

EVALUASI PREDIKSI AKTIVITAS GEOMAGNET DALAM SWIFTS TAHUN 2015-2017

(AN EVALUATION OF THE GEOMAGNETIC ACTIVITY FORECAST ON SWIFTS DURING 2015-2017)

Anton Winarko

Pusat Sains Antariksa,
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
e-mail: anton.winarko@lapan.go.id

ABSTRAK

Riwayat Artikel:

Diterima:
13 Desember 2017
Direvisi:
26 Juni 2018
Disetujui:
28 September 2018
Diterbitkan:
19 Nopember 2018

Kata kunci:

SWIFtS, prediksi
aktivitas geomagnet,
indeks geomagnet,
akurasi

Program *Space Weather Information and Forecast Services* yang dicetuskan oleh Pusat Sains Antariksa – Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional telah berjalan sejak 2015 dan merupakan penyempurnaan dari layanan informasi cuaca antariksa sebelumnya. Terdapat beberapa kerangka utama program tersebut, salah satunya prediksi aktivitas geomagnet, yang mengalami beberapa perubahan metode setiap tahunnya. Tolok ukur keberhasilan suatu proses prediksi adalah akurasi. Untuk mengetahui tingkat performa prediksi aktivitas geomagnet, dilakukan analisis statistik terhadap data prediksi pada tahun 2015 hingga pertengahan 2017. Berdasarkan hasil analisis data, akurasi prediksi aktivitas geomagnet mengalami peningkatan setiap tahunnya, berturut turut dari 2015 hingga pertengahan 2017 : 57,14%, 67,71% dan 82,27%. Hal ini disebabkan oleh perubahan parameter indeks Kp menjadi indeks Dst sebagai pengganti indeks K yang merupakan acuan aktivitas geomagnet dan menurunnya jumlah hari aktivitas terganggu.

ABSTRACT

Keywords:

Swifts, geomagnetic
activity, geomagnetic
indices, accuracy

The *Space Weather Information and Forecast Services* program initiated by the Space Science Center - National Aeronautics and Space Institute has been running since 2015 and is an improvement of the former space weather information service. There are several key aspects of the program, one of them is geomagnetic activity prediction, which undergoes several method changes every year. The measurement of success of the prediction process is accuracy. To determine the level of performance prediction of geomagnet activity, statistical analysis of forecasting data in 2015 to mid 2017 has been conducted. Based on the data analysis, the accuracy of geomagnet activity prediction increased every year, respectively from 2015 until mid 2017: 57.14%, 66.4% and 82.27%. This was caused by the change of Kp index parameter to Dst index as an alternative option for index K which is a main reference of geomagnet activity and also caused by fewer disturbed days.

1. PENDAHULUAN

Kehidupan manusia di era modern semakin bergantung kepada teknologi antariksa. Teknologi antariksa sangat dipengaruhi oleh cuaca antariksa, yang digerakkan oleh Matahari. Aktivitas matahari memicu partikel bermuatan berkecepatan tinggi yang membawa medan magnet dan energi ke ruang antarplanet dan berpotensi mencapai orbit Bumi, mengakibatkan gangguan geomagnet dan dapat mempengaruhi teknologi manusia seperti *discharge* satelit, dan gangguan jaringan listrik akibat *Geomagnetically Induced Current* (GIC) (Overbye et al., 2013).

Dengan resiko tersebut, diperlukan adanya suatu layanan informasi prakiraan atau prediksi apa, kapan, dimana dan bagaimana gangguan cuaca antariksa yang berpotensi menimbulkan kerusakan teknologi dan dapat mengganggu kehidupan manusia.

SWIFtS (*Space Weather Information and Forecast Services*) yang diinisiasi oleh Pusat Sains Antariksa LAPAN pada tahun 2015 merupakan langkah nyata dalam mewujudkan layanan informasi prediksi cuaca antariksa, salah satunya aktivitas geomagnet. Dalam perkembangannya, sejak 2016 SWIFtS telah bergabung dalam *International Space Environment Services* (ISES) bersama negara-negara lain sebagai *Regional Warning Center*. Keikutsertaan pada skala internasional ini tentu menuntut kualitas layanan prediksi yang prima (*excellent service*).

Tolok ukur keberhasilan suatu prediksi adalah akurasi. Tingkat akurasi yang tinggi artinya informasi prediksi menghasilkan layanan prima. Sebaliknya, akurasi yang rendah memerlukan upaya perbaikan untuk peningkatan kualitas layanan tersebut, sebagaimana salah satu misi LAPAN tahun 2015-2019 yaitu meningkatkan kualitas produk teknologi dan informasi di bidang penerbangan dan antariksa dalam memecahkan permasalahan nasional. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat akurasi prediksi aktivitas geomagnet sejak awal 2015 hingga pertengahan 2017 sebagai salah satu bagian utama layanan SWIFtS.

2. LANDASAN TEORI

Pada tahun 2015, Pusat Sains Antariksa LAPAN mulai mengoperasikan sistem layanan informasi dan prediksi cuaca antariksa SWIFtS, yang merupakan pengembangan sistem informasi cuaca antariksa sebelumnya. SWIFtS berbasis web, dan diakses melalui swifts.sains.lapan.go.id.

Saat ini terdapat 3 observasi dan prediksi utama yang tertera pada halaman SWIFtS : aktivitas (flare) Matahari, geomagnet dan ionosfer. Adapun prediksi tambahan untuk pengguna seperti prediksi radio blackout, fluks elektron dan proton disediakan di halaman yang sama pada bagian *essential information for space weather communities* (prakiraan khusus pengguna).

Prediksi aktivitas geomagnet sebagai salah satu informasi utama yang ditampilkan pada SWIFtS memegang peranan penting. Secara fisis aktivitas geomagnet merupakan gambaran respons medan magnet Bumi terhadap fenomena dari Matahari. Aktivitas geomagnet juga diketahui berkorelasi baik dengan kondisi ionosfer, terutama pada aktivitas geomagnet tinggi (Fuller-Rowell et al., 1994; Mannucci et al., 2005; Nava et al., 2016).

Untuk menentukan tingkat aktivitas geomagnet, digunakan beberapa indeks geomagnet yaitu indeks K lokal, indeks Kp dan indeks Dst. Indeks-indeks geomagnet ini pada dasarnya merupakan suatu nilai yang merepresentasikan amplitudo dari parameter fisisnya.

Indeks K ($K = \text{Kennziffer}$, dari bahasa Jerman yang artinya kode atau nomor referensi) merupakan parameter utama yang menjadi acuan untuk menentukan kategori tingkat aktivitas geomagnet. Indeks K diperkenalkan oleh Bartels tahun 1939 dan merupakan indeks yang dihitung setiap 3 jam dari stasiun tunggal. Rentang waktu 3 jam-an ini dipandang sebagai waktu optimal (tidak terlalu singkat dan tidak pula terlalu panjang) untuk mengamati gangguan geomagnet dengan baik bahkan ketika 2 gangguan terjadi secara berturutan. Karena data yang digunakan adalah data dari stasiun tunggal, maka indeks K menggambarkan kondisi geomagnet regional lokal dengan

baik (Bartels *et al.*, 1939; Juangsih, 2015) sehingga menjadi prioritas pertama dalam penentuan tingkat aktivitas geomagnet.

Adakalanya data magnetometer dari stasiun lokal terputus akibat terjadinya gangguan jaringan atau kerusakan alat sehingga indeks K tidak tersedia. Oleh karena itu diperlukan data indeks geomagnet pengganti untuk menentukan tingkat aktivitas geomagnet. Dalam hal ini, digunakan indeks Kp dan indeks Dst sebagai prioritas kedua (cadangan) jika indeks K tidak tersedia.

Indeks Kp menggambarkan rata-rata indeks K terstandarisasi dari 13 stasiun pengamatan geomagnet di antara 44° hingga 60° lintang utara atau selatan geomagnet. Nilai Kp indeks berkisar antara 0-9, dengan subskala 3. Misalnya 4- adalah $3\frac{2}{3}$ sedangkan 4+ adalah $4\frac{1}{3}$. Indeks Kp bersifat global ($Kp = K_{planet}$) dalam menggambarkan aktivitas geomagnet (Rostoker, 1972; O'Brien & Moldwin, 2003). Indeks Kp juga memiliki rentang waktu 3 jam dan dipandang setara dengan indeks K karena indeks tersebut diturunkan dari hasil perhitungan indeks K pada 13 stasiun dan memiliki kontinuitas yang baik, sehingga digunakan sebagai indeks geomagnet pengganti pada SWIFTS tahun 2015.

Intensitas gangguan geomagnet dapat diketahui berdasarkan Injeksi partikel angin surya ke lingkungan antariksa bumi yang selanjutnya terjebak di magnetosfer bumi di sekitar daerah ekuator. Partikel-partikel tersebut bergerak bolak-balik di antara dua titik pantul yang terletak di

hemisfer selatan dan utara. Elektron mengalami drift ke arah-timur sedangkan ion ke arah-barat sehingga akumulasi dari efek gerak tersebut menimbulkan arus listrik yang dikenal sebagai arus cincin. Arus cincin mengalir menuju barat dan bersifat diamagnetik yang menginduksi medan magnet dalam arah berlawanan dengan medan magnet bumi. Oleh karena itu, sebagai akibatnya keberadaan arus cincin mengakibatkan terjadinya pengurangan kekuatan medan magnet bumi. Indeks Dst (*Disturbance Storm Time*) menggambarkan kekuatan arus cincin dan bernilai negatif ketika medan magnet Bumi melemah (sementara arus cincin menguat) pada saat terjadi gangguan geomagnet (Sugiura, 1963; Rastätter *et al.*, 2013).

Sejak tahun 2016, indeks Dst digunakan sebagai cadangan/prioritas kedua untuk menentukan tingkat aktivitas geomagnet SWIFTS. Dibandingkan indeks Kp, indeks Dst dianggap lebih baik digunakan untuk wilayah Indonesia karena indeks Dst diperoleh dari 4 stasiun pengamatan yang terletak di daerah sekitar lintang rendah yaitu Hermanus (34,4° LS; 19,22° BT), Kakioka (36.23° LU; 140,18° BT), Honolulu (21,32° LU; 158° BB) dan San Juan (18,12° LU; 66,15 BB). Dalam penerapannya untuk penentuan tingkat aktivitas geomagnet dalam SWIFTS, digunakan konversi indeks K untuk wilayah Indonesia sebagaimana tabel 2-1 (Juangsih, 2015).

Tabel 2-1 Konversi indeks K untuk wilayah Indonesia (Juangsih, 2015)

Tingkat aktivitas geomagnet	Indeks K	Indeks Dst (nT) / Gangguan ΔH
Quiet (tenang)	1-3	≥ -25.4
Active (aktif)	4	$-25.5 - (-44.9)$
Minor storm (badai lemah)	5	$-45 - (-79.2)$
Moderate storm (badai sedang)	6	$-79.3 - (-139.6)$
Major storm (badai kuat)	7	$-139.7 - (-245.9)$
Severe storm (badai sangat kuat)	≥ 8	≤ -246

3. DATA DAN METODE

Data yang digunakan dalam studi ini adalah data prediksi aktivitas geomagnet dari tahun 2015 hingga pertengahan 2017

yang terekam dalam *Forecast Report Form* (FRF). Data prediksi berupa tingkat aktivitas geomagnet yang dikuantisasi seperti dipaparkan pada tabel 3-1. Terdapat perbedaan jumlah tingkat aktivitas

geomagnet pada 2015 dengan 2016 dan setelahnya, sehingga pengolahan data dilakukan terpisah. Data prediksi kemudian diverifikasi dengan data aktual, yaitu kondisi aktivitas geomagnet sebenarnya.

Pada awal masa ditetapkan, tahun 2015, prediksi untuk jangka waktu lebih dari 1 hari berikutnya digeneralisasi dan diestimasi berdasarkan kondisi paling terganggu. Sementara sejak Februari 2017, prediksi untuk lebih dari 1 hari ke depan dilakukan per hari ($n \times 24$ jam, dengan n adalah jumlah hari prediksi). Kekosongan data dikarenakan pada hari libur besar keagamaan (idul fitri dan natal) tidak dilakukan prediksi.

Verifikasi hasil prediksi menggunakan tabel kontingensi untuk mengukur hubungan antara dua variabel yaitu prediksi dan realitas. Parameter aktivitas geomagnet dalam SWIFT terdiri atas 6 tingkatan, dan prediksi tiap tingkatan bersifat dikotomi atau hanya terbagi atas 2 kemungkinan : terjadi atau tidak, sehingga masing-masing tingkatan dibuat tabel kon-

prediksi (Accadia *et al.*, 2003; Allouche *et al.*, 2006; Watari *et al.*, 2015; Snook *et al.*, 2016).

Dari tabel kontingensi yang sudah dibentuk dapat diperoleh beberapa informasi statistik untuk dianalisis, yaitu akurasi, frekuensi bias indeks, *false alarm ratio*, *probability of detection*, *critical success index*, *kappa statistik* dan *true skill statistic*.

Akurasi menyatakan benar atau tidaknya prediksi aktivitas geomagnet. Akurasi dikotomi dihitung menggunakan rumus:

$$accd = \frac{Hit + CNE}{Hit + FA + Miss + CNE} \dots\dots\dots (3-1)$$

nilai akurasi berada pada rentang 0 sampai 1 atau dalam persen. Akurasi 1 atau 100% adalah akurat sempurna.

Frekuensi Bias Indeks (FBI) yang selanjutnya disebut bias adalah selisih antara nilai harapan dari penduga dengan parameter yang diduga. Bias bernilai antara 0 sampai ∞ dengan nilai terbaik adalah 1. Bias diperoleh dengan persamaan berikut :

$$FBI = \frac{Hit + FA}{Hit + Miss} \dots\dots\dots (3-2)$$

tingensinya dengan bentuk umum seperti pada tabel 3-2. Penggunaan variabel-variabel dalam tabel kontingensi ini lazim dan populer digunakan dalam verifikasi

Tabel 3-1 indeks aktivitas geomagnet

No	2015		2016 - 2017	
	Tingkat aktivitas	Indikator utama	Tingkat aktivitas	Indikator utama
1	Tenang	$K index \leq 3$	Tenang	$K index \leq 3$
2	Aktif	$K index = 4$	Aktif	$K index = 4$
3	Badai lemah	$K index = 5$	Badai lemah	$K index = 5$
4	Badai kuat	$K index = 6$	Badai moderat	$K index = 6$
5	Badai sangat kuat	$K index \geq 7$	Badai kuat	$K index = 7$
6	-	-	Badai sangat kuat	$K index \geq 8$

Tabel 3-2. Tabel kontingensi akurasi forecast

Event forecast	Reality		Marginal total
	Yes	No	
Yes	Hit	False Alarm (FA)	Fc Yes = Hit+FA
No	Miss	Correct Non-Event (CNE)	Fc No = Miss+CNE
Marginal total	Real yes = Hit+Miss	Real No = FA+CNE	ALL data (total)

False Alarm Ratio (FAR) menggambarkan jumlah rasio event yang diprediksi akan terjadi, namun tidak terjadi (Stephenson, 2000). FAR dihitung menggunakan rumus :

$$FAR = \frac{FA}{Hit+FA} \dots\dots\dots(3-3)$$

Pada prediksi aktivitas geomagnet, FAR ini disebut sebagai rasio *overestimated* dan *underestimated*.

Probabilitas untuk mendeteksi kejadian "ya" dapat terprediksi dinyatakan dalam *Probability of Detection* (POD), yang dihitung menggunakan:

$$POD = \frac{Hit}{Hit+Miss} \dots\dots\dots(3-4)$$

Kemampuan prediksi diukur menggunakan *True Skill Statistic/Hanssen & Kuiper's Skill Score* (Hanssen & Kuipers, 1965; Accadia et al., 2003) dan *Critical Success Index* (CSI) (Donaldson et al., 1975; Jiet al., 2013). CSI adalah perbandingan jumlah kejadian yang diprediksi dengan benar terhadap seluruh kejadian yang diamati dan diprediksi. Rentang nilai CSI ini antara 0-1, 1 adalah skill prediksi terbaik dan 0 artinya tanpa skill prediksi. CSI dihitung dengan :

$$CSI = \frac{Hit}{Hit+FA+Miss} \dots\dots\dots(3-5)$$

dan untuk TSS:

$$TSS = \frac{(Hit-CNE)-(FA-Miss)}{[(Hit+Miss)(FA+CNE)]} \dots\dots\dots(3-6)$$

Rentang nilai TSS antara -1 sampai 1, dengan 1 adalah skill prediksi terbaik dan 0 artinya skill tanpa prediksi. Nilai negatif berarti prediksi tidak berdasar.

Verifikasi prediksi juga menggunakan *Cohen's kappa (k)*, yang paling populer digunakan pada prediksi dikotomi (Allouche, 2006). Nilai *k* mengukur fraksi prediksi yang bernilai *true* (akurat) namun dalam prosesnya mengeliminasi prediksi akurat yang mungkin diakibatkan prediksi random. Untuk memperoleh *k*, digunakan persamaan :

$$k = \frac{(Hit+CNE)-(expected\ correct)_{random}}{N-(expected\ correct)_{random}} \dots\dots\dots(3-7)$$

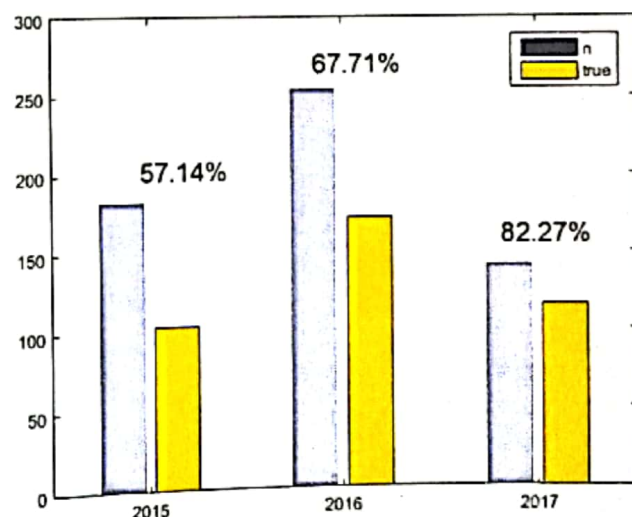
Dengan

$$(expected\ correct)_{random} = \frac{1}{N} [(Hit + miss)(Hit + FA) + (CNE + miss)(CNE + FA)] \dots\dots\dots(3-8)$$

Verifikasi prediksi dilakukan berdasarkan data tahun *forecast* untuk mengetahui pengaruh perubahan metode prediksi.

4. PEMBAHASAN

Dengan total jumlah data hari prediksi $n = 577$, akurasi prediksi yang dilakukan sejak 2015 hingga pertengahan 2017 adalah sebesar 67,94%. Gambar 4-1 menampilkan akurasi prediksi aktivitas geomagnet per tahun dalam kurun waktu antara 2015-2017. Tampak bahwa akurasi prediksi meningkat setiap tahunnya. Sebelumnya akurasi pada tahun pertama adalah 57,14% (Winarko, 2016). Berturut-turut akurasi prediksi aktivitas geomagnet pada 2016 dan 2017 adalah 67,71% dan 82,27%.



Gambar 4-1 Akurasi prediksi geomagnet April 2015 – Mei 2017. Daerah berwarna biru gelap adalah jumlah data hari prediksi, sedangkan kuning adalah jumlah prediksi yang akurat.

Perubahan prosedur untuk prediksi dengan jangka waktu >1 hari sebagaimana telah disebutkan pada Bab 3 turut mempengaruhi akurasi prediksi. Akurasi prediksi >1 hari setelah perubahan prosedur (Februari-Mei 2017) adalah 82,35%; lebih baik dari sebelumnya (April 2015 – Januari 2017) sebesar 48,24%.

Dengan populasi data total (2015-2017) sebanyak 140, akurasi untuk prediksi >1 hari aktivitas geomagnet adalah 62,14%.

Salah satu fungsi utama prediksi cuaca antariksa adalah sebagai peringatan dini yang selanjutnya mendorong tindakan preventif atau mitigasi resiko. Jika kita mengabaikan tingkat gangguan geomagnet yang terjadi, maka secara umum kemampuan mendeteksi gangguan geomagnet adalah sebesar 77,16%, nilai ini sedikit lebih baik dibandingkan dengan kemampuan deteksi gangguan geomagnet pada tahun pertama program SWIFTs dijalankan yaitu 74,18% (Winarko, 2016).

Telah dipaparkan pada bab sebelumnya bahwa terdapat perbedaan dalam hal jumlah tingkatan aktivitas geomagnet antara prediksi tahun 2015 dengan tahun-tahun setelahnya. Pada 2015 tingkatan aktivitas geomagnet mengadopsi FRF yang digunakan NICT Jepang yang tidak memiliki tingkat badai moderat (Watari *et al.*, 2015). Selain itu, digunakan pula indeks Kp sebagai prioritas kedua untuk menetapkan status aktivitas geomagnet jika indeks k lokal tidak tersedia. Tingkat badai moderat dan penggunaan indeks Dst sebagai pengganti indeks Kp baru diberlakukan di SWIFTs pada tahun 2016 seiring dengan digunakannya konversi indeks K - indeks Dst untuk wilayah Indonesia (Juangsih, 2015). Seperti diuraikan pada tabel 3-1, tingkat badai moderat ditambahkan dan diletakkan di antara tingkat badai lemah dan badai kuat. Dengan penambahan tingkat ini, secara matematis peluang prediksi bernilai "ya" berkurang dari $\frac{1}{5}$ menjadi $\frac{1}{6}$. Namun hal tersebut dapat diabaikan karena prediksi cuaca antariksa diperoleh melalui analisis saintifik dan bukan merupakan parameter random.

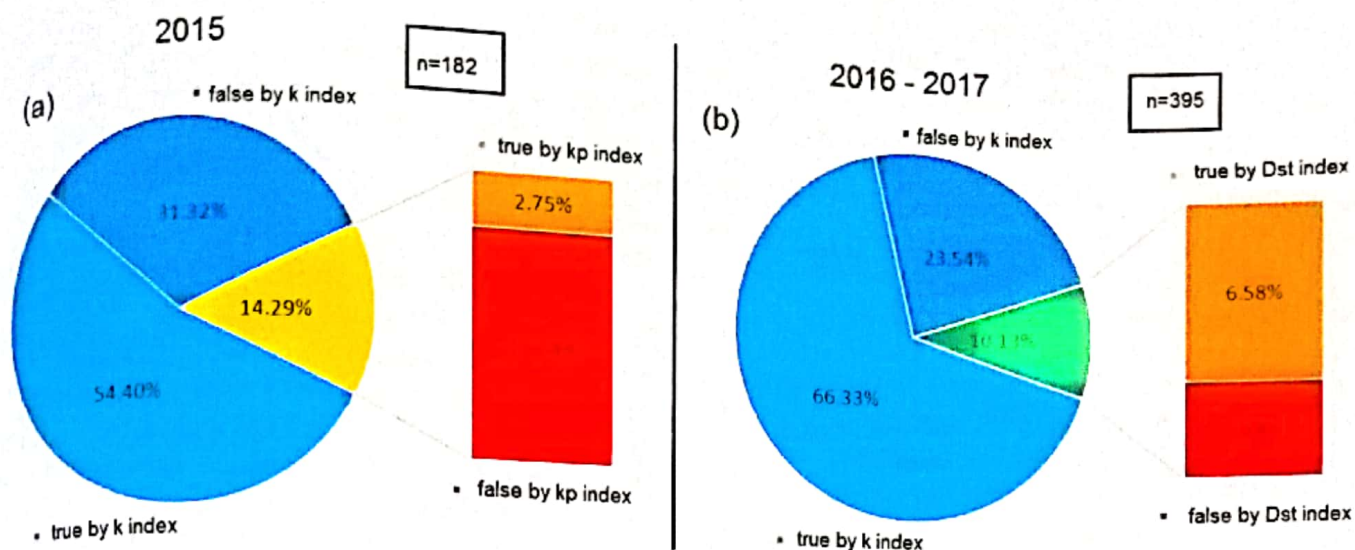
Berdasarkan arsip data FRF, perubahan penggunaan indeks Dst untuk menggantikan indeks Kp memiliki pengaruh cukup signifikan sebagaimana sketsa diagram lingkaran pada gambar 4-2. Kedua warna biru, gelap dan terang, adalah

proporsi data prediksi yang menggunakan indeks K sebagai acuan. Biru terang adalah akurat, sementara biru gelap adalah prediksi meleset.

Pada tahun 2015 (gambar 4-2a), dari 26 hari yang dievaluasi menggunakan indeks Kp (daerah kuning), hanya 5 hari (2,75% populasi, warna oranye) prediksi yang akurat, sedangkan 21 sisanya (11,54% populasi, warna merah) bernilai false. Ketidakakuratan ini memberikan kontribusi 26,92% dari total error atau 11,54% dari populasi pada 2015. Sementara dari 40 hari prediksi yang menggunakan indeks Dst pada 2016-2017 (gambar 4-2b, warna hijau), 26 hari akurat (6,58% populasi, oranye) dan menyumbang galat 14,63% dari total error (3,54% populasi, merah) pada tahun 2016-2017.

Berdasarkan hal tersebut, dapat dikatakan bahwa penggunaan konversi indeks Dst sebagai prioritas kedua lebih baik dibandingkan indeks Kp. Hal ini dikarenakan meskipun indeks Kp dianggap berlaku global, namun indeks tersebut diturunkan dari indeks K yang distandarisasi (indeks Ks) dari 13 lokasi di sekitar lintang menengah (Rostoker, 1972; Ayala Solares *et al.*, 2016), sementara indeks Dst pada prinsipnya menggambarkan tingkat kekuatan arus cincin yang observasinya dilakukan di 4 stasiun lintang rendah (Sugiura, 1963; Rastätter *et al.*, 2013), sehingga aproksimasinya dianggap lebih baik untuk pengukuran dan pengamatan aktivitas geomagnet di Indonesia dibandingkan indeks Kp.

Untuk menganalisis prediksi pada tiap tingkatan aktivitas geomagnet, dilakukan verifikasi prediksi dikotomi (ya/tidak terjadi), yang pengolahan datanya dilakukan per tahun. Verifikasi prediksi dikotomi ini secara sederhana menjawab pertanyaan "apakah akan terjadi [tingkat aktivitas geomagnet]?"



Gambar 4-2 Proporsi populasi penggunaan indeks geomagnet dalam prediksi dan observasi aktivitas geomagnet SWIFTs : a) indeks K dan indeks Kp pada 2015; b) indeks K dan indeks Dst pada 2016-2017.

Tabel 4-1 Parameter verifikasi prediksi dikotomi tahun 2015-2017

2015							
Tingkat aktivitas geomagnet	accd	FBI	FAR	POD	TSS	CSI	k
tenang	0.74	0.77	0.13	0.66	0.52	0.60	0.49
aktif	0.65	1.89	0.68	0.61	0.26	0.26	0.20
badai lemah	0.85	0.95	0.62	0.36	0.28	0.23	0.29
badai kuat	0.91	0.54	0.71	0.15	0.12	0.11	0.16
badai sangat kuat	0.99	0.00	n/a	0.00	0.00	0.00	0.00

2016							
Tingkat aktivitas geomagnet	accd	FBI	FAR	POD	TSS	CSI	k
tenang	0.76	0.87	0.12	0.77	0.49	0.70	0.44
aktif	0.72	1.71	0.65	0.60	0.35	0.29	0.27
badai lemah	0.89	0.53	0.90	0.05	0.01	0.04	0.02
badai moderat	0.99	0.50	1.00	0.00	0.00	0.00	0.01
badai kuat	1.00	-	-	-	-	-	-
badai sangat kuat	1.00	-	-	-	-	-	-

2017							
Tingkat aktivitas geomagnet	accd	FBI	FAR	POD	TSS	CSI	k
tenang	0.84	1.05	0.12	0.93	0.46	0.82	0.50
aktif	0.84	1.00	0.48	0.52	0.43	0.35	0.43
badai lemah	0.97	0.20	0.00	0.20	0.20	0.20	0.33
badai moderat	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
badai kuat	1.00	-	-	-	-	-	-
badai sangat kuat	1.00	-	-	-	-	-	-

Pada tabel 4-1 verifikasi terhadap prediksi aktivitas geomagnet harian dikotomi ditunjukkan dengan parameter akurasi dikotomi (accd), bias (FBI), False Alarm Ratio (FAR), Probability of Detection (POD), True Skill Statistic (TSS), Critical Success Index (CSI) dan kappa statistik (k). Penjelasan Hit, Miss, FA dan CNE yang digunakan untuk perhitungan parameter verifikasi prediksi sebagaimana dijelaskan sebelumnya pada tabel kontingensi 3-2. *Highlight* abu-abu pada tingkat badai kuat dan badai sangat kuat menandakan ketiadaan kedua tingkat aktivitas geomagnet tersebut baik dalam prediksi maupun realitas pada tahun 2016 dan 2017.

Berdasarkan verifikasi data prediksi tahun 2015-2017 pada tabel 4-1, akurasi terbaik adalah pada prediksi tingkat tenang, masing-masing bernilai 0,74; 0,76; dan 0,84. Hal ini selaras dengan kemampuan mendeteksi hari tenang (POD): 0,66; 0,77; 0,93. Apabila dirata-ratakan, artinya, 78,67% hari tenang dapat dideteksi dan diprediksi dengan baik.

Sebagaimana halnya dengan tingkat tenang, tingkat aktif menunjukkan akurasi dikotomi yang cukup baik dan meningkat setiap tahunnya : 0,65; 0,72; 0,84; namun, nilai kemampuan deteksinya cenderung regresif : 0,61; 0,61; 0,52. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat aktif lebih sulit diprediksi dengan baik dibandingkan hari tenang.

Nilai akurasi dikotomi yang tinggi ditunjukkan pada tingkat badai lemah, badai moderat, badai kuat dan badai sangat kuat. Namun hal tersebut bukan sepenuhnya merupakan keberhasilan prediksi, dikarenakan kemampuan deteksi (yang ditunjukkan oleh POD) amat rendah, dan tingginya akurasi lebih dikarenakan dominasi CNE. Akurasi dikotomi prediksi badai kuat dan sangat kuat pada tahun 2016 dan 2017 bahkan menunjukkan nilai akurat sempurna 1 dengan CNE 100% populasi, artinya sepanjang tahun-tahun tersebut tim forecaster sama sekali tidak memprediksi akan adanya badai kuat dan badai sangat kuat, dan pada kenyataannya memang tidak terjadi keduanya dalam kurun waktu tersebut. Sedangkan perbandingan aktivitas geomagnet yang tidak diprediksi terhadap total prediksi kejadian

direpresentasikan dengan nilai FAR. Nilai FAR tertinggi (1) berada pada tingkat badai moderat tahun 2016, ketika tim forecaster satu kali memperkirakan akan terjadi badai moderat, namun kenyataannya tidak terjadi, bahkan, realitas 2 kejadian badai moderat terlewatkan (*miss*).

Prediksi aktivitas geomagnet dalam SWIFTs mayoritas cenderung *under-forecast* yang ditunjukkan oleh nilai bias (FBI). Bias menyatakan rasio frekuensi event prediksi terhadap frekuensi observasi. Prediksi dapat memiliki tendensi untuk *under-forecast* ($\text{bias} < 1$) atau *over-forecast* ($\text{bias} > 1$). Bias tidak menunjukkan kualitas respons prediksi terhadap observasi, melainkan hanya mengukur frekuensi relatifnya (Guler et al., 2017). Nilai bias terbaik adalah 1, dan diperoleh pada prediksi aktif tahun 2017. Kecenderungan *under-forecast* berarti bahwa *error* yang terjadi mayoritas disebabkan karena aktivitas geomagnet yang terjadi lebih kuat dari yang diprediksi.

Kemampuan prediksi ditunjukkan oleh 3 parameter: TSS, CSI dan k . Ketiganya menunjukkan bahwa kemampuan memprediksi hari tenang lebih baik dibandingkan tingkat lainnya. CSI menggambarkan kemampuan prediksi yang proporsional terhadap frekuensi event yang diprediksi (Schaefer, 1990; Snook et al., 2016), dengan kata lain menyatakan seberapa baik prediksi "ya" berkorespondensi dengan kejadian "ya". Jika dilakukan interpolasi terhadap sampel data, CSI lebih terpengaruh dibandingkan TSS (Accadia et al., 2003). Nilai CSI terbaik pada kurun waktu tahun 2015-2017 adalah pada tingkat tenang dan selalu meningkat : 0,60; 0,70; 0,82.

Seperti CSI, nilai TSS terbaik berada pada tingkat tenang, namun semakin menurun : 0,52; 0,49; 0,46. Perbedaannya dengan CSI adalah, TSS adalah kemampuan memprediksi kejadian "ya" dan "tidak", dan akan bernilai positif sepanjang Hit lebih besar dibanding FA. TSS menjawab pertanyaan "seberapa baik tingkat metode prediksi dalam membedakan kejadian 'ya' dan 'tidak'?" (Hanssen & Kuipers, 1965; Accadia et al., 2003). Sedangkan untuk menyatakan kemampuan prediksi relatif terhadap peluang random, digunakan k . Adapun nilai k pada tingkat tenang : 0,49; 0,44;

0,50. Sebagai *threshold*, nilai $k \geq 0,4$ adalah nilai kemampuan prediksi yang baik

(Landis & Koch, 1977).

Tabel 4-2 akumulasi prediksi dan observasi aktivitas geomagnet berdasarkan tabel kontingensi

Tingkat aktivitas geomagnet	2015							
	hit	fa	cne	miss	real yes	real no	fc yes	fc no
tenang	71	11	64	36	107	75	82	100
aktif	23	49	95	15	38	144	72	110
badai lemah	8	13	147	14	22	160	21	161
badai kuat	2	5	164	11	13	169	7	175
badai sangat kuat	0	0	180	2	2	180	0	182

Tingkat aktivitas geomagnet	2016							
	hit	fa	cne	miss	real yes	real no	fc yes	fc no
tenang	142	19	50	43	185	69	161	93
aktif	29	53	153	19	48	206	82	172
badai lemah	1	9	226	18	19	235	10	244
badai moderat	0	1	251	2	2	252	1	253
badai kuat	0	0	254	0	0	254	0	254
badai sangat kuat	0	0	254	0	0	254	0	254

Tingkat aktivitas geomagnet	2017							
	hit	fa	cne	miss	real yes	real no	fc yes	fc no
tenang	103	14	16	8	111	30	117	24
aktif	12	11	107	11	23	118	23	118
badai lemah	1	0	136	4	5	136	1	140
badai moderat	0	0	139	2	2	139	0	141
badai kuat	0	0	141	0	0	141	0	141
badai sangat kuat	0	0	141	0	0	141	0	141

Parameter-parameter pada verifikasi prediksi tingkat aktivitas geomagnet menyatakan bahwa prediksi geomagnet memiliki performa yang baik pada aktivitas rendah atau G0 (tenang dan aktif) namun gagal memberikan hasil yang memuaskan pada aktivitas tinggi (G1-G5). Gambaran akumulasi prediksi dan observasi aktivitas geomagnet sepanjang 2015 hingga pertengahan 2017 seperti ditampilkan pada tabel 4-2. Sebagai salah satu contoh, deteksi badai lemah pada 2015 adalah 0,36 dengan bias 0,95 (POD dan FBI dari tabel 4-1). Artinya pada tahun 2015 tim *forecaster* dengan tendensi untuk *under-forecast* hanya dapat mendeteksi 36% (8 kejadian) badai lemah, dan melewatkan 64% (14 kejadian) badai lemah sisanya. Performa yang buruk pada aktivitas tinggi juga terlihat dari kemampuan

prediksi badai sangat kuat pada 2015 yang ketiga parameternya (CSI, TSS dan k) bernilai nol yang diartikan sebagai prediksi tanpa skill, dalam hal ini dapat diinterpretasikan sebagai kurangnya pemahaman fisis, metode yang kurang tepat, ataupun kurangnya pengalaman tim *forecaster* dalam memprediksi aktivitas tinggi geomagnet. Jika diperhatikan bahwa pada tabel 4-2, pada 2015 terjadi 2 kali badai sangat kuat yang keduanya terlewatkan oleh tim *forecaster*.

Tabel 4-2 juga menunjukkan bahwa jumlah hari terganggu (tingkat aktif atau lebih tinggi) setiap tahunnya mengalami penurunan, yang artinya berbanding terbalik dengan hari tenang. Tingginya akurasi pada aktivitas G0 yang merupakan kejadian mayoritas yang meningkat setiap

tahunnya, turut memberikan kontribusi terhadap akurasi total prediksi.

Hasil-hasil tersebut di atas menunjukkan bahwa prediksi aktivitas geomagnet masih memerlukan upaya peningkatan, perbaikan metodologi pemahaman fisis dalam menghadapi tantangan utamanya yaitu rendahnya performa pada saat aktivitas geomagnet tinggi ($\geq G1$) sehingga akurasi prediksi aktivitas geomagnet sebagai salah satu bagian utama layanan SWIFTs dapat ditingkatkan.

5. KESIMPULAN

Dari studi yang telah dilakukan, disimpulkan bahwa akurasi prediksi aktivitas geomagnet mengalami peningkatan secara berturut-turut dari tahun 2015 hingga pertengahan 2017 dengan nilai akurasi: 57.14%, 67.71% dan 82.27%. Hal ini disebabkan oleh perubahan parameter indeks Kp menjadi indeks Dst sebagai pengganti indeks K yang merupakan acuan utama aktivitas geomagnet dan menurunnya jumlah hari aktivitas terganggu. Performa prediksi aktivitas geomagnet pada tingkat rendah (G0) memberikan kontribusi yang baik terhadap akurasi namun tidak demikian halnya dengan tingkat tinggi (G1-G5). Performa prediksi terutama pada aktivitas tinggi geomagnet masih memerlukan perbaikan untuk meningkatkan kualitas prediksi aktivitas geomagnet sebagai salah satu bagian utama layanan SWIFTs.

DAFTAR RUJUKAN

- Accadia, C., Mariani, S., Casaioli, M., Lavagnini, A., & Speranza, A. (2003). Sensitivity of precipitation forecast skill scores to bilinear interpolation and a simple nearest-neighbor average method on high-resolution verification grids. *Weather and forecasting*, 18(5), 918-932.
- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of applied ecology*, 43(6), 1223-1232.
- Ayala Solares, J. R., Wei, H. L., Boynton, R. J., Walker, S. N., & Billings, S. A. (2016). Modeling and prediction of global magnetic disturbance in near-Earth space: A case study for Kp index using NARX models. *Space Weather*, 14(10), 899-916.
- Bartels, J., Heck, N. A., & Johnston, H. F. (1939). The three-hour-range index measuring geomagnetic activity. *Journal of Geophysical Research*, 44(4), 411-454.
- Fuller-Rowell, T. J., Codrescu, M. V., Moffett, R. J., & Quegan, S. (1994). Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 99(A3), 3893-3914.
- Guler, K., Ng, P. T., & Xiao, Z. (2017). Mincer-Zarnowitz quantile and expectile regressions for forecast evaluations under asymmetric loss functions. *Journal of Forecasting*.
- Hanssen, A. W., & Kuipers, W. J. A. (1965). On the Relationship Between the Frequency of Rain and Various Meteorological Parameters : (with Reference to the Problem of Objective Forecasting). Staatsdrukkerij - en Uitgeverijbedrijf.
- Ji, E. Y., Moon, Y. J., Park, J., Lee, J. Y., & Lee, D. H. (2013). Comparison of neural network and support vector machine methods for Kp forecasting. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(8), 5109-5117.
- Juangsih, M. (2015). Penentuan Indeks K Geomagnet Untuk Daerah Indonesia. Tesis Magister Sains Kebumihan ITB.
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *biometrics*, 159-174.
- Mannucci, A. J., Tsurutani, B. T., Iijima, B. A., Komjathy, A., Saito, A., Gonzalez, W. D., ... & Skoug, R. (2005). Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29-30, 2003 "Halloween Storms". *Geophysical Research Letters*, 32(12).
- Nava, B., Rodriguez-Zuluaga, J., Alazo-Cuartas, K., Kashcheyev, A., Migoya-Orué, Y., Radicella, S. M., Amory-Mazaudier, C., Fleury, R. (2016). Middle-and low-latitude ionosphere response to 2015 St. Patrick's Day geomagnetic storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(4), 3421-3438.
- Overbye, T. J., Shetye, K. S., Hutchins, T. R., Qiu, Q., & Weber, J. D. (2013). Power grid sensitivity analysis of geomagnetically induced currents. *IEEE*

- Transactions on Power Systems, 28(4), 4821-4828.
- O'Brien, T. P., & Moldwin, M. B. (2003). Empirical plasmapause models from magnetic indices. *Geophysical research letters*, 30(4).
- Rastätter, L., Kuznetsova, M. M., Gloer, A., Welling, D., Meng, X., Raeder, J., Wiltberger, M., Jordanova, V. K., Yu, Y., Zaharia, S., Weigel, R.S., Sazykin, S., Boynton, R., Wei, H., Eccles, V., Horton, W., Mays, M.L, Gannon, J.(2013). Geospace environment modeling 2008-2009 challenge: Dst index. *Space Weather*, 11(4), 187-205.
- Rostoker, G. (1972). Geomagnetic indices. *Reviews of Geophysics*, 10(4), 935-950.
- Schaefer, J. T. (1990). The critical success index as an indicator of warning skill. *Weather and forecasting*, 5(4), 570-575.
- Snook, N., Jung, Y., Brotzge, J., Putnam, B., & Xue, M. (2016). Prediction and ensemble forecast verification of hail in the supercell storms of 20 May 2013. *Weather and forecasting* 31:3, 811-825. doi:10.1175/WAF-D-15-0152.1.
- Sugiura, M. (1963). Hourly values of equatorial Dst for the IGY. *Annual International Geophysical Year*, vol. 35. Pergamon, New York.
- Stephenson, D. B., (2000). Use of the "odds ratio" for diagnosing forecast skill. *Weather and forecasting*, 15, 221-232.
- Watari, S., Kato, H., & Yamamoto, K. (2015). Hit rate of space weather forecasts of the Japanese forecast center and analysis of problematic events on the forecasts between June 2014 and March 2015. *Sun and Geosphere*, 10, 163-171.
- Winarko, A., (2016). Sekilas Review Akurasi Prediksi Aktivitas Geomagnet pada SWIFtS 2015. *Buletin Cuaca Antariksa* Vol.5/No.2, April-Juni 2016.