NOAA-15 electron data associated with geomagnetic perturbations", *Earth Planets Space*, vol. 70, pp. 91, 2018.
 - [18] M.A. Sharpe, and S.A. Murray, "Verification of space weather forecasts issued by the met office space weather operations centre", *Space Weather*, vol. 15(10), pp. 1383 -1395, 2017.
 - [19] D. Herdiwijaya, "Distribution of solar energetic particles and magnetic field orientations related to strong geomagnetic storms in solar cycle 24", *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1204, pp. 012121, 2019.
-