

PROBABILITAS CME BERDASARKAN PARAMETER MEDAN MAGNET UNIVARIAT (PROBABILITY OF CORONAL MASS EJECTION FROM UNIVARIATE MAGNETIC FIELD PARAMETERS)

Rhorom Priyatikanto*, Emanuel Sungging Mumpuni, Tiar Dani, Farahhati Mumtahana, Nana Suryana
Pusat Sains Antariksa
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
Jl. Dr. Djundjuran no. 133 Bandung 40173
*e-mail: rhorom.priyatikanto@lapan.go.id

Diterima 30 Agustus 2018; Direvisi 13 September 2019; Disetujui 13 September 2019

ABSTRACT

Forecasting of flare occurrence and coronal mass ejection (CME) are necessary since those energetic phenomena can effectively influence the space weather on Earth. In this study, we analyzed four magnetic parameters of active region: (1) mean gradient of horizontal magnetic field (MEANGBH), (2) mean helicity (MEANJZH), (3) mean photospheric magnetic free energy (MEANPOT), and (4) mean gradient of total field (MEANGBT) and their potential usage for the input in CME prediction based on linear statistics. Obtained that among those four parameters, MEANGBT is the best parameter for the purpose mentioned. Active regions with $MEANGBT \leq 96$ Gauss/Mm probably produce flare with CME and the True Skill Score for this prediction is ~20%. Even though this achieved score is considerably low, it is proportionally comparable to the other work.

Keywords: *coronal mass ejection, statistical probability, magnetic parameter, active region*

ABSTRAK

Prediksi *flare* dan CME (*coronal mass ejection*, CME) perlu dilakukan mengingat kedua peristiwa energetik tersebut dapat mempengaruhi cuaca antariksa di Bumi secara efektif. Pada studi kali ini, kami menganalisis empat parameter magnet daerah aktif: (1) rerata gradien medan horizontal (MEANGBH), (2) rerata arus puntir (MEANJZH), (3) rerata gradien medan magnet total (MEANGBT), dan (4) rerata energi magnet bebas fotosfer (MEANPOT) serta potensinya sebagai input dalam prediksi CME berbasis statistik linier. Hasilnya, di antara keempat parameter tersebut, MEANGBT merupakan parameter terbaik untuk keperluan tersebut. Daerah aktif dengan $MEANGBT \leq 96$ Gauss/Mm berpotensi menghasilkan *flare* yang disertai CME dan *True Skill Score* dari prediksi ini adalah ~20%. Meski masih tergolong rendah, skor yang didapatkan dapat disandingkan secara proporsional dengan hasil dari peneliti lain.

Kata kunci: *CME, probabilitas statistik, parameter magnet, daerah aktif*

1 PENDAHULUAN

CME (*coronal mass ejection*, CME) merupakan letupan dengan skala paling besar di seantero Tata Surya. Melalui kejadian ini, sejumlah plasma korona ($10^8 - 10^{10}$ ton) lepas dari atmosfer Matahari dan bergerak ke ruang antarplanet dengan kecepatan hingga ~1000 km/s (Chen, 2011). CME banyak berkaitan dengan peningkatan fluks

partikel berenergi tinggi (*solar energetic particles*, SEP), terutama bila terjadi di barat piringan Matahari (Gopalswamy *et al.*, 2008). Aliran partikel semacam inilah yang menjadi ancaman potensial bagi aset antariksa sehingga kejadian CME dan SEP perlu diprakirakan dengan saksama.

Beberapa studi telah dilakukan untuk memprediksi kejadian CME

menggunakan sejumlah prediktor. Peredupan korona yang teramati pada jendela ultraviolet ekstrem dan terjadi beberapa jam sebelum CME dianggap sebagai salah satu prediktor. Secara statistik, 84% kejadian CME dapat dikaitkan dengan peredupan korona sebelumnya (Bewsher *et al.*, 2008). Statistik tersebut dapat dianggap signifikan karena hanya 58% di antaranya yang dapat dikaitkan dengan kejadian acak. Sistem deteksi peredupan korona telah dikembangkan untuk mendukung prediksi CME (Kraaikamp dan Verbeeck, 2015). CME juga dapat dikaitkan dengan *flare* kuat, meski tidak seluruh *flare* dahsyat disertai CME. Qahwaji *et al.* (2008) menggunakan jaringan saraf tiruan (*artificial neural network*) untuk mempelajari keterkaitan antara *flare* dengan karakteristik tertentu (diparameterisasi oleh intensitas dan durasi *flare*) dan CME. Berikutnya, Bobra dan Ilonidis (2016) menggunakan parameter medan magnet daerah aktif untuk memperkirakan terjadinya CME. Pada studi tersebut, metode statistik nonlinier berbasis jaringan saraf tiruan kembali digunakan.

Berdasarkan studi yang dilakukan oleh Bobra dan Ilonidis (2016), terdapat beberapa parameter magnet yang dapat digunakan untuk menentukan apakah suatu *flare* kuat diikuti CME atau tidak. Empat parameter yang menempati peringkat teratas sebagai indikator CME adalah: (1) rerata gradien medan horisontal (MEANGBH), (2) rerata arus puntir (MEANJZH), (3) rerata gradien medan magnet total (MEANGBT), dan (4) rerata energi magnet bebas fotosfer (MEANPOT). Keempat parameter tersebut beserta 14 parameter lain dihitung berdasarkan citra Matahari yang dipotret *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI) yang terpasang pada *Solar Dynamics Observatory* (SDO). Tim ilmuwan SDO/HMI menghitung dan merilis parameter magnet tersebut sebagai

Space-Weather HMI Active Region Patches [SHARPs, Bobra *et al.*, 2014].

Pemanfaatan jaringan saraf tiruan dalam melakukan prediksi aktivitas Matahari memang sedang jamak dilakukan. Namun, jaringan saraf tiruan dapat dikatakan sebagai kotak hitam (*black box*) yang memberikan keluaran yang bersifat nonlinier dan terkadang kontraintuitif. Hal ini menjadi dorongan untuk menguji apakah statistik linier dari parameter magnet daerah aktif dapat digunakan untuk memprediksi kejadian CME yang menyertai *flare* kuat.

2 DATA DAN METODOLOGI

Data yang digunakan dalam studi ini adalah 480 data SHARP (*Space-Weather HMI Active Region Patches*) dari daerah aktif yang menghasilkan *flare* sinar-X dengan fluks puncak lebih dari 10^{-5} W/m² (kelas M1.0 atau lebih kuat) sejak Januari 2010 hingga Agustus 2017. Di antaranya, terdapat 410 data berasosiasi dengan *flare* tanpa CME serta 70 data yang berasosiasi dengan *flare* kuat yang disertai CME. Kelas pertama disebut sebagai kelas negatif (nonCME), sedangkan kelas kedua disebut kelas positif (CME). Data SHARP sendiri merupakan keluaran *pipeline* identifikasi otomatis daerah aktif berdasarkan data vektor medan magnet yang diperoleh menggunakan SDO/HMI. Terdapat 25 parameter magnet daerah aktif yang dapat dihitung berdasarkan data SHARP. Dari data SHARP yang tersedia, diambil nilai dari empat parameter magnet yang menjadi fokus telaah, yakni MEANGBH, MEANJZH, MEANPOT, dan MEANGBT. *Scatter plot* distribusi bivariat dari parameter magnet tersebut disajikan pada Gambar 2-1. Dalam plot tersebut, nilai dari setiap parameter telah ditransformasikan secara linier sehingga nilainya berada pada kisaran 0 dan 1. Tabel 2-1 merangkum nilai minimum dan maksimum yang digunakan dalam transformasi.

Tabel 2-1: NILAI MINIMUM DAN MAKSIMUM PARAMETER MAGNET YANG DIANALISIS.

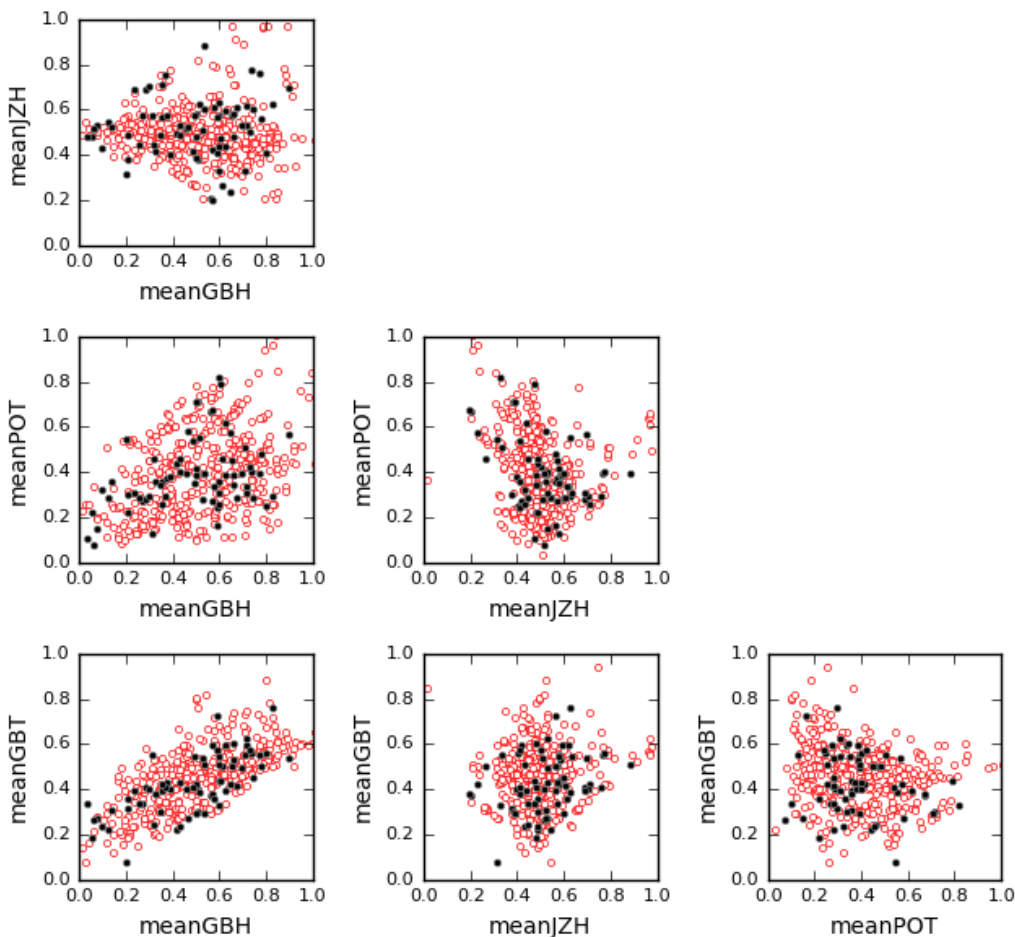
Parameter	Min	Maks	Satuan
MEANGBH	30	80	10 ⁻⁶ G/m
MEANJZH	-4,5	4,5	10 ⁻² G ² /m
MEANPOT	0	25	10 ² J/m ³
MEANGBT	50	145	10 ⁻⁶ G/m

Distribusi univariat dari setiap parameter tersebut akan ditelaah lebih lanjut. Perbandingan antara kelas positif dan negatif akan menjadi prinsip utama dari telaah yang dilakukan. Bila distribusi kelas positif terpisah dari

distribusi kelas negatif, parameter ini menjadi indikator kuat untuk prediksi CME. Sebaliknya, bila distribusi keduanya serupa dan berimpit, parameter tersebut kurang baik untuk dijadikan indikator.

Langkah pertama yang dilakukan adalah membangun *nonparametric probability density function* (PDF) menggunakan metode estimasi kerapatan kernel (*kernel density estimation*, KDE). Secara prinsip, KDE di titik x dari sebaran data $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ dihitung dengan persamaan berikut (Sheather, 2004):

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh\sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{(x-x_i)^2}{2h^2}\right] \dots\dots\dots (2-1)$$



Gambar 2-1: Plot distribusi bivariat pasangan parameter magnet daerah aktif yang menghasilkan *flare* ≥ M1.0 (lingkaran merah) serta yang menghasilkan *flare* ≥ M1.0 dan CME (lingkaran hitam).

Persamaan (2-1) menggunakan fungsi Gaussian sebagai fungsi kernel. Lebar kernel h menentukan tingkat kemulusan dari fungsi distribusi yang dihasilkan. Aturan Silvermann (1986),

$$h = 1,06\sigma^{-0,2} \dots\dots\dots (2-2)$$

digunakan untuk menghitung lebar kernel sebagai fungsi simpangan baku dari data (σ).

Langkah berikutnya adalah menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov (KS) untuk membandingkan distribusi parameter untuk kelas positif dan negatif. Bila uji KS menunjukkan bahwa kedua kelas memiliki distribusi yang berbeda, terdapat kemungkinan untuk menghitung probabilitas CME berdasarkan fungsi distribusi yang telah dibangun. Dengan mengadopsi metode perhitungan probabilitas keanggotaan gugus bintang secara non-parametrik (misalnya Balaguer-Nunez *et al.*, 2007 dan Priyatikanto dan Arifyanto, 2015), probabilitas CME dinyatakan sebagai berikut:

$$PDF = \frac{\hat{f}_p}{\hat{f}_p + \hat{f}_n} \times 100\% \dots\dots\dots (2-3)$$

dengan \hat{f}_p dan \hat{f}_n berturut-turut menyatakan fungsi kerapatan kelas positif dan negatif. Pada prinsipnya, probabilitas tersebut mengikuti definisi klasik bahwa probabilitas merupakan jumlah suatu kejadian dibagi dengan total kejadian yang mungkin.

Untuk menilai seberapa baik parameter MEANGBT dan MEANGBH dalam prediksi, dilakukan simulasi berdasarkan 480 kasus CME yang disebutkan sebelumnya. Dalam setiap tahap simulasi, digunakan nilai ambang spesifik sebagai penentu apakah daerah tersebut diprediksi akan menghasilkan CME atau tidak. Bila nilai parameter magnet suatu daerah aktif kurang dari atau sama dengan nilai ambang tersebut, daerah tersebut diprediksi akan menghasilkan CME dalam 24 jam (*CME-positive*). Sebaliknya, bila daerah tersebut memiliki nilai MEANGBT atau MEANGBH lebih tinggi maka dianggap

CME-negative. Selanjutnya, pada setiap nilai ambang dibuat tabel kontingensi untuk perhitungan skor prediksi.

Tabel 2-2: KONTINGENSI PREDIKSI DAN OBSERVASI YANG DIPAKAI UNTUK PERHITUNGAN SKOR PREDIKSI

		Observasi	
		Positif	Negatif
Prediksi	Positif	a <i>hits</i>	b <i>false alarms</i>
	Negatif	c <i>misses</i>	d <i>correct rejection</i>

Adapun skor yang digunakan meliputi *Percent Correctness (PC)*, *False Alarm Rate (FAR)*, *Probability of Detection (POD)*, *Probability of False Detection (POFD)*, serta *True Skill Score (TSS)*. Berikut adalah persamaan yang digunakan:

$$PC = \frac{a+d}{a+b+c+d} \dots\dots\dots (2-1)$$

$$FAR = \frac{b}{a+b} \dots\dots\dots (2-2)$$

$$POD = \frac{a}{a+c} \dots\dots\dots (2-3)$$

$$POFD = \frac{b}{b+d} \dots\dots\dots (2-4)$$

$$TSS = POD - POFD \dots\dots\dots (2-5)$$

dengan notasi yang dirangkum dalam Tabel 2-2. Skor ini biasa digunakan dalam verifikasi prediksi cuaca antariksa (misalnya Devos *et al.*, 2014; Crown, 2016).

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

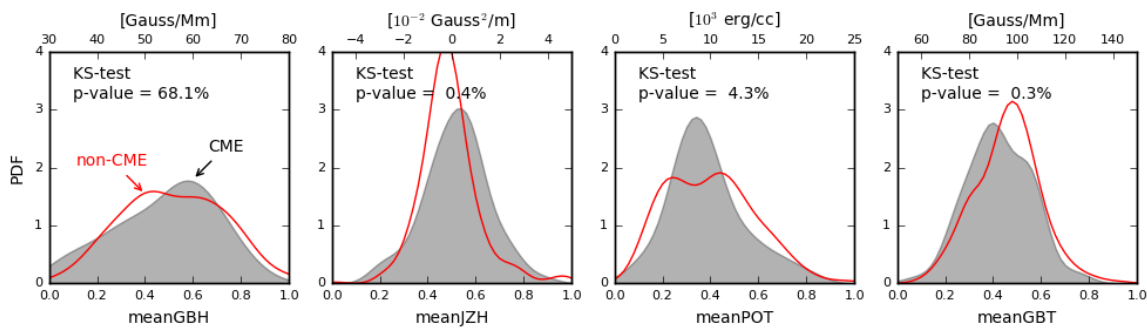
Gambar 3-1 menyajikan fungsi distribusi nonparametrik yang dibangun berdasarkan parameter magnet daerah aktif penghasil *flare* $\geq M1.0$, baik yang disertai CME maupun tidak. Distribusi MEANGBH memiliki profil yang melebar/landai, berbedan dengan profil distribusi normal. PDF yang dikonstruksi dari sampel CME tidak jauh berbeda dibandingkan PDF dari sampel nonCME. Uji Kolmogorov-Smirnov menghasilkan nilai $p = 68,1\%$, jauh lebih besar dari

ambang 5% sehingga *null-hypotheses* bahwa kedua sampel memiliki distribusi yang serupa tidak dapat ditolak.

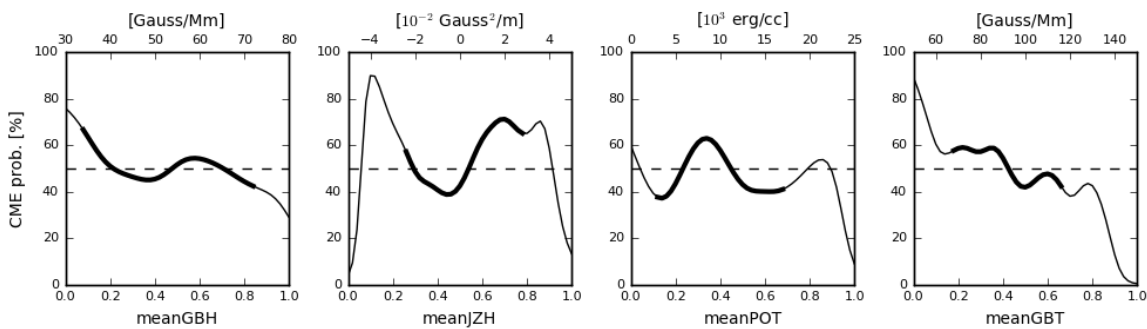
Parameter MEANJZH tampak memiliki distribusi yang simetris, tetapi puncak distribusi sampel CME tidak berimpit dengan puncak distribusi dari sampel nonCME. Uji KS memberikan hasil $p = 0,4\%$ sehingga distribusi dari kedua sampel dapat dianggap memiliki perbedaan yang signifikan. Hal yang sama juga dapat diamati pada distribusi parameter MEANGBT. Untuk parameter ini, uji KS menghasilkan $p = 0,3\%$. Kemudian, uji KS yang dilakukan terhadap parameter MEANPOT menghasilkan $p = 4,3\%$ sehingga distribusi sampel CME dan nonCME dapat dianggap berbeda dengan tingkat

keyakinan lebih dari 95%. Namun, tampak bahwa distribusi MEANPOT dari sampel nonCME memiliki ‘plato’.

Gambar 3-2 menampilkan plot probabilitas kejadian CME yang dihitung berdasarkan fungsi distribusi parameter magnet sampel daerah aktif. Mengacu pada Persamaan 2-3, probabilitas CME meningkat saat $f_p > f_n$. Probabilitas CME bernilai maksimum ketika distribusi dari sampel CME menyimpang jauh dari distribusi nonCME. Sebaliknya, bila distribusi yang dibangun dari kedua sampel memiliki profil yang serupa, probabilitas CME hanya berfluktuasi di sekitar nilai tengah 50%. Bila demikian, parameter magnet yang ditelaah kurang efektif untuk digunakan dalam prediksi kejadian CME.



Gambar 3-1: Fungsi distribusi probabilitas (PDF) dari empat parameter magnet yang menjadi fokus. Area kelabu adalah PDF dari kelas positif (f_p), sedangkan garis merah merupakan PDF dari kelas negatif (f_n). Hasil uji Kolmogorov-Smirnov juga dituliskan pada setiap panel.



Gambar 3-2: Probabilitas CME sebagai fungsi parameter magnet. Pada setiap panel, garis tebal menunjukkan probabilitas yang dihitung jika $f_p \geq 0,5$.

Bila diperhatikan, probabilitas nonparametrik yang dihitung berdasarkan distribusi parameter MEANGBH memiliki nilai berfluktuasi di sekitar 50%. Hal ini selaras dengan uji KS yang menunjukkan bahwa distribusi parameter dari sampel CME dan nonCME tidak menyimpang jauh. Sekilas, probabilitas CME memiliki kecenderungan menurun dengan bertambahnya nilai MEANGBH. Namun, perlu menjadi catatan bahwa probabilitas di ujung kiri dan kanan memiliki signifikansi statistik yang rendah karena dihitung berdasarkan f_p yang kecil.

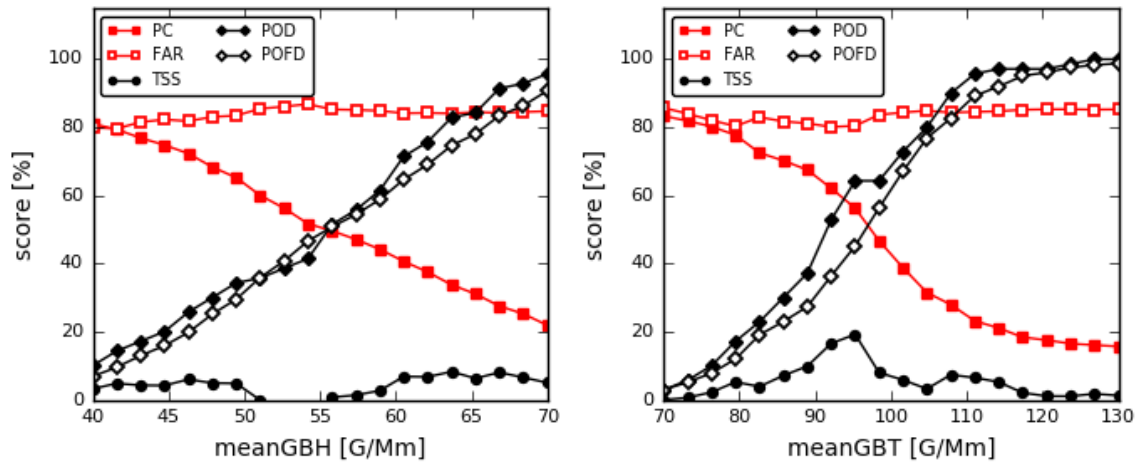
Tren menurun juga teramati lebih jelas pada plot probabilitas CME sebagai fungsi MEANGBT. Merupakan hal yang wajar bila keduanya menunjukkan kecenderungan yang serupa mengingat parameter MEANGBH berkorelasi baik dengan MEANGBT ($R^2 = 0,49$; lihat Gambar 2-1). Berdasarkan distribusi yang telah dikonstruksi, daerah aktif yang menghasilkan *flare* dan CME cenderung memiliki MEANGBT lebih rendah. Daerah aktif dengan MEANGBT < 100 Gauss/Mm memiliki probabilitas CME lebih dari 50%.

Tren positif/naik diharapkan teramati pada plot probabilitas CME sebagai fungsi MEANJZH karena distribusi MEANJZH daerah aktif positif CME sedikit menyimpang ke kanan bila dibandingkan distribusi dari sampel nonCME (Gambar 3-1). Namun, karena distribusi parameter nonCME lebih curam dengan dispersi lebih kecil, maka probabilitas CME tampak berfluktuasi. Bila hanya mempertimbangkan $f_p \geq 0,5$, daerah aktif dengan MEANJZH positif Gauss²/m cenderung menghasilkan *flare* yang disertai CME. Namun, pernyataan ini tidak terlalu kuat. Fluktuasi yang lebih jelas tampak pada plot probabilitas CME sebagai fungsi MEANPOT. Tanpa dikombinasikan dengan parameter lain, parameter magnet ini tidak dapat digunakan sebagai indikator terjadinya CME.

Di antara keempat parameter yang ditelaah dalam studi ini, MEANGBT merupakan parameter dengan tren probabilitas yang paling jelas. Probabilitas CME menurun dengan bertambahnya nilai rerata gradien medan magnet total. Parameter MEANGBT tergolong parameter intensif karena merupakan nilai rerata yang tidak bergantung pada ukuran daerah aktif yang dibicarakan (Welsch *et al.*, 2009). Menurut Bobra dan Ilonidis (2016), parameter dengan peringkat tertinggi sebagai indikator CME tergolong parameter intensif. Namun, parameter intensif justru tidak signifikan dalam prediksi *flare* kuat (Bobra dan Couvidat, 2015).

Kedua parameter (MEANGBH dan MEANGBT) diperiksa lebih lanjut melalui simulasi untuk mengetahui potensi penggunaan parameter magnet tersebut untuk prediksi CME, dikuantisasi dengan skor yang telah disebutkan sebelumnya (Persamaan 2-1 hingga 2-5). Kelima skor tersebut dihitung untuk setiap nilai ambang yang digunakan. Nilai ambang MEANGBH berkisar antara 40 hingga 70 Gauss/Mm, sedangkan nilai ambang MEANGBT berkisar antara 70-130 Gauss/Mm.

Plot skor sebagai fungsi nilai ambang disajikan pada Gambar 3-3. Dari plot tersebut, terdapat pola yang sama untuk kedua parameter medan magnet. Pertama, nilai *PC* menurun dari 80% menjadi sekitar 20% seiring dengan membesarnya nilai ambang yang digunakan. Hal ini terjadi karena jumlah prediksi *true positive* (a) dan *true negative* (d) menurun. Di sisi lain, *FAR* yang merepresentasikan prediksi *false positive* cenderung konstan di sekitar 80%. Pola kedua adalah peningkatan *POD* dan *POFD* hingga hampir 100%. *POD* atau juga disebut *hit rate* menyatakan rasio prediksi tepat dan bernilai maksimum pada bagian kanan distribusi. Skor ini hanya berfokus pada kejadian CME positif. Sebaliknya, *POFD* berfokus pada CME negatif.



Gambar 3-3: Skor prediksi CME berdasarkan berbagai nilai ambang MEANGBH yang berkisar antara 40-70 Gauss/Mm dan nilai ambang MEANGBT yang berkisar antara 70-130 Gauss/Mm.

Skor terbaik yang dianggap mewakili kinerja metode prediksi adalah *TSS* yang merupakan kombinasi dari *POD* dan *POFD*. Semakin tinggi nilai *TSS* berarti semakin baik metode tersebut karena jumlah prediksi yang tinggi tidak banyak terkotori oleh jumlah prediksi yang tidak tepat. Untuk parameter MEANGBH, *TSS* bernilai < 10% dan bahkan bernilai netgatif untuk nilai ambang sekitar 53 Gauss/Mm. Dengan demikian, penggunaan parameter tunggal MEANGBH tidak cukup meyakinkan untuk prediksi CME.

Untuk parameter MEANGBT, *TSS* mencapai nilai maksimum ~20% ketika nilai ambang yang digunakan adalah 96 Gauss/Mm sehingga nilai ambang ini dapat digunakan sebagai prediktor CME. Bila suatu daerah aktif memiliki MEANGBT ≤ 96 Gauss/Mm, maka terdapat kemungkinan akan muncul CME dari daerah tersebut.

True Skill Score sebesar 20% bukan merupakan nilai yang memuaskan, tetapi dapat dianggap baik dan dapat disandingkan secara proporsional dengan pekerjaan lain. Bobra dan Ilonidis (2015) mendapatkan nilai *TSS* < 10% ketika metode machine learning diterapkan hanya pada 1 parameter magnet. Nilai *TSS* ~20% baru dicapai saat empat parameter magnet dipakai secara simultan untuk prediksi CME,

sedangkan nilai maksimum *TSS* sebesar ~80% dicapai ketika menggunakan lebih dari 10 parameter medan magnet sebagai input. Proses ini tentunya menuntut kerja komputasi luar biasa.

Identifikasi serta prediksi CME bergantung pada pengamatan lapisan korona dengan kerapatan dan temperatur tertentu. Penggunaan parameter SHARP atau magnetogram yang memotret medan magnet fotosfer merupakan langkah ekstrapolasi untuk menilai ketidakstabilan magnet yang dapat memicu CME. Tentu ada kesenjangan non-linier antara parameter di fotosfer dan kondisi di korona sehingga penggunaan parameter tunggal dalam prediksi hanya mampu mencapai skor tertinggi sebesar 20%. Selain itu, parameter langsung seperti MEANGBT dan MEANGBH lebih baik digunakan untuk prediksi *flare* dibandingkan parameter tidak langsung seperti MEANJZH dan MEANPOT. Komponen gerak dan medan magnet radial dapat berperan lebih baik dibandingkan komponen horizontal.

4 KESIMPULAN

Pada studi ini, empat parameter medan magnet daerah aktif dianalisis secara statistik untuk mengetahui potensi penggunaan parameter tersebut untuk prediksi CME. Berdasarkan sampel yang terdiri 410 kasus *flare* ≥

M1.0 yang tidak disertai CME dan 70 kasus *flare* \geq M1.0 yang disertai CME, disimpulkan bahwa parameter MEANGBT yang menyatakan rerata gradien medan magnet total berpotensi untuk digunakan dalam prediksi CME.

Daerah aktif dengan MEANGBT \leq 96 Gauss/Mm berpotensi menghasilkan *flare* yang disertai CME. Berdasarkan sampel kasus yang sama, *True Skill Score* dari metode prediksi ini adalah \sim 20%. Meski masih tergolong rendah, skor yang didapatkan dapat disandingkan secara proporsional dengan hasil dari peneliti lain.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada penelaah yang telah memberikan masukan konstruktif terhadap penulisan makalah ini. Penelitian ini didanai dengan DIPA Pusat Sains Antariksa tahun 2016.

DAFTAR RUJUKAN

- Balaguer-Núñez, L., D. Galadí-Enriquez dan C. Jordi, 2007. *wavy - H β CCD Photometry and Membership Segregation of the Open Cluster NGC 2682 (M 67)*. *Astronomy and Astrophysics*, 470, 585.
- Bewsher, D., R.A. Harrison, dan D.S. Brown, 2008. *The Relationship between EUV Dimming and Coronal Mass Ejections. I. Statistical Study and Probability Model*. *Astronomy and Astrophysics*, 478, 897.
- Bobra, M.G., dan S. Couvidat, 2015. *Solar Flare Prediction Using SDO/HMI Vector Magnetic Field Data with a Machine-learning Algorithm*. *The Astrophysical Journal*, 798, 135.
- Bobra, M.G., dan S. Itonidis, 2016. *Predicting Coronal Mass Ejections Using Machine Learning Methods*. *The Astrophysical Journal*, 821, 127.
- Bobra, M.G., X. Sun, J.T. Hoeksema, M. Turmon, Y. Liu, K. Hayashi, G. Barnes, dan K.D. Leka, 2014. *The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Vector Magnetic Field Pipeline: SHARPs - Space-Weather HMI Active Region Patches*. *Solar Physics*, 289, 3549.
- Chen, F.P., 2011. *Coronal Mass Ejection: Models and Their Observational Basis*. *Living Review in Solar Physics*, 8, 1.
- Crown, M.D., 2012. *Validation of the NOAA Space Weather Prediction Center's solar Flare Forecasting Look-Up Table and Forecaster-Issued Probabilities*. *Space Weather*, 10, S06006.
- Devos, A., C. Verbeeck, dan E. Robbrecht, 2014. *Verification of Space Weather forecasting at the Regional Warning Center in Belgium*. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 4, 29.
- Gopalswamy, N.Y., 2008. *Coronal Mass Ejections, Type II Radio Bursts, and Solar Energetic Particle Events in the SOHO Era*. *Annales Geophysicae*, 26, 3033-3047.
- Kraaikamp, E., dan C. Verbeeck, 2015. *Solar Demon - an Approach to Detecting Flares, Dimmings, and EUV Waves On SDO/AIA Images*. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 5, 18.
- Priyatikanto, R., dan M.I. Arifyanto, 2015. *The Implementation of Binned Kernel Density Estimation to Determine Open Clusters' Proper Motions: Validation of the Method*. *Astrophysics and Space Science*, 355, 161.
- Qahwaji, R., T. Colak, M. Al-Omari, dan S. Ipson, 2008. *Automated Prediction of CMEs Using Machine Learning of CME - Flare Associations*. *Solar Physics*, 248, 471.
- Sheather, S.J., 2004. *Density Estimation*. *Statistical Science*, 19, 588.
- Silverman, B.W., 1986. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. London: Chapman and Hall.
- Welsch, B.T., Y. Li, P.W. Schuck, dan G.H. Fisher, 2009. *What is the Relationship Between Photospheric Flow Fields and Solar Flares? The Astrophysical Journal*, 705, 821.