



Analisis Flare X9.3 (AR 12673) dengan Fluks Proton, TSI, dan TEC sebagai Indikator Temporal antar Parameter

Imas Surlena

imas.122290009@student.itera.ac.id

Sains Atmosfer dan Keplanetan, Institut Teknologi Sumatera,
Lampung, Indonesia

Robiatul Muztaba

robiatul.muztaba@sap.itera.ac.id

Sains Atmosfer dan Keplanetan, Institut Teknologi Sumatera,
Lampung, Indonesia

Nindhita Pratiwi

Nindhita.Pratiwi@sap.itera.ac.id

Sains Atmosfer dan Keplanetan, Institut Teknologi Sumatera,
Lampung, Indonesia

Annisa Novia Indra Putri

annisa.putri@sap.itera.ac.id

Sains Atmosfer dan Keplanetan, Institut Teknologi Sumatera,
Lampung, Indonesia

Alka Budi Wahidin

alka.wahidin@sap.itera.ac.id

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

Aktivitas Matahari dapat menghasilkan *flare* akibat rekoneksi medan magnet di atmosfer Matahari. Salah satu peristiwa ekstrem pada Siklus Matahari 24 adalah *flare* kelas X9.3 yang terjadi pada 6 September 2017 di *Active Region* (AR) 12673. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik temporal *flare* X9.3 berdasarkan fluks *X-ray* (0,1–0,8 nm) serta respons lingkungan dekat Bumi melalui fluks proton (>10 MeV), *Total Solar Irradiance* (TSI), dan *Total Electron Content* (TEC). Data GOES-15, OMNIweb, dan LISIRD dianalisis menggunakan metode deret waktu dan *cross-correlation* pada periode 5–10 September 2017. Hasil menunjukkan fluks *X-ray* mengalami peningkatan sebesar 764,9% dari 5 hingga 6 September 2017 dan mencapai puncak pada 12:02 UT. Berdasarkan hasil *cross-correlation*, fluks proton dan TSI menunjukkan *delay* masing-masing sebesar 4,46 jam dan 8,48 jam, sedangkan TEC menunjukkan peningkatan setelah kejadian *flare*. Hasil penelitian menegaskan adanya keterkaitan temporal antara *flare* Matahari dan respons lingkungan dekat Bumi serta menunjukkan bahwa parameter *X-ray*, proton, TSI, dan TEC dapat digunakan sebagai pendekatan validasi dalam analisis cuaca antariksa.

Keywords: *Flare* X9.3 · AR 12673 · Fluks *X-ray* · Fluks Proton · Ionosfer

PENDAHULUAN

Matahari merupakan sumber utama energi dan radiasi di Tata Surya. Salah satu fenomena aktivitas Matahari adalah *flare*, yaitu pelepasan energi akibat rekoneksi medan magnet di permukaan Matahari (Schrijver, 2010). Rekoneksi medan magnet merupakan mekanisme utama yang menyebabkan pelepasan energi secara tiba-tiba selama peristiwa *flare* Matahari (Priest & Forbes, 2000). Proses rekoneksi medan magnet tersebut menghasilkan radiasi elektromagnetik dalam berbagai panjang gelombang, mulai dari gelombang radio hingga sinar-X, serta melepaskan partikel berenergi tinggi, seperti proton (Benz, 2017).

Flare dikategorikan menjadi beberapa kelas A, B, C, M, dan X berdasarkan intensitas *X-ray* yang terdeteksi oleh satelit *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) (Crane, 2020). *Flare* kelas X merupakan kategori dengan intensitas tertinggi dan dapat meningkatkan radiasi serta fluks proton di lingkungan ruang dekat Bumi (Gopalswamy, 2018). Salah satu peristiwa terbesar pada siklus Matahari ke-24 adalah *flare* kelas X9.3 yang terjadi pada 6 September 2017 di daerah aktif AR 12673

How to Cite: Surlena, I., Putri, A.N.I., Muztaba, R. Wahidin, A.B., & Pratiwi, N. (2026). Analisis Flare X9.3 (AR 12673) dengan Fluks Proton, TSI, dan TEC sebagai Indikator Temporal antar Parameter. *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, 5(1), 56-68. <http://proceedings.upi.edu/index.php/sinafi>

dengan intensitas puncak sinar-X sebesar $9,3 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ berdasarkan pengamatan NOAA GOES (Hathaway D. H., 2010).

Radiasi sinar-X dari *flare* meningkatkan ionisasi pada lapisan D dan E ionosfer sehingga dapat memicu *Sudden Ionospheric Disturbances* (SID) dan gangguan komunikasi radio frekuensi tinggi (*HF blackout*) (Hargreaves, 1992). Selain itu, *flare* juga menghasilkan proton berenergi tinggi yang merupakan bagian dari *Solar Energetic Particles* (SEP) dan berkontribusi terhadap peningkatan ionisasi atmosfer atas (Reames D. V., 2013). Respons ionosfer umumnya dikaji melalui variasi *Total Electron Content* (TEC), sedangkan *Total Solar Irradiance* (TSI) digunakan sebagai indikator perubahan energi radiasi Matahari (Qian, Solomon, & Kane, 2019) (Kopp & Lean, 2011). Berbagai kajian telah membahas respons ionosfer dan lingkungan dekat Bumi terhadap *flare* X9.3 pada 6 September 2017, termasuk melalui parameter TEC dan perubahan radiasi Matahari (A. Yasyukevich, 2018; Qian, Solomon, & Kane, 2019). Namun, analisis yang secara khusus mengkaji keterkaitan temporal antara fluks *X-ray*, fluks proton, TEC, dan TSI dalam satu kerangka analisis masih perlu diperkuat. Oleh karena itu, diperlukan analisis yang lebih komprehensif untuk memahami keterkaitan temporal antarparameter tersebut dalam menggambarkan respons lingkungan ruang dekat Bumi.

Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik temporal *flare* kelas X9.3 yang terjadi pada 6 September 2017 menggunakan data fluks *X-ray* (0,1–0,8 nm) dari NOAA GOES, fluks proton berenergi >10 MeV dari OMNIWeb, *Total Solar Irradiance* (TSI) dari LISIRD, serta *Total Electron Content* (TEC) yang mengacu pada literatur. Analisis dilakukan untuk mengkaji hubungan temporal antara peningkatan fluks *X-ray* dengan respons fluks proton, TSI, dan TEC sebagai indikator respons lingkungan ruang dekat Bumi. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai karakteristik *flare* ekstrem serta kontribusinya terhadap dinamika ionosfer, sekaligus menjadi referensi dalam pengembangan kajian cuaca antariksa.

METODE

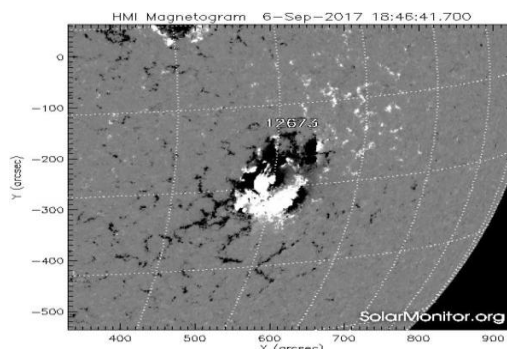
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif untuk menganalisis karakteristik temporal *flare* X9.3 pada 6 September 2017 menggunakan analisis *time series*, korelasi Spearman, dan *Cross-Correlation Function* (CCF).

Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari sumber observasi luar angkasa yang menyediakan informasi aktivitas Matahari secara *real-time*, yang disajikan pada tabel 1.

Tabel 1. Kriteria Data Penelitian

No.	Jenis Data	Parameter	Resolusi Waktu	Sumber
1	<i>Sunspot (flare)</i>	AR 12673	Harian	SolarMonitor.org
2	<i>X-ray</i>	0,1–0,8 nm	Per jam	NOAA-15
3	Proton	>10 MeV	Per jam	OMNIweb
4	TSI	-	Per 6 Jam	LISIRD



Gambar 1. Citra magnetogram Sunspot AR 12673 (SolarMonitor.org, 2017).

AR 12673 memperlihatkan konfigurasi medan magnet yang kompleks. Warna hitam menunjukkan wilayah bermedan magnet negatif, sedangkan warna putih menunjukkan wilayah bermedan magnet positif (Thompson, 2012). Kedekatan kedua polaritas tersebut membentuk *neutral line*, yaitu batas pertemuan medan magnet yang menjadi lokasi potensial terjadinya rekoneksi magnetik dan pelepasan energi *flare* (Hathaway D. H., 2010). Area abu-abu di sekitar kedua polaritas merupakan daerah *penumbra* dengan medan magnet yang relatif lebih lemah.

Pengolahan Data

Pengolahan data *sunspot* dilakukan melalui identifikasi AR 12673 sebagai sumber *flare* kelas X9.3 berdasarkan nomor daerah aktif, posisi heliografis, dan koordinat citra Matahari. Selanjutnya, morfologi *sunspot* diklasifikasikan menggunakan sistem Zurich, McIntosh, dan Hale untuk menilai kompleksitas medan magnet sebagai indikator potensi terjadinya *flare* besar (McIntosh, 1990; K nzel, 1965; George E. Hale, 1919). Analisis dilakukan secara deskriptif tanpa perhitungan matematis.

Pengolahan data *X-ray* diawali dengan ekstraksi data fluks pada panjang gelombang 0,1–0,8 nm dengan resolusi waktu per jam selama 5–10 September 2017. Data dengan resolusi per jam disusun dalam bentuk *time series* untuk mengidentifikasi waktu mulai, puncak, dan akhir *flare* serta menganalisis perubahan temporal fluks *X-ray*. Resolusi per jam digunakan untuk mempertahankan informasi temporal kejadian *flare* yang berlangsung dalam skala waktu relatif singkat, meskipun resolusi ini dapat menghaluskan variasi yang terjadi dalam skala menit. Selanjutnya, data fluks *X-ray* dirata-ratakan berdasarkan hari untuk menggambarkan perubahan aktivitas *X-ray* pada skala harian selama periode pengamatan. Analisis rata-rata harian digunakan untuk menghitung persentase perubahan fluks antarhari dan tidak digunakan untuk menentukan waktu maupun karakteristik impulsif *flare*. Perhitungan rata-rata dilakukan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

Dengan:

- $\bar{x}$: Rata-rata intensitas fluks *X-ray* harian (W/m^2)
- x_i : Nilai fluks pada jam ke- i dalam satu hari (W/m^2)
- n : Jumlah total data dalam satu hari
- $\sum$: Jumlah semuanya

Setelah diperoleh nilai rata-rata fluks harian langkah selanjutnya adalah menghitung seberapa besar persentase perubahan intensitas fluks dari hari sebelumnya ke hari selanjutnya dengan persamaan sebagai berikut:

$$\% \Delta = \frac{\bar{x}_{baru} - \bar{x}_{lama}}{\bar{x}_{lama}} \times 100\% \quad (2)$$

Dengan:

- $\% \Delta$: Persentase kenaikan atau penurunan (%)
- $\bar{x}_{baru}$: Nilai rata-rata hari ini (W/m^2)
- $\bar{x}_{lama}$: Nilai rata-rata hari sebelumnya (W/m^2)

Analisis Kolreasi Spearman (r_s)

Analisis korelasi Spearman (r_s) digunakan untuk mengkaji hubungan antara fluks *X-ray*, fluks proton, TSI, dan TEC selama peristiwa *flare* kelas X9.3. Korelasi Spearman digunakan sebagai acuan untuk menggambarkan kekuatan hubungan antarpameter berdasarkan peringkat (*rank*) data dan dapat menunjukkan hubungan monotonik antarvariabel tanpa mensyaratkan hubungan yang bersifat linear. Interpretasi nilai korelasi Spearman digunakan untuk menggambarkan arah dan kekuatan hubungan antarpameter.

Analisis Cross-correlation

Analisis *cross-correlation* digunakan untuk mengidentifikasi keterlambatan waktu (*time delay*) antara fluks *X-ray* dengan fluks proton dan *Total Solar Irradiance* (TSI) selama peristiwa *flare* X9.3. Data *X-ray* dan proton disetarakan pada resolusi waktu 1 jam, sedangkan data TSI menggunakan resolusi

waktu 6 jam sesuai resolusi aslinya. Seluruh data kemudian dinormalisasi untuk menghilangkan perbedaan skala sebelum dilakukan analisis.

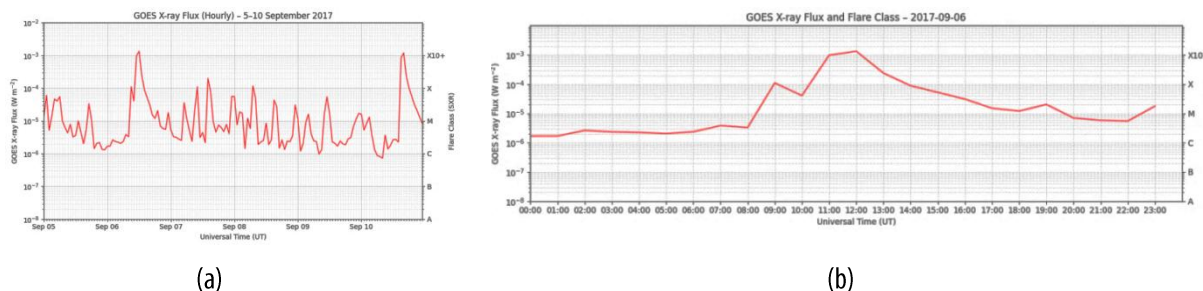
Nilai *lag* yang diperoleh dari *cross-correlation* digunakan untuk menentukan pergeseran waktu yang menghasilkan korelasi terbaik antara dua parameter. Pada analisis *X-ray*-proton, *lag* merepresentasikan waktu respons proton terhadap peningkatan radiasi *X-ray* akibat proses percepatan dan propagasi partikel. Sementara itu, pada analisis *X-ray*-TSI, *lag* digunakan untuk mengevaluasi keterlambatan respons radiasi Matahari total terhadap aktivitas *flare*. Hasil analisis ini digunakan untuk membandingkan karakteristik respons temporal kedua parameter terhadap peningkatan fluks *X-ray*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan citra magnetogram pada 6 September 2017, *sunspot* AR 12673 memiliki klasifikasi Dkc dan konfigurasi magnetik $\beta\gamma\delta$. Klasifikasi tersebut menunjukkan bahwa AR 12673 merupakan kelompok *sunspot* berukuran besar dan kompleks dengan konfigurasi medan magnet yang memiliki gradien medan kuat, sehingga kondisi tersebut mendukung terakumulasinya energi magnetik dalam jumlah besar. Kompleksitas medan magnet dan konfigurasi $\beta\gamma\delta$ pada AR 12673 menjadi kondisi yang mendukung terjadinya rekoneksi magnetik, yang kemudian memicu pelepasan energi secara tiba-tiba dan menghasilkan *flare* kelas X9.3 pada 6 September 2017. Kondisi tersebut juga berkaitan dengan peningkatan fluks proton yang teramati setelah peristiwa *flare*.

Variasi Temporal *Flare X-ray* pada Periode 5–10 September 2017

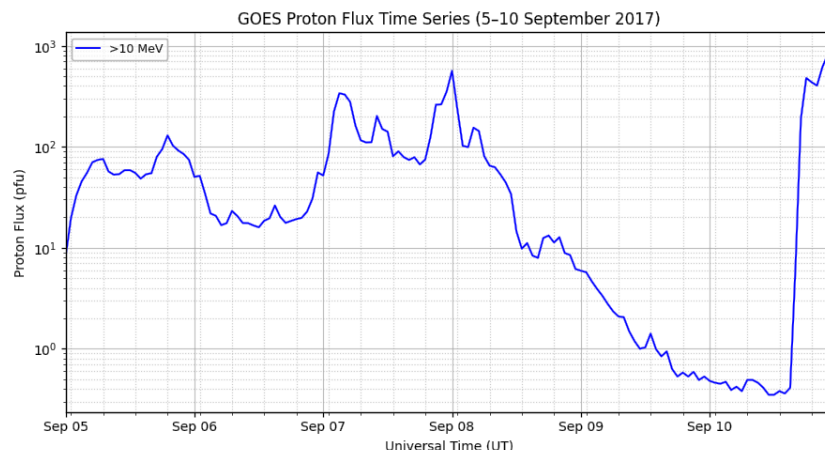
Data fluks *X-ray*, Fluks Proton periode 5–10 September 2017 diolah menjadi resolusi temporal 1 jam dan TSI dengan resolusi 6 jam.



Gambar 2. (a) *X-ray* 5–10 September 2017, (b) 6 September 2017

Gambar 2(a) menunjukkan pola variasi fluks *X-ray* yang sama, yaitu terdiri atas fase sebelum *flare*, fase puncak, dan fase setelah *flare*. Pada fase sebelum *flare*, yaitu 5 September hingga awal 6 September 2017, fluks *X-ray* masih berada pada tingkat latar belakang sekitar orde 10^{-7} – 10^{-6} W/m². Memasuki 6 September 2017 yang ditunjukkan secara spesifik pada Gambar 2(b), fluks mulai meningkat secara bertahap dan mencapai fase puncak sekitar pukul 12.00 UT dengan intensitas maksimum yang diklasifikasikan sebagai *flare* kelas X9.3. Setelah puncak tercapai, fluks *X-ray* menurun secara bertahap hingga kembali mendekati kondisi normal, yang menandai fase peluruhan (*decay phase*) sebagai akibat berakhirnya proses pelepasan energi dari rekoneksi medan magnet. Pola yang serupa kembali terlihat pada 10 September 2017 dengan munculnya *flare* kelas X8.2, menunjukkan bahwa wilayah aktif AR 12673 menghasilkan aktivitas Matahari yang intens selama periode pengamatan.

Variasi fluks proton selama periode 5–10 September 2017 dianalisis menggunakan data yang diperoleh dari OMNIWeb dan telah diolah ke dalam resolusi waktu per jam.



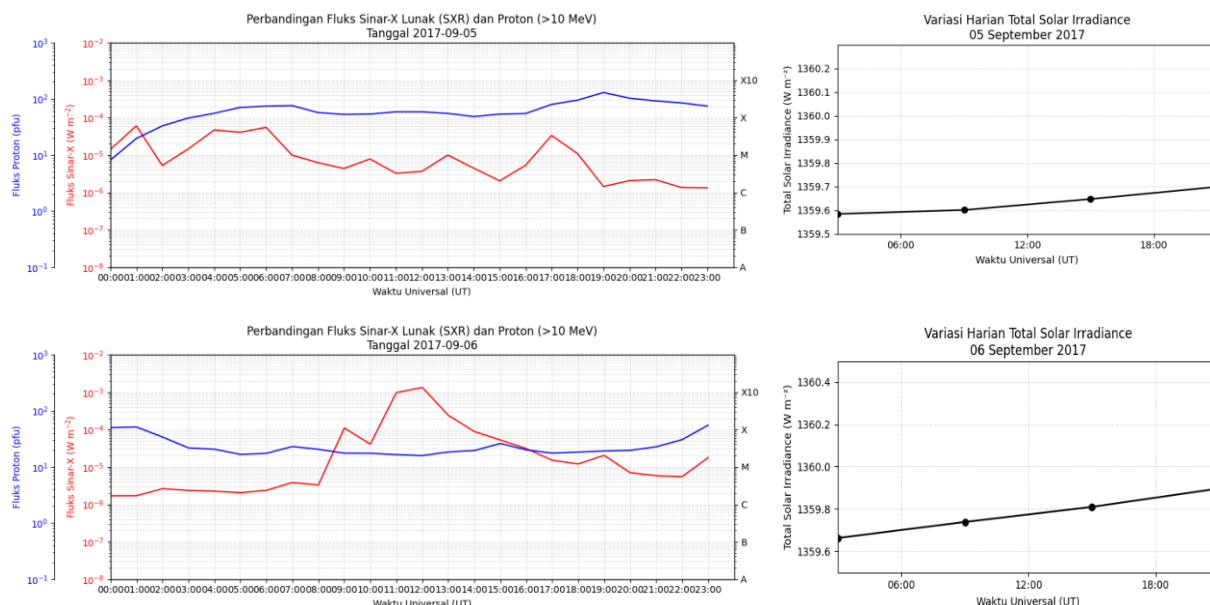
Gambar 3. Fluktuasi fluks proton tanggal 5–10 September 2017

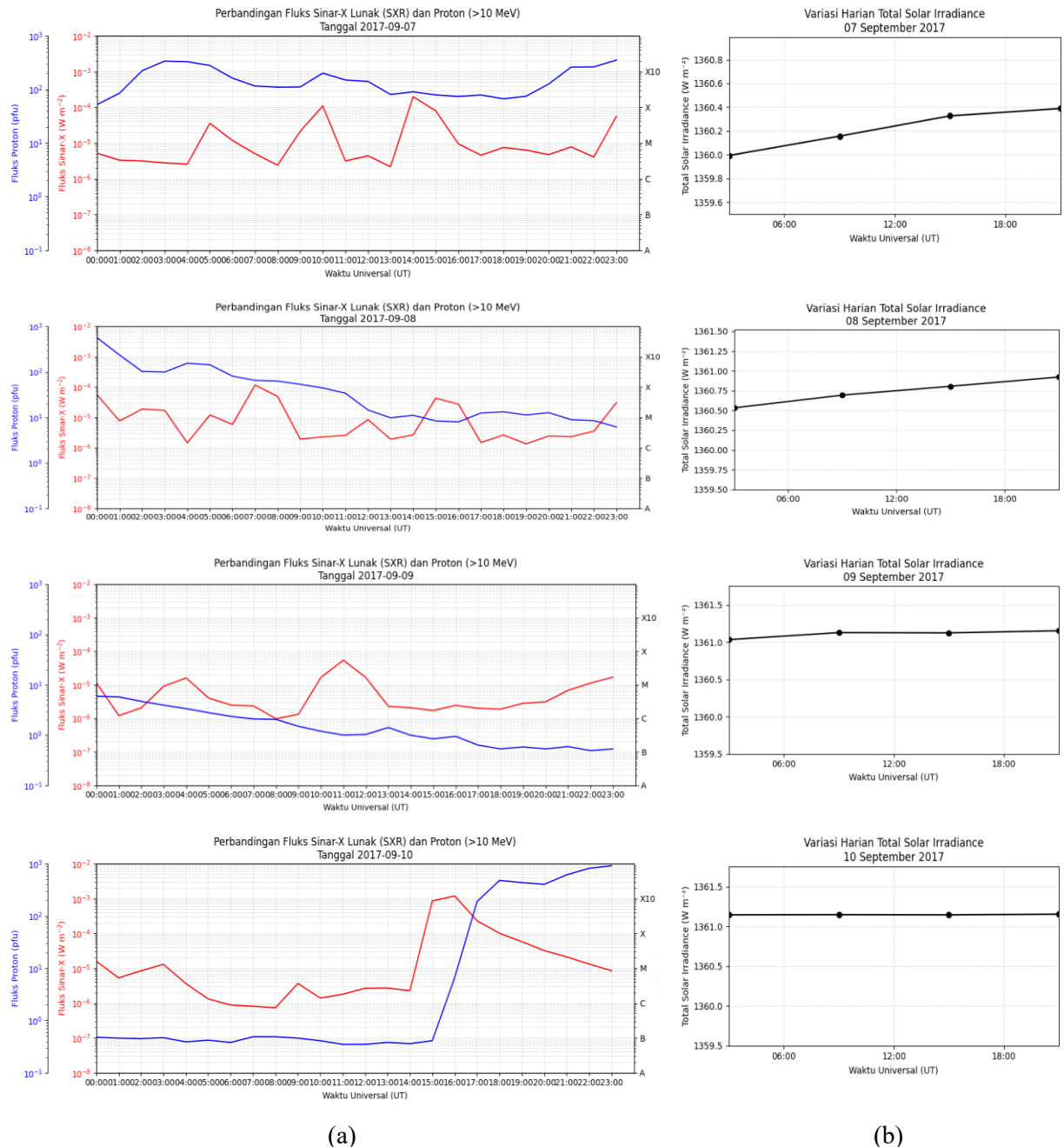
Grafik pada Gambar 3 menunjukkan terjadinya *Solar Proton Event* (SPE) yang dipicu oleh aktivitas Matahari pada awal September 2017. Pada 5 September, fluks proton masih berada pada tingkat latar belakang (*background level*) sekitar orde 10^1 – 10^2 pfu. Setelah *flare* X9.3 pada 6 September 2017, fluks proton mulai meningkat dan mencapai puncaknya pada 7–8 September 2017. Peningkatan ini menunjukkan respons proton berenergi tinggi akibat pelepasan energi magnetik dan propagasi partikel yang dipercepat oleh *Coronal Mass Ejection* (CME) (Reames D. V., 2013).

Puncak fluks proton yang bertahan hingga 8 September mengindikasikan adanya akumulasi partikel di medium antarplanet sehingga dikategorikan sebagai badai radiasi Matahari yang kuat. pada wilayah lintang tinggi (Schrijver, 2010).

Setelah fase puncak, fluks proton menurun secara bertahap hingga 9 September sebagai fase peluruhan (*decay phase*) SPE (Reames D. V., 2013). Namun pada 10 September 2017 kembali teramati peningkatan fluks proton yang berkaitan dengan kemunculan *flare* kelas X8.2.

Analisis Variasi Harian *Flare* X-ray Periode 5–10 September 2017 dengan Respons Radiasi Matahari





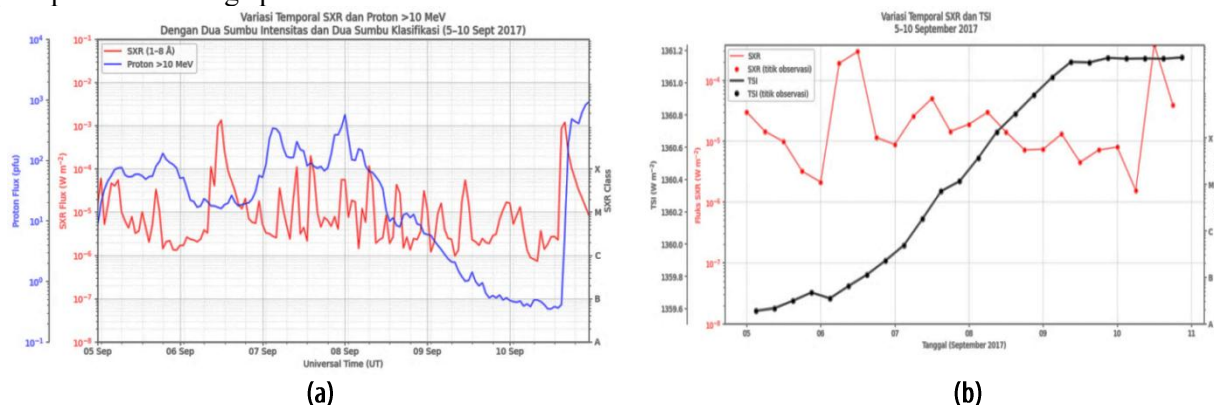
Gambar 4. (a) Perbandingan *X-ray* dengan Proton pada 5 September 2017. (b) Variasi harian TSI pada 5 September 2017

Gambar 4 menunjukkan bahwa pada 5 September 2017 aktivitas Matahari masih berada pada kondisi latar belakang, ditandai oleh fluks *X-ray*, fluks proton, dan *Total Solar Irradiance* (TSI) yang relatif stabil sehingga merepresentasikan fase sebelum terjadinya *flare* besar. Memasuki 6 September 2017 terjadi peningkatan fluks *X-ray* yang sangat tajam hingga mencapai puncaknya pada pukul 12.00 UT sebagai *flare* kelas X9.3. Setelah puncak tersebut, fluks proton baru mengalami peningkatan sekitar ± 11 jam kemudian akibat waktu propagasi partikel berenergi tinggi menuju Bumi, sedangkan TSI menunjukkan respons yang lebih bertahap sekitar ± 9 jam setelah puncak *flare* (Reames D. V., 2013). Pada 7 September 2017, fluks *X-ray* masih menunjukkan aktivitas yang relatif tinggi meskipun lebih rendah dibandingkan hari sebelumnya, sementara fluks proton tetap berada pada tingkat yang tinggi sebagai dampak lanjutan dari *flare* X9.3 dan TSI hanya mengalami perubahan dengan amplitudo yang kecil (Schrijver, 2010). Memasuki 8 September 2017, intensitas *X-ray* terus menurun disertai respons proton dan TSI yang semakin cepat, menunjukkan bahwa sistem Matahari–Bumi mulai menuju kondisi

yang lebih stabil (A. Yasyukevich, 2018). Selanjutnya, pada 9 September 2017 fluks *X-ray* kembali mendekati kondisi latar belakang, fluks proton tidak lagi menunjukkan peningkatan yang jelas, dan TSI relatif stabil sehingga mengindikasikan fase peluruhan (*decay phase*) (Gopalswamy, 2018). Namun, kondisi tersebut tidak berlangsung lama karena pada 10 September 2017 aktivitas Matahari kembali meningkat dengan munculnya *flare* kelas X8.2 yang ditandai oleh lonjakan fluks *X-ray*, diikuti peningkatan fluks proton sekitar ± 60 menit setelah puncak *flare*, sedangkan TSI tetap hanya mengalami fluktuasi yang relatif kecil. Secara keseluruhan, Gambar 4 memperlihatkan bahwa respons *X-ray* terjadi paling cepat, diikuti fluks proton setelah mengalami waktu tunda, sedangkan TSI memberikan respons yang lebih gradual dengan perubahan amplitudo yang relatif kecil (Kopp & Lean, 2011).

Perbandingan Waktu *X-ray* dengan Fluks Proton dan *X-ray* dengan TSI 5-10 September 2017

Perbandingan temporal antara fluks *X-ray* dengan fluks proton dan *X-ray* dengan TSI selama periode 5–10 September 2017 dilakukan untuk mengidentifikasi respons proton dan radiasi total Matahari terhadap aktivitas *flare*. Dengan menggunakan resolusi waktu yang sama, analisis ini memungkinkan pengamatan terhadap keterkaitan waktu kemunculan puncak intensitas serta kesesuaian pola perubahan ketiga parameter tersebut.



Gambar 5. (a) Perbandingan *X-ray* dengan fluks proton, (b) *X-ray* dengan Total Solar Irradiance (TSI) 5–10 September 2017

Gambar 5(a) menunjukkan hubungan temporal antara fluks *X-ray* dan fluks proton selama periode 5–10 September 2017. Pada 5 September 2017, fluks *X-ray* mencapai nilai $6,01 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ pada pukul 01:00 UT, kemudian meningkat tajam pada 6 September 2017 hingga mencapai puncak $1,34 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ pada pukul 12:00 UT yang berkaitan dengan *flare* X9.3. Setelah mengalami penurunan, fluks *X-ray* kembali meningkat pada 10 September 2017 dan mencapai $1,19 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ pada pukul 16:00 UT yang berkaitan dengan *flare* X8.2. Sementara itu, fluks proton menunjukkan respons yang lebih lambat karena dipengaruhi oleh proses propagasi dan akumulasi partikel berenergi di ruang antarplanet. Hal ini ditunjukkan oleh nilai *time delay* antara puncak *X-ray* dan proton yang berubah dari sekitar 1080 menit menjadi sekitar 60 menit, mengindikasikan bahwa propagasi proton menuju Bumi berlangsung lebih cepat ketika konektivitas medan magnet Matahari–Bumi semakin efisien (Reames D. V., 2013). Sementara itu, Gambar 5(b) memperlihatkan hubungan temporal antara fluks *X-ray* dan Total Solar Irradiance (TSI). Meskipun fluks *X-ray* meningkat hingga sekitar 10^{-4} W/m^2 selama kejadian *flare* besar, TSI hanya mengalami kenaikan kecil dari sekitar 1359,7 menjadi 1359,9 W/m^2 dan tetap berada pada kisaran 1361,1–1361,2 W/m^2 pada *flare* berikutnya. Perbedaan respons ini menunjukkan bahwa TSI tidak secara langsung mengikuti dinamika cepat fluks *X-ray*, melainkan berubah lebih gradual karena dipengaruhi oleh tren global aktivitas Matahari, proses *averaging* pada resolusi temporal 6 jam, serta besarnya nilai dasar TSI ($\sim 1360 \text{ W/m}^2$), sehingga kontribusi energi *flare* hanya menghasilkan perubahan yang relatif kecil (Kopp & Lean, 2011).

Delay antara *X-ray* dengan Proton dan Delay antara *X-ray* dengan Total Solar Irradiance (TSI)

Jeda waktu (*delay*) antara fluks *X-ray* dengan fluks proton serta TSI dianalisis menggunakan metode *cross-correlation* untuk mengidentifikasi hubungan temporal dan menentukan besarnya waktu

tunda serta koefisien korelasi masing-masing parameter. Hasil analisis disajikan pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 2. Delay *X-ray* terhadap Proton Berdasarkan *Cross-correlation* (5–10 September 2017)

Tanggal	Puncak <i>X-ray</i> (UT)	Puncak Proton (UT)	Delay Aktual (Jam)	Delay CCF (Jam)	Koefisien Korelasi
05/09/2017	01.00	19.00	18,0	-2	-0,000
06/09/2017	12.00	23.00	11,0	-3	0,040
07/09/2017	14.00	23.00	9,0	4	0,139
08/09/2017	07.00	00.00	-7,0	-1	0,302
09/09/2017	11.00	00.00	-11,0	-2	0,069
10/09/2017	16.00	23.00	7,0	-6	0,679

Delay aktual adalah selisih waktu antara puncak *X-ray* dan puncak proton:

$$\text{Delay aktual} = t_{\text{proton}} - t_{\text{sinar-x}}$$

Nilai *delay* aktual yang positif menunjukkan bahwa proton tiba setelah *X-ray*. *Delay CCF* (*Cross-Correlation Function*) menunjukkan *lag* dengan korelasi terbaik antara kedua sinyal. Nilai negatif menunjukkan *X-ray* mendahului proton, sedangkan nilai positif menunjukkan proton mendahului *X-ray*. Nilai *delay CCF* yang umumnya negatif menunjukkan bahwa *X-ray* mencapai Bumi lebih dahulu karena merupakan radiasi elektromagnetik, sedangkan proton memerlukan waktu untuk dipercepat dan merambat melalui medan magnet antarplanet (Reames D. V., 2013).

Secara umum, *delay CCF* didominasi nilai negatif, kecuali pada 7 September yang bernilai positif akibat pergeseran bentuk kurva sehingga korelasi maksimum diperoleh pada *lag* yang berbeda dari *delay* aktual. Koefisien korelasi berkisar dari sangat lemah hingga cukup kuat (-0,000 hingga 0,679), dengan nilai tertinggi pada 10 September. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara fluks *X-ray* dan proton dipengaruhi tidak hanya oleh intensitas *flare*, tetapi juga oleh proses percepatan, propagasi partikel, serta kondisi medium antarplanet (Reames D. V., 2013).

Tabel 3. Delay *X-ray* terhadap TSI Berdasarkan *Cross-correlation* (5–10 September 2017)

Tanggal	Puncak <i>X-ray</i> (UT)	Puncak TSI (UT)	Delay Aktual (Jam)	Delay CCF (Jam)	Koefisien Korelasi
05/09/2017	00.00	18.00	18,0	0	-0,887
06/09/2017	12.00	18.00	6,0	-12	1,000
07/09/2017	12.00	18.00	6,0	-12	1,000
08/09/2017	06.00	18.00	12,0	-12	1,000
09/09/2017	06.00	18.00	12,0	-12	1,000
10/09/2017	12.00	18.00	6,0	6	0,974

Hubungan antara *X-ray* dan *Total Solar Irradiance* (TSI) berbeda dengan hubungan *X-ray* dan proton karena TSI merepresentasikan total radiasi Matahari pada seluruh spektrum. Nilai TSI berada pada kisaran $\pm 1360 \text{ W/m}^2$ sehingga kontribusi *flare* hanya menghasilkan perubahan yang sangat kecil. Selain itu, resolusi temporal data TSI sebesar 6 jam menyebabkan respons cepat akibat *flare* mengalami *averaging*, sehingga perubahan yang teramati bersifat lebih halus dan tertunda (Kopp & Lean, 2011).

Secara keseluruhan, Tabel 3 menunjukkan bahwa *delay* aktual *X-ray* terhadap TSI berada pada rentang 6–18 jam, dengan *delay CCF* antara -12 hingga 6 jam. Meskipun koefisien korelasi umumnya sangat tinggi, perubahan TSI tetap tidak bersifat impulsif karena dipengaruhi oleh besarnya nilai dasar TSI, resolusi temporal 6 jam, serta tren aktivitas Matahari selama periode pengamatan (Kopp & Lean, 2011). Dengan demikian, *flare* berkontribusi terhadap variasi TSI, tetapi bukan menjadi faktor dominan yang menghasilkan perubahan radiasi total Matahari secara langsung.

Tabel 4. *Time delay* Antar Flare X-ray dengan Fluks Proton dan TSI, Periode 5–10 September 2017

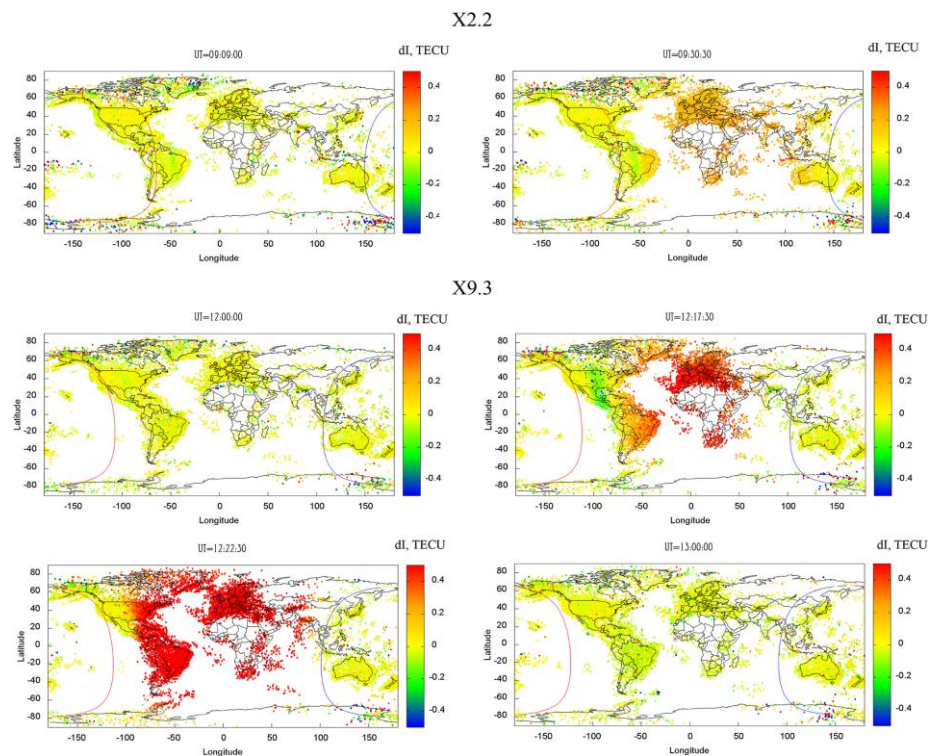
Parameter	Delay CCF (Jam)
X-ray ke Proton	4,46
X-ray ke TSI	8,48

Nilai *delay* keseluruhan diperoleh dari hasil *cross-correlation function* (CCF) harian pada periode 5–10 September 2017. Data yang memiliki koefisien korelasi $\geq 0,3$ digunakan dalam penentuan *delay* total, kemudian nilai *delay* CCF setiap hari dirata-ratakan dengan mempertimbangkan bobot koefisien korelasinya. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa fluks proton memiliki *delay* keseluruhan sebesar 4,46 jam terhadap fluks X-ray, sedangkan TSI memiliki *delay* keseluruhan sebesar 8,48 jam. Nilai tersebut menunjukkan bahwa respons proton terhadap peningkatan X-ray terjadi lebih awal dibandingkan respons TSI selama periode pengamatan.

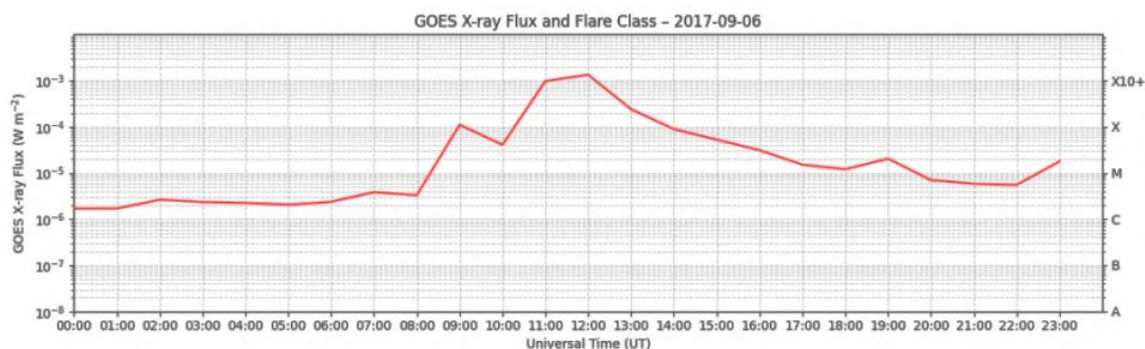
Perbedaan *delay* tersebut menunjukkan bahwa proton dan TSI memiliki mekanisme respons yang berbeda. *Delay* proton mencerminkan waktu propagasi partikel berenergi tinggi, sedangkan *delay* TSI dipengaruhi oleh karakteristik TSI sebagai radiasi total Matahari serta resolusi data 6 jam yang menyebabkan efek *averaging*. Dengan demikian, X-ray berperan sebagai pemicu awal, proton memberikan respons tertunda akibat propagasi partikel, sedangkan TSI menunjukkan respons yang lebih lambat dan gradual.

Distribusi Global TEC pada Tanggal 5–10 September 2017

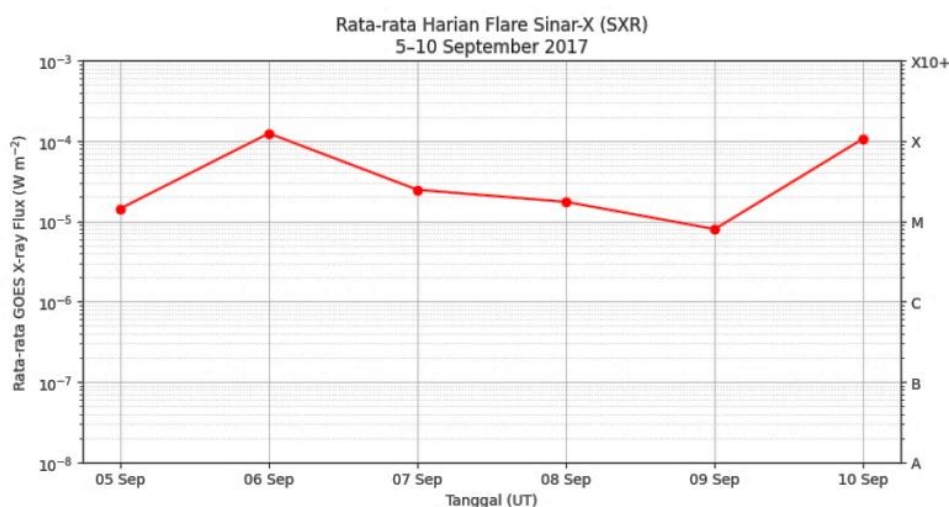
Distribusi global *Total Electron Content* (TEC) selama periode 5–10 September 2017 menunjukkan variasi yang berbeda, terutama saat terjadi flare kelas X9.3 pada 6 September 2017. Pada tanggal tersebut, distribusi TEC dianalisis secara spasial untuk menggambarkan perubahan kandungan elektron, sedangkan pada tanggal lainnya dianalisis berdasarkan nilai rata-rata dan persentase perubahan. Pendekatan ini memberikan gambaran dinamika TEC selama periode pengamatan. Visualisasi distribusi TEC saat kejadian flare disajikan pada Gambar 15.



Gambar 6. Variasi spasial TEC selama peristiwa flare X9.3 (A. Yasyukevich, 2018).



Gambar 7. Grafik *X-ray* pada 6 September 2017

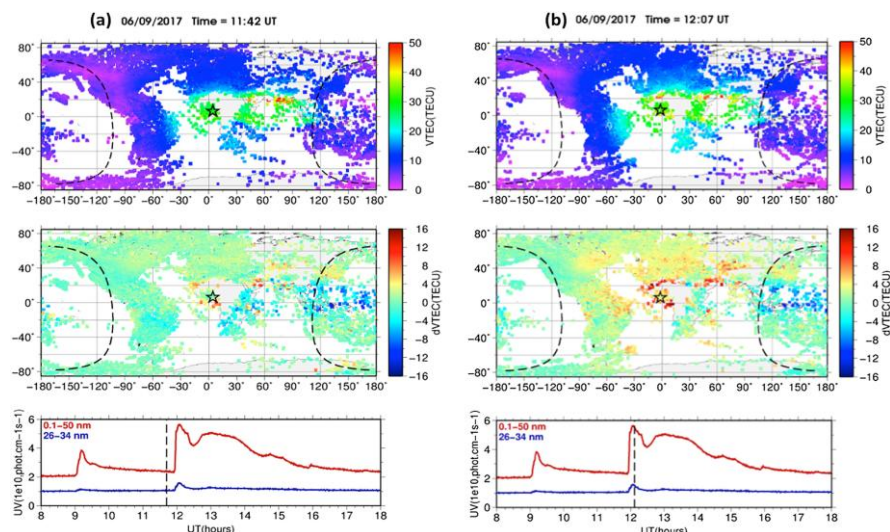


Gambar 8. Rata-rata harian *X-ray* tanggal 5–10 September 2017

Tabel 5. Persentase Perubahan rata-rata fluks *X-ray* antahari 5–10 September 2017

Tanggal	Persentase Peningkatan
05→06/09/2017	764,9%
06→07/09/2017	80,2%
07→08/09/2017	29,3%
08→09/09/2017	54,2%
09→10/09/2017	1243,8%

Analisis spasial *Total Electron Content* (TEC) pada 6 September 2017 menunjukkan peningkatan gangguan ionosfer yang sejalan dengan meningkatnya intensitas *flare*. Fluks *X-ray* mengalami peningkatan sebesar 764,9% dari 5 hingga 6 September 2017, yang bertepatan dengan kejadian *flare* X9.3. Peningkatan radiasi *X-ray* tersebut diikuti oleh anomali TEC yang ditunjukkan oleh sebaran warna merah ($>0,4$ TECU), dengan puncak pada pukul 12:17:30–12:22:30 UT di wilayah yang menghadap Matahari, terutama Afrika, Amerika Selatan, dan Samudra Atlantik (Kolarski, Yasyukevich, Astafyeva, Jin, Qian, & al., 2023). Kondisi ini menunjukkan peningkatan ionisasi akibat radiasi *flare* yang mencapai ionosfer (Qian, Solomon, & Kane, 2019).



Gambar 9. Distribusi Global Perubahan *Total Electron Content* (TEC) Ionosfer Selama Peristiwa *Flare* X9.3 pada 6 September 2017 (a) pukul 11.42 UT dan (b) pukul 12.07 UT (A. Yasyukevich, 2018)

Grafik fluks *X-ray* (2 grafik bawah pada gambar 9) warna merah (0,1-0,8) menunjukkan *X-ray* utama (indikator *flare*) dan warna biru (0,05-0,4) menunjukkan fluks *X-ray* yang energinya lebih tinggi. Pada Gambar 9, lonjakan intensitas fluks *X-ray* sebesar 764,9% pada 6 September 2017 memicu gangguan ionosfer ekstrem berupa *Sudden Ionospheric Disturbance* (SID). Peta *Vertical Total Electron Content* (VTEC) pada baris atas memperlihatkan perubahan warna dari biru–ungu menuju hijau, kuning, hingga merah pada sektor siang hari, yang menunjukkan peningkatan densitas elektron di ionosfer. Fenomena ini dipicu oleh *solar flare* kelas X9.3 yang mencapai puncak sekitar pukul 12:02 UT dengan fluks *X-ray* mencapai $1,24 \times 10^{-4} \text{ W m}^{-2}$.

Radiasi *X-ray* dan EUV yang intens memicu proses fotoionisasi secara cepat, sebagaimana terlihat dari perbedaan kondisi antara panel (a) pukul 11:42 UT dan panel (b) pukul 12:07 UT. Dalam waktu kurang dari 30 menit, wilayah yang menghadap Matahari mengalami peningkatan densitas elektron yang signifikan.

Anomali spasial tampak lebih jelas pada peta dVTEC yang menunjukkan peningkatan lebih dari 16 TECU di wilayah Afrika dan Samudra Atlantik. Meskipun intensitas radiasi mulai menurun setelah pukul 13:00 UT, densitas elektron tidak segera kembali normal karena proses rekombinasi berlangsung lebih lambat dibandingkan ionisasi. Sebaran anomali yang luas di sekitar titik subsolar menunjukkan bahwa peristiwa *flare* X9.3 menghasilkan respons ionosfer yang jauh lebih kuat dibandingkan kondisi tenang pada 5 September maupun fase pemulihan pada 7 September (A. Yasyukevich, 2018).

SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan data dan analisis, dapat disimpulkan bahwa *flare* Matahari X9.3 pada 6 September 2017 merupakan peristiwa dengan peningkatan fluks *X-ray* yang signifikan, yaitu sebesar 764,9% dari 5 hingga 6 September 2017, yang berkaitan dengan rekoneksi magnetik pada AR 12673. Peningkatan fluks proton setelah puncak *flare* menunjukkan terjadinya *Solar Proton Event* (SPE), sedangkan TSI mengalami perubahan yang lebih bertahap. Hasil analisis *cross-correlation* menunjukkan adanya hubungan temporal antara fluks *X-ray* dengan fluks proton dan TSI, dengan rata-rata waktu tunda respons proton sebesar 4,46 jam dan TSI sebesar 8,48 jam terhadap *X-ray*. Sementara itu, peningkatan TEC selama kejadian *flare* menunjukkan adanya respons ionosfer terhadap peningkatan radiasi *X-ray*. Peningkatan TEC selama kejadian *flare* mengindikasikan adanya pengaruh terhadap kondisi ionosfer yang berpotensi mengganggu sistem komunikasi dan navigasi satelit. Selain itu, kemunculan dua *flare* ekstrem, yaitu X9.3 pada 6 September dan X8.2 pada 10 September 2017, menunjukkan bahwa AR 12673 memiliki kompleksitas medan magnet yang tinggi sehingga menghasilkan aktivitas Matahari yang sangat intens selama periode pengamatan.

DAFTAR PUSTAKA

- (LASP), L. f. (2017). *LISIRD: TCTE Total Solar Irradiance (24-hour)*. Diambil kembali dari Laboratory for Atmospheric and Space Physics, University of Colorado Boulder: https://lasp.colorado.edu/lisird/data/tcte_tsi_24hr
- A. Yasyukevich, S. M. (2018). The 6 September 2017 X-Class Solar Flares: Effects on the Ionosphere and Radio Communication Systems. *Radio Science*, 53(10), 1233–1247.
- Aschwanden, M. J. (2005). *Physics of the Solar Corona: An Introduction with Problems and Solutions*. Springer.
- Astafyeva, E. (2019). Ionospheric Response to Solar Flare Events: A Review. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 105–117.
- Benz, A. O. (2017). Flare Observations. *Living Reviews in Solar Physics*, 14(2), 1–59.
- Berdermann, J. M. (2018). Solar Flare Effects on the Ionosphere and GNSS Performance. *Annales Geophysicae*, 123–145.
- Crane, P. C. (2020). The GOES X-ray Sensor and Its Use in Solar Flare Classification., (hal. 1–11).
- Dennis, B. R. (1985). Solar Hard X-ray Bursts. *Solar Physics*, 465–490.
- George E. Hale, F. E. (1919). The Magnetic Polarity of Sun-Spots. *The Astrophysical Journal*, 153–178.
- Gopalswamy, N. (2018). Earth-affecting solar transients: A review. *Geoscience Letters*, 5(14), 1–20.
- Hagyard, M. J. (1984). A study of magnetic shear in solar active regions. *Solar Physics*, 91(1), 115–126.
- Hargreaves, J. K. (1992). *The Solar–Terrestrial Environment* (1st ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Hathaway, D. H. (2010). The Solar Cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 1–65.
- Kolarski, A., Yasyukevich, M., Astafyeva, E., Jin, S., Qian, L., & al., e. (2023). Extreme Solar Events of Cycle 24 and Ionospheric Responses. *Advances in Space Research*, 1024–1046.
- Kopp, G., & Lean, J. L. (2011). A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters*, 38(L01706), L01706.
- Künzel, H. (1965). Zur Klassifikation von Sonnenfleckengruppen. *Astronomische Nachrichten*, 177–180.
- McIntosh, P. S. (1990). The Classification of Sunspot Groups. *Solar Physics*, 251–267.
- Moon, Y.-J. G. (2001). Solar Flares and Magnetic Helicity Injection. *Journal of Geophysical Research*, 14685–14692.
- Priest, E., & Forbes, T. (2000). *Magnetic Reconnection: MHD Theory and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Qian, L., Solomon, S. C., & Kane, T. J. (2019). Solar Flare and Geomagnetic Storm Effects on the Thermosphere and Ionosphere During 6–11 September 2017. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, 2298–2311.
- Reames, D. V. (1999). Particle Acceleration at the Sun and in the Heliosphere. *Space Science Reviews*, 413–491.
- Reames, D. V. (2013). The two sources of solar energetic particles. *Space Science Reviews*, 175(1–4), 53–92.
- Sammis, I. F. (2000). The Dependence of Large Flare Occurrence on the Magnetic Structure of Sunspots. *Astrophysical Journal*, 583–587.
- Schrijver, C. J. (2010). *Heliophysics: Space Storms and Radiation: Causes and Effects*. Cambridge: Cambridge University Press.
- SolarMonitor.org. (2017, September). Diambil kembali dari Solar Activity and Space Weather Monitoring: <https://www.solarmonitor.org/>

SolarMonitor.org. (2017, september). Diambil kembali dari SolarMonitor.org:
<https://www.solarmonitor.org/>

Thompson, B. J. (2012). The Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Physics*, 3–15.

Toriumi, S. &. (2019). Flare-productive active regions. *Living Reviews in Solar Physics*, 16(3), 1–73.

