

**EVALUASI DAN PREDIKSI CUACA ANTARIKSA BERDASARKAN
PERUBAHAN HARIAN INDEKS AKTIVITAS MATAHARI:
SSN, $F_{10.7}$, F_{XRAY} , DAN E_{FLARE}
(EVALUATION AND PREDICTION OF SPACE WEATHER BASED ON
DAILY CHANGES OF SOLAR ACTIVITY INDICES:
SSN, $F_{10.7}$, F_{XRAY} , AND E_{FLARE})**

Rhorom Priyatikanto

Pusat Sains Antariksa

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Dr. Djundjunan 133 Bandung 40173 Indonesia

e-mail: rorom.priyatikanto@lapan.go.id

Diterima 14 Agustus 2015; Direvisi 3 November 2015; Disetujui 21 Desember 2015

ABSTRACT

Space weather becomes an important aspect in modern civilization since humanity rely more heavily on space technology. This urges a divine way to measure the current space weather condition and to predict the future. Various indices have been defined to parameterize space weather condition, especially magnetic activity of the Sun. This study analyzed the variability and statistical properties of four solar activity indices namely sunspot number (SSN), 10 cm radio flux ($F_{10.7}$), x-ray background (F_{xray}), and the total flare energy (E_{flare}). Solar cycle 23 and 24 were chosen as the time constrain for the analysis. The main objectives are to understand the variability of the indices during Solar cycle and to characterize daily change of those indices. From the analysis, no significant phase difference was found among the fluctuation of the indices though difference variation amplitude were observed. Daily changes of those indices have nearly Gaussian distribution such that categorization into discrete classes can be done accordingly. Statistical border of 0.25σ and 0.85σ can be used to distinguish small and large changes of the indices.

Keywords: *Sunspots, Radio emission, X-ray, Flare energy*

ABSTRAK

Cuaca antariksa menjadi aspek yang penting dalam peradaban modern karena umat manusia semakin mengandalkan teknologi antariksa. Kondisi ini mendorong adanya upaya yang baik dalam mengukur kondisi terkini antariksa dan memperkirakan masa depan. Sejumlah indeks telah didefinisikan sebagai parameter cuaca antariksa, terutama aktivitas magnetik Matahari. Studi ini menelaah variabilitas dan parameter statistik dari empat indeks, yakni bilangan bintik Matahari (SSN), fluks radio 10 cm ($F_{10.7}$), fluks sinar-X latar belakang (F_{xray}), dan energi total flare (E_{flare}). Siklus 23 dan 24 dipilih sebagai batas waktu analisis. Tujuannya adalah untuk mengetahui variabilitas setiap indeks sepanjang siklus Matahari serta mengetahui karakter perubahan harian indeks tersebut. Berdasarkan analisis tersebut, tidak ditemukan perbedaan fase yang signifikan di antara fluktuasi keempat indeks meski amplitudo variasi yang berbeda teramati. Perubahan harian dari indeks tersebut hampir mengikuti distribusi Gaussian sehingga pengelompokkan ke dalam kelas diskrit dapat dilakukan. Batasan statistik $0,25\sigma$ dan $0,85\sigma$ dapat dipakai untuk membedakan perubahan kecil dan besar.

Kata Kunci: *Bintik Matahari, Emisi radio, Sinar-X, Energi flare*

1 PENDAHULUAN

Menurut *US National Space Weather Plan*, cuaca antariksa dapat diartikan sebagai kondisi di Matahari, angin surya, magnetosfer, ionosfer, dan termosfer yang dapat mempengaruhi kinerja (*performance*) dan keandalan (*reliability*) dari teknologi landas Bumi dan antariksa serta dapat membahayakan kesehatan dan kehidupan manusia. Dewasa ini, cuaca antariksa perlu diperhatikan dengan seksama karena aktivitas manusia, dari komunikasi hingga eksplorasi, semakin sensitif terhadap perubahan yang terjadi. Di Bumi, variabilitas dan aktivitas Matahari menjadi faktor kunci cuaca antariksa karena input energi dari Matahari (melalui radiasi foton dan partikel energetik) lebih dominan dibandingkan dinamika internal (Lilensten *et al.*, 2014). Selama periode 11 tahunan, Matahari mengalami perubahan intensitas relatif dalam kisaran 10% (pada jendela visual) hingga 10.000% (pada jendela ultraviolet) serta mengalami perubahan aktivitas magnetik. Pengamatan Matahari pada berbagai rentang spektrum menjadi penting untuk memahami dan meramalkan cuaca antariksa.

Dalam kaitannya dengan prakiraan cuaca antariksa, Pusat Sains Antariksa LAPAN telah menggulirkan program *Space Weather Information and Forecast Services* (SWIFtS) yang beroperasi sejak Maret 2015. Program ini dikembangkan dari sistem prediksi cuaca antariksa *National Institute of Information and Communication Technology* (NICT) Jepang (Watari, 2009; Jiyo & Dani, 2014). Di dalamnya, terdapat tiga gugus utama, yakni prakiraan aktivitas Matahari, geomagnet, dan ionosfer. Untuk aktivitas Matahari, keluaran utama dari prakiraan yang dihasilkan adalah kemungkinan terjadinya flare atau ledakan Matahari dengan kekuatan tertentu. Masukan utamanya adalah kondisi terkini Matahari serta parameter daerah aktif yang menjadi sumber flare. Kondisi Matahari diwakili oleh beberapa indeks seperti bilangan bintik Matahari (SSN), fluks radio 10 cm ($F_{10.7}$), fluks sinar-X latar belakang (F_{xray}), serta luas total bintik Matahari. Indeks tersebut sudah jamak digunakan sebagai indikator aktivitas Matahari yang memiliki siklus 11 tahun (Tapping, 2013; Ramesh & Rohini, 2008) dan mencakup aktivitas di seluruh piringan Matahari yang terukur di Bumi.

Pada setiap proses evaluasi dan prakiraan, kondisi terakhir (t) Matahari dan kondisi pada hari sebelumnya ($t-1$) menjadi masukan. Perubahan harian indeks dikategorikan menjadi lima kelas kualitatif, yakni: (1) turun, (2) agak turun, (3) relatif tetap, (4) agak naik, dan (5) naik. Kenaikan signifikan dapat dijadikan rambu-rambu adanya peningkatan aktivitas dan potensi terjadinya flare pada hari berikutnya (Lee *et*

al., 2012). Namun, batasan nilai untuk tiap kelas tersebut belum ditentukan dengan pasti.

Tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui karakter variabilitas keempat indeks aktivitas Matahari sepanjang siklus ke-23 dan 24 serta hubungan kuantitatif dari satu indeks dan indeks lainnya. Tujuan berikutnya adalah mengetahui parameter statistik dari perubahan harian keempat indeks tersebut. Untuk keperluan tersebut, fungsi distribusi normal/Gaussian dicocokkan dengan distribusi empiris yang telah dibangun. Berdasarkan parameter yang diperoleh, kategorisasi perubahan harian indeks (turun, agak turun, ... , naik) dapat ditentukan secara bijak serta dapat dijadikan acuan dalam prakiraan cuaca antariksa.

2 DATA

Data yang digunakan adalah ringkasan aktivitas Matahari dan geofisika (*Solar and Geophysical Activity Summary*, SGAS) yang dirilis setiap hari oleh *National Oceanic and Atmospheric Administration Space Weather Prediction Center* (NOAA/SWPC). File berisi teks diunduh dari <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/>. Rentang waktu yang dianalisis berkaitan dengan siklus Matahari 23 dan 24, yakni sejak Januari 1996 hingga Desember 2014.

Bilangan bintik Matahari yang dituliskan dalam SGAS merupakan nilai yang diperoleh oleh SWPC setiap harinya. *Fluks* radio 10,7 cm (2,8 GHz) diperoleh dari *Dominion Radio Astrophysical Observatory* di British Columbia, Kanada. Indeks tersebut dinyatakan dalam *Solar Flux Unit* (SFU) yang setara dengan 10^{-22} W/m²/Hz. *Fluks* sinar-X latar belakang diturunkan dari hasil pengukuran *Geostationary Operational Environmental Satellite X-ray Sensor* (GOES/XRS) kanal B yang mendeteksi foton pada rentang panjang gelombang 1 hingga 8 Å. Nilai *fluks* latar belakang harian diperoleh dengan metode yang disebutkan dalam Wagner (1988). Skala yang digunakan untuk *fluks* sinar-X adalah A, B, dan C yang setara *fluks* sebesar 10^{-8} , 10^{-7} , dan 10^{-6} W/m². Skala tersebut dapat dikonversi dengan mudah.

Data tambahan yang digunakan adalah total energi yang dihasilkan oleh (beberapa) *flare* dalam satu hari (E_{flare}). Total energi (dalam W/m²) pada jendela sinar-X dianggap sebagai indikator dengan informasi fisis yang lebih kaya dibandingkan jumlah kejadian atau *fluks* maksimum *flare*. Indeks ini dianggap lebih baik dalam mendefinisikan siklus Matahari (Maris *et al.*, 2004; Oh, 2014). *Solar and Geophysical Event Reports* yang juga dirilis oleh NOAA/SWPC memberikan rekaman energi yang dihasilkan setiap *flare* yang pada tanggal tertentu sehingga penjumlahan energi selama satu hari dapat dilakukan dengan mudah.

3 METODOLOGI

Variasi indeks sepanjang siklus ke-23 dan sebagian siklus ke-24 dipelajari berdasarkan *plot* indeks sebagai fungsi waktu. Puncak siklus dibandingkan secara visual tanpa melibatkan metode analisis variabilitas tertentu. Untuk mengetahui hubungan satu indeks dengan indeks lainnya, korelasi dua dimensi dilakukan terhadap nilai rata-rata bulanan dari dua indeks. Indeks utama yang menjadi pembanding adalah bilangan bintik Matahari (SSM) yang telah dikenal sebagai indikator utama siklus Matahari. *Linear least-squares fitting* (Ross, 2004) dilakukan untuk mendapatkan hubungan kuantitatif antara dua indeks.

Aspek berikutnya yang menjadi perhatian adalah perubahan harian dari indeks aktivitas Matahari. Perubahan ini didefinisikan sebagai selisih antara nilai indeks pada tanggal tertentu dengan nilainya sehari sebelumnya:

$$\frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{f_2 - f_1}{t_2 - t_1} \quad (3-1)$$

dengan $f = [SSN, F_{10.7}, F_{xray}, E_{flare}]$ menyatakan indeks yang dibicarakan. Formulasi sejenis pernah digunakan oleh Lee *et al.* (2012) yang menganalisis perubahan harian luas daerah aktif dalam kaitannya dengan probabilitas kejadian *flare*.

Fungsi distribusi empiris dari $\Delta f/\Delta t$ dapat dibangun dengan beragam metode estimasi kerapatan (Silvermann, 1996), konstruksi histogram adalah metode yang digunakan dalam studi ini. Fungsi distribusi Gaussian ($x=\Delta f/\Delta t$) digunakan untuk memodelkan distribusi empiris tersebut tersebut:

$$f(x) = A \exp \left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \tag{3-2}$$

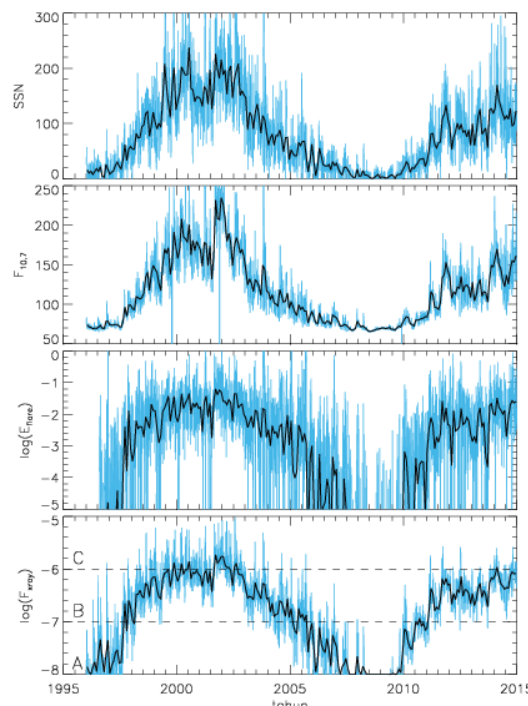
Terdapat tiga parameter *fitting*, yakni nilai rata-rata μ , deviasi σ , dan faktor skala A . Pencocokan dilakukan dengan berpijak pada prinsip *non-linear least-squares fit*.

Dalam studi ini, distribusi empiris dibangun menggunakan rekaman data pada siklus ke-23 dan ke-24 secara terpisah. Namun, segmentasi rentang siklus menjadi fase *solar minimum* dan *solar maximum* tidak dilakukan karena studi ini lebih berfokus pada karakteristik global dari indeks yang menjadi pokok bahasan. Selain itu, segmentasi data tidak dilakukan karena keperluan praktis, yakni supaya prakirawan cuaca antariksa dapat mengacu pada satu tabel tertentu saat melakukan evaluasi aktivitas Matahari, tidak bergantung pada fase minimum maupun maksimum.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Rata-rata Bulanan

Perubahan indeks sepanjang siklus Matahari ke 23 dan 24 diwakili oleh nilai rata-rata bulanan dari indeks sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4-1. Keempat indeks tersebut menunjukkan adanya variasi dengan siklus 11 tahun. Pada skala logaritmik, pola perubahan F_{xray} dan E_{flare} tampak berbeda dibandingkan indeks lainnya, tapi tetap menunjukkan kecenderungan fluktuasi yang sama. Perbandingan langsung antara ketiga indeks dengan *SSN* disajikan pada Gambar 4-2.

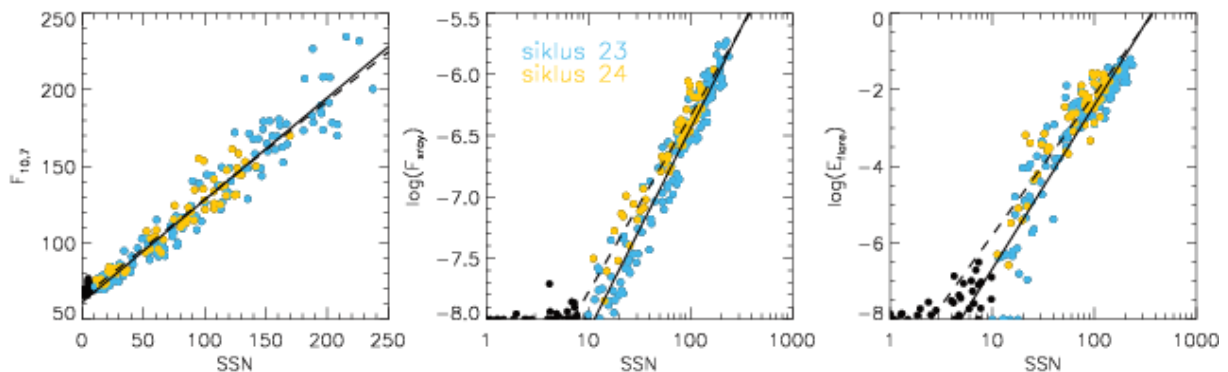


Gambar 4-1: Variasi dari beberapa indikator aktivitas Matahari: (1) bilangan bintik Matahari, (2) fluks radio 10 cm dinyatakan dalam SFU, (3) energi total *flare* tiap hari dinyatakan dalam W/m^2 , dan (4) fluks sinar-X latar belakang dalam W/m^2 . Garis biru mewakili nilai harian, sedangkan garis hitam merupakan nilai rata-rata bulanan

Fluktuasi SSN pada siklus ke-23 menunjukkan adanya puncak ganda (*double humps*) dengan separasi sekitar satu tahun, sementara pada siklus berikutnya terdapat dua puncak dengan separasi sekitar dua tahun. Pola yang sama juga teramati pada $F_{10.7}$, tapi puncak kedua pada siklus 23 lebih tinggi dibandingkan puncak pertama sehingga Ramesh & Vasantharaju (2014) menganggapnya terlambat dibandingkan SSN. Keterlambatan ini tidak diharapkan ada karena secara prinsip radiasi gelombang mikro dihasilkan oleh plasma di kromosfer dan korona yang dipengaruhi oleh medan magnet daerah aktif (Tapping, 2013). Fluks medan magnet daerah aktif sebanding dengan luas area bintik Matahari, bukan sekedar jumlah bintik yang teramati. Karena itu, keterlambatan puncak $F_{10.7}$ lebih disebabkan oleh nilai SSN yang terlalu rendah atau *underestimate* (Ramesh & Vasantharaju, 2014). Terlepas dari isu keterlambatan tersebut, fluks radio 10 cm memang berkorelasi baik dengan bilangan bintik Matahari. Fluktuasi yang seirama dan sefase tampak jelas hingga siklus ke-24. Sebagaimana disajikan dalam Gambar 4-2, terdapat hubungan linier dengan gradien 0,67 untuk siklus ke-23 dan 0,64 untuk siklus ke-24.

Fluks sinar-X latar belakang merupakan bentuk radiasi elektromagnetik energi tinggi yang dihasilkan oleh keseluruhan piringan Matahari. Berbeda dengan fluks insidental (*transient*) yang dihasilkan oleh daerah aktif di permukaan Matahari. Fluks sinar-X latar belakang bersumber dari emisi korona dan turut dipengaruhi oleh variabilitas aktivitas magnetik di Matahari. Nilainya mengalami variasi hingga 10^3 (Aschwanden, 1994) dan nilai fluks dapat melebihi 10^{-6} W/m² ketika aktivitas Matahari mencapai maksimum. Fluktuasi F_{xray} bulanan tampak seirama dan sefase dengan fluktuasi SSN meski keberadaan puncak ganda tidak tampak jelas pada skala logaritmik. Puncak F_{xray} pada siklus 23 terjadi pada akhir 2001, sementara potongan siklus 24 berpuncak pada awal 2014. Puncak siklus ke-24 sekitar 1,6 kali lebih rendah dibandingkan puncak pada siklus sebelumnya.

Sebagaimana dikemukakan oleh Veronig *et al.* (2004), hubungan antara F_{xray} dan SSN dapat direpresentasikan dengan persamaan eksponensial (*power-law*), $F_{xray} = a \times SSN^b$ atau $\log F_{xray} = \log a + b \log SSN$. Regresi linier menghasilkan koefisien $\log a = -9,75$ dan $b = 1,65$ untuk siklus ke-23 dan $\log a = -9,21$ dan $b = 1,44$ untuk siklus ke-24 yang baru berlalu separuhnya. Dalam regresi, data dengan $SSN \leq 10$ tidak diperhitungkan dalam regresi karena pada kondisi tersebut, F_{xray} amat dekat dengan batas deteksi dari GOES/XRS sebesar 2×10^{-8} W/m² (Boeing, 2006). Langkah ini secara sistematis membuat koefisien b lebih kecil dibandingkan studi sebelumnya, misalnya Veronig *et al.* (2004) yang mendapatkan koefisien $b = 1,32$ untuk siklus ke-21, $b = 1,51$ untuk siklus ke-22 dan $b = 1,30$ untuk sebagian siklus ke-23.



Gambar 4-2: Hubungan antara indeks aktivitas Matahari dengan titik biru dan kuning secara berturut-turut merepresentasikan nilai rata-rata bulanan untuk siklus ke-23 dan 24. Hubungan tersebut dapat dimodelkan dengan persamaan linier ($F_{10.7}$) dan fungsi eksponensial (F_{xray} dan E_{lare}). Garis tegas untuk siklus ke-23 sedangkan garis putus-putus untuk siklus ke-24

Variasi yang lebih besar dialami oleh E_{flare} , yakni dengan orde perubahan lebih 10^4 . Nilai harian E_{flare} juga tampak fluktuatif meski nilai rata-rata bulannya menunjukkan pola variabilitas yang hampir sama dengan F_{xray} . Karena fluktuasi yang amat besar tersebut, puncak ganda pada siklus 23 dan 24 tidak tampak jelas pada plot E_{flare} sepanjang siklus 23 dan 24.

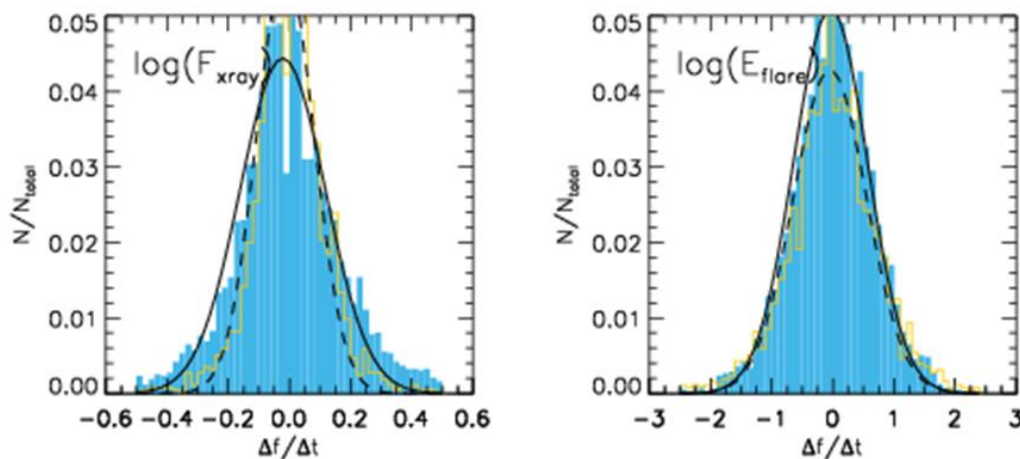
Terdapat hubungan *power-law* antara E_{flare} dan SSN sebagaimana disajikan pada Gambar 4-2. Untuk siklus ke-23 diperoleh koefisien regresi $\log a = -10,95$ dan $b = 4,27$, sedangkan untuk siklus ke-24 diperoleh $\log a = -9,47$ dan $b = 3,67$. Hubungan ini sejalan dengan Maris *et al.* (2004) dan Oh (2014) yang menggunakan indeks yang sama sebagai indikator aktivitas Matahari.

4.2 Perubahan Harian

Perubahan harian dihitung dengan Persamaan 3-1 dan Gambar 4-3 menyajikan histogram distribusi $\Delta f/\Delta t$ untuk keempat indeks. Fungsi Gaussian digunakan untuk memodelkan distribusi empiris tersebut. Adapun parameter fungsi Gaussian yang diperoleh untuk masing-masing indeks dituliskan dalam Tabel 4-1.

Tabel 4-1: PARAMETER FUNGSI GAUSSIAN YANG MEREPRESENTASIKAN DISTRIBUSI $\Delta f/\Delta t$ DARI KEEMPAT INDEKS AKTIVITAS MATAHARI

Indeks	Siklus 23			Siklus 24		
	A	μ	σ	A	μ	σ
SSN	0,038	-0,952	16,147	0,036	-0,474	16,387
$F_{10.7}$	0,079	-0,614	3,990	0,088	-0,476	3,208
$\log(F_{xray})$	0,044	-0,022	0,140	0,056	-0,013	0,094
$\log(E_{flare})$	0,051	-0,038	0,601	0,043	-0,049	0,598



Gambar 4-3: Fungsi distribusi empiris dari perubahan harian dari SSN , $F_{10.7}$, $\log(F_{xray})$ dan $\log(E_{flare})$. Histogram warna biru menggambarkan distribusi perubahan indeks pada siklus ke-23 yang dapat dimodelkan dengan kurva garis tegas. Untuk siklus ke-24, digunakan histogram warna kuning dan kurva garis putus-putus

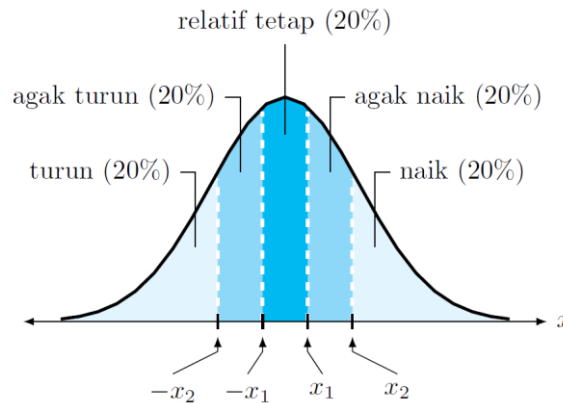
Secara umum, histogram distribusi $\Delta f/\Delta t$ dari SSN , $\log(F_{xray})$, dan $\log(E_{flare})$ cukup sesuai dengan fungsi Gaussian, tetapi menunjukkan adanya *spike* di sekitar nol (Gambar 4-3). Distribusi empiris yang dihasilkan cukup simetris di sekitar nilai nol sehingga $\mu \approx 0$. Hal ini mengindikasikan bahwa ada banyak kasus ketika indeks aktivitas Matahari hampir tidak berubah dalam satu hari. Distribusi $\Delta f/\Delta t$ untuk SSN memiliki dua puncak tambahan pada $\Delta f/\Delta t \approx 10$ sebagai dampak dari formulasi bilangan bintang yang melibatkan koefisien pengali untuk satu daerah aktif (*sunspot*

group). Muncul atau lenyapnya satu daerah aktif menyebabkan perubahan nilai SSN secara drastis, yakni sekitar 10.

Distribusi $\Delta f/\Delta t$ dari $F_{10.7}$ tampak lebih menyimpang dari fungsi Gaussian. Penurunan tajam terjadi pada $\Delta f/\Delta t$ kecil dan melandai pada $\Delta f/\Delta t$ besar. *Fitting* Gaussian memberikan nilai $\sigma = 3,2$, sementara simpangan baku yang diperoleh adalah $\sigma = 8,1$.

4.3 Kelas Perubahan

Sebagaimana disebutkan sebelumnya, SWIFtS menggunakan lima kelas perubahan dari indeks aktivitas Matahari. Bila jumlah kasus dalam setiap kelas tersebut dianggap sama, misalnya 20% kasus turun, 20% kasus agak turun dan seterusnya, maka batas kelas dapat ditentukan sesuai dengan luas area di bawah kurva distribusi normal.



Gambar 4-4: Ilustrasi pembagian kelas sesuai dengan fungsi distribusi normal

Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4-4, indeks aktivitas dikatakan relatif tetap bila $\Delta f/\Delta t$ berada di antara $-x_1$ dan x_1 , agak naik bila perubahannya berada di antara x_1 dan x_2 , dan naik bila perubahannya melebihi x_2 . Demikian halnya pada kasus penurunan indeks aktivitas. Untuk fungsi distribusi Gaussian, nilai $x_1 = 0,25\sigma$ dan $x_2 = 0,85\sigma$ sehingga tiap kelas sama-sama mencakup 20% kasus. Nilainya berbeda untuk masing-masing indeks sebagaimana dirangkum pada Tabel 4-2. Perlu dijadikan catatan bahwa untuk $F_{10.7}$, simpangan baku (σ) digunakan sebagai acuan alih-alih parameter dari fungsi Gaussian. Rasio perubahan (dalam persen) digunakan untuk F_{xray} dan E_{flare} karena parameter σ dari distribusi perubahan $\log(F_{xray})$ dan $\log(E_{flare})$.

Tabel 4-2: NILAI BATAS KELAS x_1 DAN x_2 UNTUK SETIAP INDEKS AKTIVITAS MATAHARI. UNTUK $F_{10.7}$, SIMPANGAN BAKU (σ) DIGUNAKAN ALIH-ALIH PARAMETER DARI FUNGSI GAUSSIAN. PEMBULATAN DILAKUKAN KARENA ALASAN PRAKTIS. LIMA KOLOM PALING KANAN MERANGKUM RENTANG PERUBAHAN YANG TELAH DIKELOMPOKKAN MENJADI LIMA KELAS YANG TELAH DIDEFINISIKAN SEBELUMNYA. PERUBAHAN F_{XRAY} DAN E_{FLARE} DINYATAKAN DALAM PERSEN KARENA KEDUA INDEKS SERINGKALI DINYATAKAN DALAM SKALA LOGARITMIK

Indeks	Batas Kelas		Kelas Perubahan				
	x_1 $0,25\sigma$	x_2 $0,85\sigma$	Turun	Agak Turun	Relatif Tetap	Agak Naik	Naik
SSN	4	14	$(-\infty, -14)$	$[-14, -4)$	$[-4, 4)$	$[4, 14)$	$[14, \infty)$
$F_{10.7}$	2	7	$(-\infty, -7)$	$[-7, -2)$	$[-2, 2)$	$[2, 7)$	$[7, \infty)$
F_{xray}	$0,029^{dex}$	$0,099^{dex}$	$(0\%, 79\%)$	$[79\%, 93\%)$	$[93\%, 107\%)$	$[107\%, 126\%)$	$[126\%, \infty)$
E_{flare}	$0,150^{dex}$	$0,509^{dex}$	$(0, 31\%)$	$[31\%, 71\%)$	$[71\%, 141\%)$	$[141\%, 323\%)$	$[323\%, \infty)$

4.4 Studi Kasus

Perubahan harian indeks dalam kaitannya dengan kejadian *flare* atau lontaran massa korona merupakan topik yang menarik untuk dibahas, apalagi untuk kepentingan prakiraan cuaca antariksa. Sebagai contoh, Lee *et al.* (2012) mengaitkan frekuensi kejadian *flare* dengan perubahan harian luas daerah aktif. Belum ada literatur yang secara khusus membahas hubungan antara frekuensi kejadian *flare* dan perubahan indeks SSN, $F_{10.7}$, dan $\log(F_{xray})$. Meski demikian, beberapa contoh kasus yang disajikan dalam Tabel 4-3 menunjukkan bahwa perubahan indeks menjadi indikator kemunculan daerah aktif yang amat eruptif.

Tabel 4-3: REKAMAN HARIAN INDEKS AKTIVITAS MATAHARI DARI NOAA/SWPC YANG BERHUBUNGAN DENGAN KEMUNCULAN DAERAH AKTIF PALING ERUPTIF SEPANJANG SIKLUS MATAHARI KE-23. KOTAK BERWARNA HIJAU MENANDAI INDEKS TETAP ATAU TURUN, KUNING MENANDAI INDEKS AGAK NAIK, SEDANGKAN JINGGA MENANDAI INDEKS NAIK

Tanggal yyyymmdd	$F_{10.7}$	$\Delta F_{10.7}$	SSN	ΔSSN	F_{xray}	ΔF_{xray}	Keterangan
20010421	153	-	98	-	B8.2	-	AR9393
20010422	159	6	136	38	B9.6	17%	jumlah flare C+M+X : 55
20010423	183	24	129	-7	C1.6	67%	maksimum : X20
20031021	135	-	113	-	B6.5	-	AR0486
20031022	152	17	144	31	C1.4	115%	jumlah flare C+M+X : 43
20031023	154	2	117	-27	C4.9	250%	maksimum : X17
20050906	75	-	12	-	A7.6	-	AR0808
20050907	83	8	12	0	B3.4	347%	jumlah flare C+M+X : 77
20050908	100	17	11	-1	C1.0	194%	maksimum : X17

Daerah aktif AR09393 tampak di piringan Matahari (*near side*) sejak 24 Maret 2001 dan telah menghasilkan sebanyak 55 *flare* kelas C atau lebih kuat. *Flare* terkuat terjadi 2 April 2001 dan mencapai kelas X20. Peningkatan tajam $F_{10.7}$ dan F_{xray} teramati sebelum kemunculan daerah aktif tersebut. Peningkatan drastis indeks SSN terjadi 22 Maret, dua hari sebelum AR9393 mulai tercatat.

Pola yang sama teramati pada AR10808 penghasil 77 *flare* atau AR10486 yang dikenal sebagai penghasil *flare Halloween* (X17) 28 Oktober 2011. Setelah daerah aktif ini muncul, *fluks* radio dan bilangan bintik tidak mengalami peningkatan yang signifikan. Nilai SSN 23 Oktober mengalami penurunan akibat daerah aktif lain bergerak ke sisi jauh Matahari (*far side*).

Dari ketiga kasus tersebut, poin yang dapat dideduksi adalah bahwa peningkatan *fluks* sinar-X latar belakang maupun *fluks* radio menjadi indikator peningkatan aktivitas Matahari, terutama frekuensi kejadian *flare*. Perubahan bilangan bintik Matahari tidak berkorelasi langsung frekuensi *flare*. Salah satu argumen yang dapat digunakan untuk menjelaskan hal ini adalah bahwa penentuan SSN amat bergantung pada posisi daerah aktif di piringan Matahari dan sudut pandang pengamat. Telaah terhadap sampel daerah aktif yang lebih banyak perlu dilakukan untuk memastikan validitas pernyataan tersebut.

5 KESIMPULAN

Bilangan bintik Matahari, *fluks* radio 10 cm, sinar-X latar belakang, dan total energi *flare* dapat digunakan sebagai indikator aktivitas Matahari serta parameter masukan dalam sistem prakiraan cuaca antariksa. Keempat indeks tersebut menunjukkan tren fluktuasi yang sama dan sefase. Untuk siklus 23 dan 24, tidak ditemukan keterlambatan (*time lag*) yang signifikan meski ada perbedaan nilai puncak.

Perubahan harian ($\Delta f/\Delta t$) keempat indeks memiliki distribusi yang mendekati Gaussian. Nilai $0,25\sigma$ dan $0,85\sigma$ (Tabel 4-2) dapat digunakan sebagai acuan batas kelas perubahan yang logis. Dilihat dari beberapa kasus kemunculan daerah aktif eruptif pada siklus ke-23, perubahan harian fluks sinar-X dan radio berhubungan dengan peningkatan frekuensi kejadian *flare*. Namun, perubahan SSN tidak secara langsung berkaitan karena penentuan bilangan bintik sangat tergantung pada posisi daerah aktif di piringan Matahari.

DAFTAR RUJUKAN

- Aschwanden, M.J., 1994. *Irradiance observation of the 1-8 Å solar soft x-ray flux from GOES*, Solar Physics, 152, 53.
- Boeing, 2006. *GOES N Data Book*, Boulder: NASA.
- Jiyo dan T. Dani, 2014. *Space Weather Training Program for LAPAN Researcher*, Laporan tidak dipublikasikan, Pussainsa LAPAN.
- Lee, K; Y.-J. Moon; J.-Y. Lee; K.-S. Lee dan H. Na, 2012. *Solar Flare Occurrence Rate and Probability in Terms of the Sunspot Classification Supplemented with Sunspot Area and its Changes*, Solar Physics, 281, 639.
- Lilensten, J.; A.J. Coates; V. Dehant; T.D. de Wit; R.B.Horne; F. Leblanc; J. Luhmann; E. Woodfield dan M. Barthelemy, 2013. *What characterizes planetary space weather?*, Astronomy and Astrophysics Review, 22, 79.
- Maris, G.; M.D. Popescu dan M. Mierla, 2004. *Soft X-Ray Solar Flarecycles*, dalam A.V. Stepanov; E.E. Benevolenskaya dan A.G.Kosovichev (editor), *Proceedings IAU Symposium*, no. 223, 73.
- Oh, S., 2014. *Frequency of Solar Spotless Days and Flare Index as Indices of Solar Cycle Activity*, Journal of Astronomy and Space Science, 31, 145.
- Ramesh, K.B. dan N. Vasantharaju, 2014. *Temporal offsets among solar activity indicators*, Astrophysics and Space Science, 350, 479.
- Ramesh, K.B. dan V.S. Rohini, 2008. *1-8 a Coronal Background X-Ray Emission and the Associated Indicators of Photospheric Magnetic Activity*, the Astrophysical Journal, 686, L41.
- Ross, S. M., 2004. *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, Burlington, Elsevier.
- Silvermann, B.W., 1996. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*, New York: Chapman & Hall.
- Tapping, K.F., 2013. *The 10.7 cm Solar Radio flux ($F_{10.7}$)*, Space Weather, 11, 394.
- Veronig, A.M.; M. Temmer dan A.D. Hanslmeier, 2003. *The Solar Soft X-Ray Background and its Relation to Flare Occurrence*, Solar Physics, 219, 125.
- Wagner, W.J., 1998. *Observation of 1-8 Å Solar X-ray Variability During Solar Cycle 21*, Advances in Space Research, 8, 67.
- Watari, S. 2009. *Space Weather Forecast using Real-Time Data*, Journal of the National Institute of Information and Communications, 56, 485.

