

EFEK CME HALO PENUH PADA IONOSFER LINTANG RENDAH DARI DATA GPS BAKO DI CIBINONG [EFFECT OF FULL HALO CME ON LOW LATITUDE IONOSPHERE FROM BAKO GPS DATA IN CIBINONG]

Fakhrizal Muttaqien¹, Buldan Muslim²

¹Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Djati,
Bandung

²Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
Jl. Dr. Djundjuna 133 Bandung 40173 Indonesia
e-mail: fakhrizalm99@gmail.com

Diterima 28 Juli 2017; Direvisi 22 Januari 2018; Disetujui 22 Januari 2018

ABSTRACT

A full halo coronal mass ejections (CMEs) are most energetic solar events that eject huge amount of mass and magnetic fields into heliosphere with 360° angular angle. The full halo CME effect on the ionosphere can be determined from the ionospheric total electron content (TEC) derived from GPS data. GPS data from BAKO station in Cibinong, satellite orbital data (brcd files) and instrumental bias data (DCB files) have been used to obtain TEC using GOPI software. Analysis of the full halo CME data, Dst index, and TEC during October 2003 and February 2014 showed that the full halo CME could cause ionospheric disturbances called ionospheric storms. Magnitude and time delay of the ionospheric storms depended on the full halo CME speed. For the high-speed full halo CME, the negative ionospheric storm generally occurred during recovery phase of the geomagnetic storm. When the initial phase of geomagnetic disturbance with increasing Dst index more than +30 nT, the ionospheric storm occurred during main phase of geomagnetic disturbance although the main phase of geomagnetic disturbance did not reach geomagnetic storm condition.

Keywords: *Full Halo CME, geomagnetic storm, recovery phase, negative ionospheric storm*

ABSTRAK

Coronal mass ejection (CME) halo penuh merupakan peristiwa matahari berenergi tinggi, yang menyemburkan massa dan medan magnet ke heliosfer dengan sudut angular sebesar 360° . Efek CME halo penuh pada ionosfer dapat diketahui dari *Total Electron Content* (TEC). Data GPS BAKO di Cibinong, data orbit satelit (file *brcd*) dan data bias instrumental (file *DCB*) dapat digunakan untuk penentuan TEC menggunakan *software* GOPI. Analisis data CME halo penuh, indeks Dst, dan TEC selama bulan Oktober 2003 dan Februari 2014 menunjukkan bahwa CME halo penuh dapat menimbulkan gangguan ionosfer yang disebut badai ionosfer. Besar dan selang waktu badai ionosfer setelah terjadinya CME, tergantung pada kelajuan CME halo penuh. Untuk CME halo penuh berkelajuan tinggi, badai ionosfer negatif umumnya terjadi pada fase pemulihan badai geomagnet. Jika fase awal gangguan geomagnet diawali dengan peningkatan indeks Dst melebihi $+30$ nT, maka badai ionosfer dapat terjadi pada fase utama gangguan geomagnet walau gangguan geomagnet setelah fase awal tidak mencapai kondisi badai geomagnet.

Kata kunci: CME halo penuh, badai geomagnet, fase pemulihan, badai ionosfer negatif

1 PENDAHULUAN

Matahari adalah bintang yang terdekat dari Bumi yang memancarkan energi sendiri, yaitu berupa cahaya dan panas. Energi Matahari berasal dari reaksi nuklir yang terjadi di intinya (Martiningrum *et al.*, 2012). Energi hasil reaksi inti tersebut, terhantar hingga ke permukaan Matahari. Aktivitas tersebut menjadikan Matahari sebagai bintang aktif penggerak cuaca antariksa.

Sebagai penggerak cuaca antariksa, maka aktivitas maupun perubahan yang terjadi di Matahari akan berdampak juga pada kondisi yang ada di antariksa (Yatin, 2012). Di antara aktivitas Matahari yang menyebabkan gangguan lingkungan di Bumi yaitu, *flare* dan *coronal mass ejection* (CME). *Flare* maupun CME yang terjadi di permukaan Matahari merupakan peristiwa impulsif yang melepaskan radiasi gelombang elektromagnetik dalam *flare* dan partikel dalam peristiwa CME.

CME dapat didefinisikan sebagai material inti pada korona yang terlontar dari matahari, yang berbeda dengan angin surya. Dari gambar koronagrafi, CME bisa dikenali sebagai letupan terang yang bergerak menjauhi matahari (Gopalswamy, 2010). Fenomena CME teramati seperti letupan yang menyembur dari Matahari. Saat terjadi CME, sebagian

massa korona Matahari terlontar ke angkasa. Energi yang dilepaskan pada peristiwa ini sangat besar karena mengandung massa yang besar dan kecepatan yang tinggi. CME dapat sampai ke Bumi dalam waktu 1-5 hari (rata-rata 2-3 hari) (Martiningrum *et al.*, 2012). Sudut angular dalam pelontaran partikel oleh CME bervariasi, di antaranya CME halo penuh yang memiliki sudut angular sebesar 360° . Karena memiliki sudut angular sebesar 360° , maka partikel yang dilontarkan akan menyebar dari permukaan Matahari ke segala arah dipandang dari sensor pengamatan matahari SOHO. Adapun Gopalswamy (2010) telah mengelompokkan CME halo menjadi CME halo penuh dengan lebar yang terlihat (*apparent width*, *W*) sebesar 360° dan CME halo sebagian dengan *W* mulai 120 sampai kurang dari 360° .

Partikel yang terlempar dalam peristiwa CME halo penuh ini mempunyai kemungkinan besar sampai di Bumi dan menyebabkan perubahan pada sebagian lingkungan di Bumi. Dampak yang dihasilkan oleh CME ini antara lain adalah penurunan intensitas sinar kosmik (Lara *et al.*, 2005), dan munculnya badai geomagnet (Yatini *et al.*, 2009).

Badai geomagnet yang disebabkan oleh CME tersebut berasal dari partikel-partikel bermuatan, berenergi tinggi, dan

berkecepatan tinggi yang sampai di magnetosfer bumi dan atmosfer bumi bagian atas. Perubahan yang terjadi di magnetosfer bumi tersebut mempunyai kontribusi yang cukup besar pada struktur dan dinamika ionosfer (Yatini *et al.*, 2009).

Lapisan Ionosfer adalah bagian dari lapisan atas atmosfer yang berisi sejumlah elektron - elektron dan ion-ion bebas yang dapat mempengaruhi perambatan gelombang radio. Ionosfer dapat memantulkan sinyal radio pada pita HF (*High Frequency*) dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi plasma ionosfer.

Untuk gelombang radio band L, ionosfer dapat memperlambat kecepatan grup gelombang radio sehingga menyebabkan kesalahan ionosfer pada pengukuran posisi berbasis satelit GPS (DasGupta *et al.*, 2007). Kesalahan posisi GPS tergantung pada nilai TEC. Menggunakan model ionosfer, kesalahan ionosfer dalam kondisi tenang dapat direduksi secara signifikan. Namun, pada kondisi terganggu koreksi ionosfer dengan model ionosfer bisa tidak signifikan meningkatkan akurasi posisi GPS. Gangguan Ionosfer dapat dilihat dari tingkat penyimpangan *total electron content* (TEC) dari TEC pada kondisi tenang yang bisa diwakili oleh nilai median bulanan TEC pada jam tertentu. Gangguan ionosfer terutama disebabkan oleh adanya badai matahari baik *flare* maupun CME.

Kumar dan Singh (2002) dalam makalahnya telah menyajikan efek dari *flare* sinar x Matahari terhadap TEC ionosfer selama siklus minimum Matahari selama tahun 2008. Mereka menggunakan nilai TEC yang diturunkan dari data GPS sehingga diperoleh kesimpulan bahwa peningkatan TEC setelah *flare* sinar X kelas C dan B selama siklus minimum tahun 2008 bukan merupakan efek *flare* itu sendiri tetapi juga ada kontribusi dari peningkatan radiasi Extreme Ultra Violet (EUV) selama *flare*, dan perubahan elektrodinamika di ionosfer setelah *flare*.

Adapun badai matahari berupa CME mempengaruhi ionosfer secara tidak langsung karena partikel-partikel berenergi tinggi dari matahari harus melewati medan magnet bumi sehingga dibelokkan arahnya ke arah kutub magnet bumi. Adanya arus partikel-partikel bermuatan tersebut dapat menimbulkan arus yang besarnya tergantung pada kecepatan dan kerapatan partikel matahari yang bersumber dari CME. Orientasi medan magnet antar planet juga menentukan sejauh mana penetrasi partikel CME ke magnetosfer bumi yang menentukan pengaruhnya pada ionosfer. Dengan proses efek CME pada ionosfer yang kompleks maka efek CME pada ionosfer sulit diprediksi baik waktu maupun gangguan ionosfer yang terjadi. Oleh karena itu, penelitian efek CME matahari masih intensif dilakukan untuk meningkatkan akurasi prediksi gangguan ionosfer untuk peringatan dini gangguan komunikasi radio dan penentuan posisi GPS yang propagasinya dipengaruhi oleh kondisi ionosfer.

Muslim (2002) meneliti respon ionosfer terhadap CME Juli 2000 menggunakan data foF2 dengan kesimpulan bahwa badai ionosfer terjadi dalam daerah yang luas dan terjadi sekitar 1,5 hari setelah CME 14 Juli 2000. Badai ionosfer di lintang rendah umumnya relatif lebih kecil dibanding badai ionosfer di lintang tengah dan tinggi.

Mendillo (2006) menjelaskan karakteristik umum badai ionosfer adalah sebagai berikut:

- a. Badai ionosfer positif pada siang hari dapat disebabkan oleh efek medan listrik fajar-senja yang digerakkan oleh konveksi magnetosfer,
- b. Badai ionosfer positif siang hari juga bisa disebabkan oleh dorongan angin netral yang menimbulkan peningkatan medan listrik arah ke timur pada siang hari,
- c. Badai ionosfer positif pada malam hari bisa disebabkan oleh peningkatan *drift*

plasma ke arah kutub yang diinduksi oleh presipitasi aurora.

- d. Adapun badai ionosfer negatif siang hari dapat disebabkan oleh konveksi partikel setelah matahari terbit dan deplesi komposisi partikel berumur panjang,
- e. Badai ionosfer negatif malam hari bisa juga disebabkan oleh peningkatan medan listrik arah barat pada malam hari setelah efek (1) berakhir pada malam hari.

CME pada saat medan magnet antar planet arahnya ke selatan, dapat menimbulkan badai magnetik melalui proses rekoneksi magnetik sehingga dapat mempengaruhi ionosfer ekuator dan lintang tengah pada siang hari dan tengah malam. Konveksi angin matahari dari medan magnet arah selatan melewati magnetosfer merepresentasikan medan listrik interplanet fajar-senja. Jika sebagian dari medan listrik tersebut memasuki sistem magnetosfer/ionosfer (melalui proses rekoneksi magnetik atau proses lainnya), medan listrik akan mengangkat ionosfer ekuator pada siang hari dan menekannya pada malam hari. Di daerah ekuator pada siang hari, ionosfer diangkat ke tempat yang lebih tinggi di mana rentang waktu rekombinasi lebih panjang. Ionisasi ionosfer menambah partikel-partikel ionosfer baru di daerah lintang rendah sehingga meningkatkan TEC ionosfer. Ini disebut badai ionosfer positif. Pengendalian medan magnet antar planet pada ionosfer pada siang hari disebut *day sode superfountain ionosphere* (DIS). Pada malam hari, medan listrik $E \times B$ menekan ionosfer untuk menurunkan ketinggian di mana rekombinasi kimia terjadi, mengurangi TEC ionosfer. Ini disebut badai ionosfer negatif (Tsurutani, 2009).

Farid *et al.*, (2015) mendapatkan korelasi nilai maksimum bulanan foF2 dengan rata-rata bulanan energi massa dan kelajuan CME sebesar 74%, 52% dan 65% masing-masing. Hal itu menunjukkan bahwa CME yang berenergi tinggi, masif,

dan cepat dapat mempengaruhi frekuensi kritis foF2 dengan efektif.

Menggunakan data GPS di Brasil, Fagundes *et al.* (2016) mendapat hasil penelitian bahwa di daerah *equatorial ionization anomaly* (EIA) di atas Brasil terjadi badai ionosfer positif pada fase utama badai geomagnet yang disebabkan oleh CME 15 Maret 2015 yang diikuti badai ionosfer negatif pada fase pemulihan badai geomagnet. Badai ionosfer sebagai akibat tak langsung CME menunjukkan adanya variasi longitudinal di atas Brasil.

Dari penelitian tersebut diketahui bahwa badai ionosfer negatif dari data TEC yang terjadi pada fase pemulihan badai geomagnet dapat digunakan sebagai masukan prakirawan dalam memprediksi *MUF depression* yaitu penurunan *Maximum Usable Frequency* (MUF) dari kondisi normal, yang disebabkan oleh CME yang menyebabkan badai geomagnet yaitu sekitar 2-3 hari setelah CME, dengan asumsi bahwa badai ionosfer dalam ukuran persen dari data TEC sebanding dengan badai ionosfer dari data foF2.

Pada penelitian ini digunakan data TEC GPS yang diturunkan dari data GPS BAKO yang terletak di daerah lintang rendah bagian selatan di Indonesia dengan tujuan untuk mengetahui efek CME halo penuh pada ionosfer di daerah lintang rendah Indonesia dan membandingkannya dengan hasil penelitian sebelumnya di lintang rendah Brasil. Jika diasumsikan bahwa *MUF depression* sebanding dengan badai ionosfer negatif pada data TEC, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam prediksi *MUF depression* yang disebabkan oleh CME halo penuh.

2 DATA DAN METODOLOGI

2.1 Data CME Halo

Untuk mengetahui efek CME halo penuh terhadap TEC Ionosfer dilakukan analisis perubahan TEC selama Oktober 2003 dan Februari 2014 yang digunakan untuk mewakili tingkat aktivitas matahari tinggi siklus 23 dan 24. Pemilihan data CME bulan Oktober 2003 dan Februari

2014 karena pada bulan-bulan tersebut sering terjadi CME halo penuh. Pada bulan Oktober 2003 telah terjadi CME halo penuh sebanyak empat kali dan pada Februari 2014 telah terjadi CME halo penuh sebanyak 13 kali.

Data CME diperoleh dari SOHO LASCO CME Catalog di https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/. SOHO dan LASCO merupakan instrumen yang dimiliki NASA untuk mengamati CME. SOHO dan LASCO menyediakan data dan juga citra dari CME. Selama Oktober 2003 dan bulan Februari 2014 terjadi beberapa peristiwa CME halo penuh dengan kelajuan yang bervariasi. Seperti yang ditampilkan pada Tabel 2-1 dan Tabel 2-2.

Tabel 2-1: CME HALO PENUH OKTOBER 2003 (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2003_10/univ2003_10.html, Akses 5 Juli 2017)

No	Tanggal	Waktu (UT)	Laju (km/s)
1	18/10/2003	15:30:21	627
2	21/10/2003	3:54:05	1484
3	28/10/2003	11:30:05	2459
4	29/10/2003	20:54:05	2029

Tabel 2-2: CME halo penuh Februari 2014 (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2014_02/univ2014_02.html, Akses 5 Juli 2017)

No	Tanggal	Waktu (UT)	Laju (km/s)
1	2/2/2014	16:00:06	908
2	10/2/2014	21:36:06	557
3	12/2/2014	6:00:05	373
4	12/2/2014	16:36:05	533
5	12/2/2014	23:06:13	872
6	14/2/2014	8:48:26	1165
7	16/2/2014	10:00:05	634
8	18/2/2014	1:36:21	779
9	19/2/2014	4:48:05	612
10	20/2/2014	3:12:09	993

11	20/2/2014	8:00:07	948
12	21/2/2014	16:00:05	1252
13	25/2/2014	1:25:50	2147

2.2 Data TEC GPS

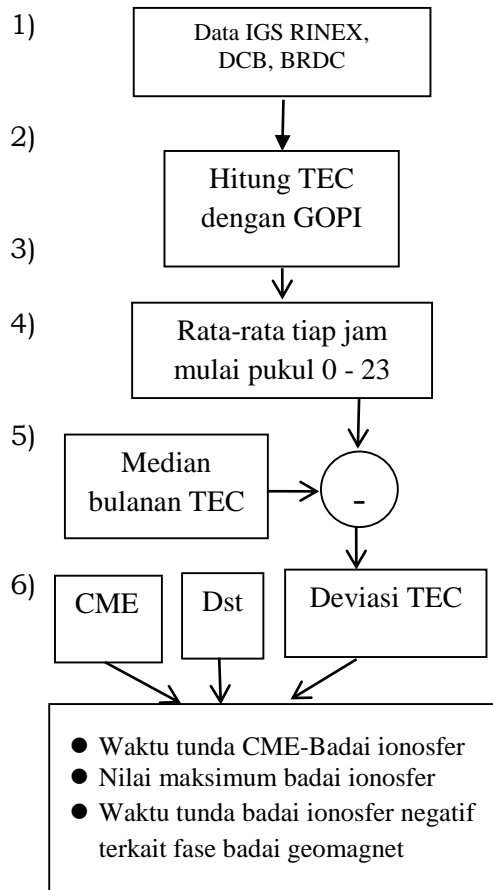
Data TEC Ionosfer dapat diturunkan dari data GPS yang terdiri dari data pengamatan jarak satelit (*pseudorange code*) dan jumlah siklus fase gelombang pembawa sinyal GPS (*carrier phase*). Data GPS stasiun BAKO di Cibinong dapat diunduh dari <http://sopac.ucsd.edu/>. Selain itu, data *Differential Code Bias* (DCB) yaitu bias instrumental satelit dan receiver GPS, dan data orbit satelit juga diperlukan untuk kalibrasi nilai TEC yang diturunkan dari data GPS. Nilai *Differential Code Bias* (DCB) dapat diunduh dari <ftp://ftp.aiub.unibe.ch>,

2.3 Metodologi

Metodologi penelitian ini dijelaskan dengan Gambar 2-1. Data GPS yang diperlukan terdiri dari data pengamatan GPS format rinex, data orbit dari file *brdc*, data bias satelit dan *receiver* yang terdapat dalam file DCB (langkah 1). Menggunakan *software* GOPI, data GPS tersebut diolah untuk mendapatkan data turunan berupa TEC, *Ionospheric Pierce Point* (IPP) dll. (langkah 2). Data TEC keluaran GOPI dengan sudut elevasi minimum 20° yang terdapat pada data dengan *file* berekstensi *std*, dirata-ratakan setiap jam mulai pukul 0:00 - 23:00 UT (langkah 3). Data median bulanan TEC dihitung dari data rata-rata jaman TEC (langkah 4). Pengurangan data TEC rata-rata jaman dengan data TEC median bulannya menghasilkan deviasi TEC yang merupakan indikator gangguan ionosfer (langkah 5). Data deviasi TEC, data CME, dan indeks Dst dianalisis untuk mendapatkan waktu tunda gangguan ionosfer, besar gangguan yaitu nilai mutlak deviasi TEC maksimum dan waktu badai ionosfer negatif terkait fase badai geomagnet (langkah 6).

Waktu tunda gangguan ionosfer dihitung dari awal terjadinya CME dan

awal terjadinya gangguan ionosfer, bukan saat gangguan mencapai maksimum atau minimum. Besar gangguan ionosfer, dihitung dari deviasi TEC terbesar yang nilainya bisa positif atau negatif.



Gambar 2-1: Penentuan badai ionosfer akibat CME halo penuh

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

CME halo penuh yang terjadi pada siklus ke-23 selama Oktober 2003 dan siklus ke-24 selama Februari 2014 memiliki kelajuan yang bervariasi. Dengan demikian, dampaknya pada ionosfer juga bervariasi dalam orde beberapa hari. Maka untuk mengetahui dampak dari CME tersebut terhadap ionosfer, diplot grafik dalam rentang waktu 10 hari.

3.1 Efek CME halo penuh pada bulan Oktober 2003.

Pada 11-20 Oktober 2003, tercatat ada satu CME halo penuh yang terjadi, tetapi dengan kelajuan yang rendah. CME halo penuh tersebut terjadi pada 18

Oktober 2003, pukul 15:30:21 UT dengan kelajuan 627 km/s (Gambar 3-1 bagian atas). CME tersebut tidak menunjukkan gangguan pada nilai TEC setelah terjadi CME. Perubahan nilai TEC yang cukup ekstrem, terjadi pada tanggal 15 Oktober 2003, sebelum terjadinya CME tersebut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-1 bagian bawah.

Dari indeks Dst pada 14-15 Oktober 2003 menunjukkan adanya badai geomagnet seperti diperlihatkan oleh Gambar 3-1 tengah. Badai geomagnet tersebut menimbulkan badai ionosfer positif pada tanggal 15 Oktober 2003 dengan peningkatan TEC mencapai 34,58 TECU pada pukul 01:00 UT sebagaimana dilihat pada Gambar 3-1 (bawah). Badai geomagnet tersebut bisa disebabkan oleh beberapa CME yaitu pada 10, 11 dan 13 Oktober 2003 walaupun bukan CME halo penuh sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 3-1.

Dari Tabel 3-1 diketahui bahwa ada enam CME yang efektif mempengaruhi lingkungan bumi yaitu yang memiliki sudut posisi 283°, 233°, 283°, 262°, 305°, dan 287° yang semuanya termasuk CME yang arahnya ke Barat. Dengan terjadinya enam CME mulai 10 Oktober sampai 13 Oktober 2003 tersebut dengan laju yang bervariasi dapat menimbulkan badai geomagnet pada 14-15 Oktober 2003 yang diikuti badai ionosfer positif pada 15 Oktober 2003.

Tabel 3-1: KARAKTERISTIK CME PADA 10 - 13 OKTOBER 2003 (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2003_10/univ2003_10.html)

Tanggal	Waktu (UT)	PA (Derajat)	AW (Derajat)	Laju (km/s)
10/10/2003	04:54:05	284	83	698
10/10/2003	06:06:05	36	18	301
10/10/2003	11:30:05	233	62	602
10/10/2003	22:30:05	283	46	517
10/10/2003	23:06:05	190	35	273
10/11/2003	03:54:08	262	34	198
10/11/2003	09:06:19	305	38	518
10/11/2003	22:30:06	57	72	380
10/13/2003	03:54:05	65	49	362
10/13/2003	18:30:06	287	109	349

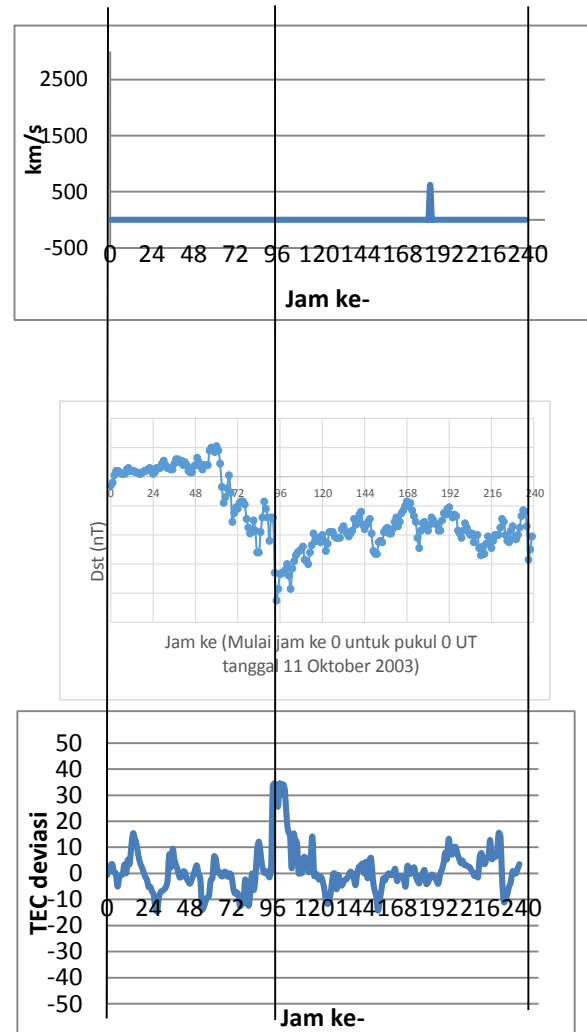
Tahun 2003 termasuk dalam fase menurun dari siklus aktivitas matahari 23. Menurut Chen *et al.* (2014) selama fase menurun dari siklus aktivitas matahari, kejadian di matahari berupa lubang corona juga dapat menimbulkan badai geomagnet yang lebih lama. Maka dari itu, badai geomagnet 14-15 juga dapat disebabkan oleh lubang korona karena terjadi dengan waktu yang relatif lebih lama sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 3-1, badai geomagnet terjadi selama empat hari sejak fase awal sampai fase pemulihan.

Pada 21-31 Oktober 2003 terjadi 3 CME halo penuh dengan kelajuan yang cukup tinggi. Dengan demikian, nilai TEC mengalami penyimpangan yang besar. CME halo penuh yang cukup besar terjadi pada 28 Oktober 2003, pukul 11:30:05 UT dengan laju 2459 km/s, seperti yang ditunjukkan Gambar 3-2 bagian bawah. Perubahan yang cukup ekstrem terjadi pada nilai TEC, yaitu pada tanggal 28 Oktober 2003 pukul 22:00 UT nilai TEC mulai menyimpang ke arah positif (naik), dan mencapai nilai kenaikan maksimum sebesar 43,875 TECU pada 29 Oktober 2003 pukul 09:00 UT. Kemudian TEC kembali turun pada pukul 22:00 UT hingga mengalami penurunan yang sangat signifikan. Penurunan maksimum mencapai -48,53 TECU pada pukul 08:00 UT (Gambar 3-2 bagian bawah).

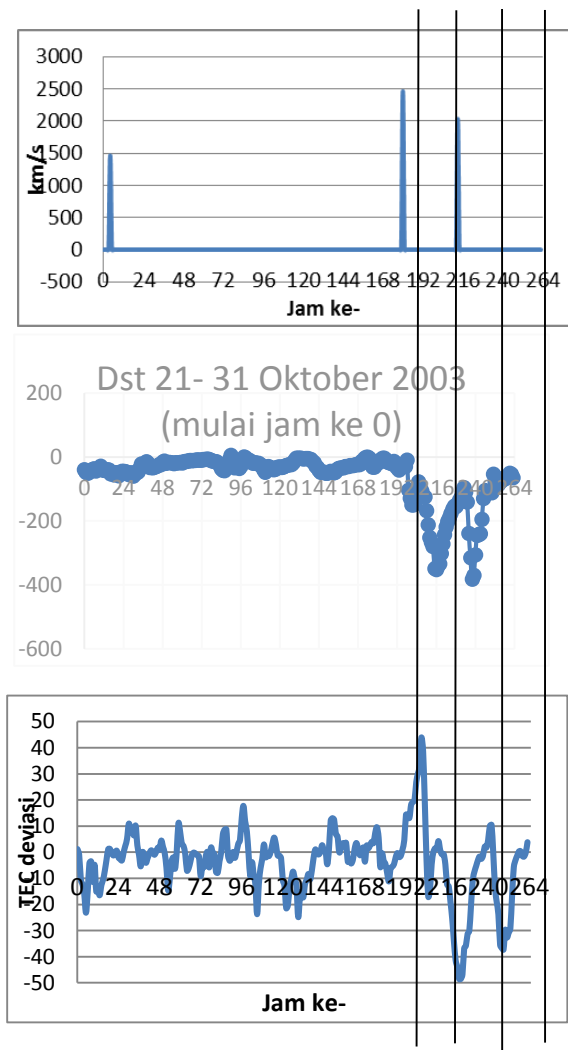
Karena laju CME halo penuh yang tinggi, maka waktu tunda yang dibutuhkan untuk mempengaruhi ionosfer sangat singkat. Dari terjadinya CME halo penuh tersebut, hanya membutuhkan waktu sekitar 11 jam untuk membuat TEC mengalami kenaikan secara signifikan, dan 31 jam untuk membuatnya turun lagi secara ekstrem.

CME halo penuh berikutnya terjadi pada keesokan harinya, yaitu tanggal 29 Oktober 2003 pada pukul 20:54:05 UT dengan laju 2029 km/s. CME tersebut menyebabkan gangguan yang cukup signifikan juga pada nilai TEC pada 31 Oktober 2003 pukul 02:00 UT dengan

nilai deviasi TEC sebesar 10,416 TECU, kemudian satu jam berikutnya TEC turun secara signifikan mencapai -0,464 TECU, hingga nilai penurunan maksimum mencapai -37,294 TECU pada pukul 09:00 UT. Waktu tunda yang dibutuhkan oleh CME tersebut hingga menimbulkan gangguan pada nilai TEC adalah 18 jam dan 27 jam hingga nilai TEC turun secara maksimum.



Gambar 3-1: Variasi nilai deviasi TEC (bawah), indeks Dst (tengah) dan CME halo penuh mulai tanggal 11 Oktober 2003 (mulai jam ke 0 pada pukul 0 UT) sampai 20 Oktober 2003 jam ke 263 pada pukul 23 UT (bagian atas)



Gambar 3-2: Variasi nilai deviasi TEC mulai (bawah), indeks Dst (tengah), dan CME mulai tanggal 21 Oktober 2003 (jam ke -0 pada pukul 0 UT) sampai 31 Oktober 2003 (jam ke-263 pada pukul 23 UT) (atas)

3.2 Efek CME halo Penuh Februari 2014 pada Ionosfer

Pada 2014 aktivitas Matahari cukup tinggi. Hal tersebut dapat terlihat dari cukup banyaknya CME yang terjadi. Begitu juga dengan peristiwa CME halo penuh yang terjadi pada Februari 2014, bahkan dalam sehari CME halo penuh bisa terjadi lebih dari satu kali. Tercatat ada 13 peristiwa CME halo penuh pada Februari 2014 dengan laju linier yang bervariasi.

CME halo penuh pada bulan Februari 2014 banyak terjadi di pertengahan bulan, yaitu antara 11-20 Februari. Tercatat ada sembilan peristiwa CME halo penuh yang terjadi, meskipun

lajunya kurang dari 1000 km/s. Hanya CME halo penuh yang terjadi pada tanggal 14 Februari 2014 saja yang lajunya mencapai 1165 km/s.

CME pada 9 dan 10 Februari 2014 tidak memberikan efek pada ionosfer pada waktu-waktu tersebut seperti diperlihatkan pada Gambar 3-3. Begitu juga beberapa hari setelahnya tidak ditemukan adanya gangguan ionosfer seperti dapat dilihat pada Gambar 3-4. Gambar 3-4 bagian atas menunjukkan terjadinya peristiwa CME halo penuh dengan laju yang bervariasi dan cenderung rendah. Hal tersebut menjadikan ionosfer tidak mengalami penurunan yang signifikan. Penurunan TEC yang signifikan hanya terjadi pada tanggal 16 Februari 2014, pukul 09:00 UT yang mencapai nilai penurunan maksimum sebesar -27,479 TECU. Penurunan nilai TEC tersebut disebabkan oleh CME halo penuh yang terjadi pada tanggal 14 Februari 2014 pukul 08:48:26 UT dengan laju 1165 km/s. Waktu tunda yang ditempuh oleh CME tersebut hingga menimbulkan gangguan pada nilai TEC adalah 48 jam atau dua hari.

Pada periode 21-28 Februari 2014, penurunan nilai TEC yang cukup signifikan terjadi pada 21 Februari 2014 dan 26 Februari 2014 (Gambar 3-5 bagian bawah). Pada 21 Februari 2014 penurunan TEC paling rendah mencapai -30.445 TECU pada pukul 09:00 UT. Penurunan nilai TEC tersebut merupakan gangguan yang disebabkan oleh dua CME halo penuh yang terjadi pada 20 Februari 2014 pukul 03:12:09 UT dan 08:00:07 UT (Gambar 3-5 bagian atas). Laju CME halo penuh tersebut masing-masing 993 km/s dan 948 km/s. Kedua CME tersebut mulai memberikan pengaruh terhadap nilai TEC berupa penurunan yang signifikan pada pukul 02:00 UT, yaitu hingga -15.33 TECU dan terus turun hingga mencapai nilai penurunan maksimum. Selang waktu yang dibutuhkan CME halo penuh hingga menimbulkan gangguan pada nilai TEC yaitu sekitar 23 jam dan untuk

mencapai nilai penurunan maksimum membutuhkan waktu sekitar 30 jam untuk CME yang pertama, dan untuk CME yang kedua selama 26 jam.

Pada 21 Februari 2014, CME halo penuh terjadi pada pukul 16:00:05 UT dengan laju 1252 km/s. CME tersebut mulai memberikan dampak berupa kenaikan nilai TEC pada 23 Februari 2014 pukul 07:00 UT sebesar 8.733 TECU, hingga mencapai kenaikan yang maksimum sebesar 21,63 TECU pada pukul 10:00 UT. Setelah itu, nilai deviasi TEC turun kembali secara signifikan hingga -7,566 TECU. Waktu tunda antara CME dengan gangguan ionosfer sekitar 40 jam.

Pada 25 Februari 2014 terjadi CME halo penuh yang cukup besar pada pukul 1:25:50 UT dengan kelajuan sebesar 2147 km/s (Gambar 3-5 bagian atas). CME tersebut berefek pada kenaikan TEC hingga mencapai 34,315 TECU pada 25 Oktober 2014 pukul 14:00. Kemudian nilai TEC turun kembali, hingga mencapai minimum pada 26 Februari 2014 pukul 08:00 UT. Penurunan tersebut mencapai nilai -21,048 TECU seperti dapat dilihat pada Gambar 3-5 bagian bawah. Selang waktu yang dibutuhkan oleh CME halo penuh tersebut untuk mulai memberikan gangguan terhadap TEC ionosfer hanya sekitar 13 jam.

Pengaruh CME pada ionosfer dari nilai deviasi TEC dapat dibedakan menjadi dua yaitu kenaikan TEC dengan deviasi TEC positif yang biasa disebut badai ionosfer positif dan penurunan TEC dengan deviasi TEC negatif yang disebut badai ionosfer negatif.

Untuk komunikasi HF, badai ionosfer positif dapat menguntungkan karena semakin lebar rentang frekuensi kerja HF di saat tersebut. Untuk badai ionosfer negatif yang terkait dengan *MUF depression* dapat dilihat dari Gambar 3-5. Ditunjukkan pada gambar tersebut bahwa puncak badai ionosfer negatif terjadi pada fase pemulihan badai geomagnet (bagian tengah Gambar 3-5).

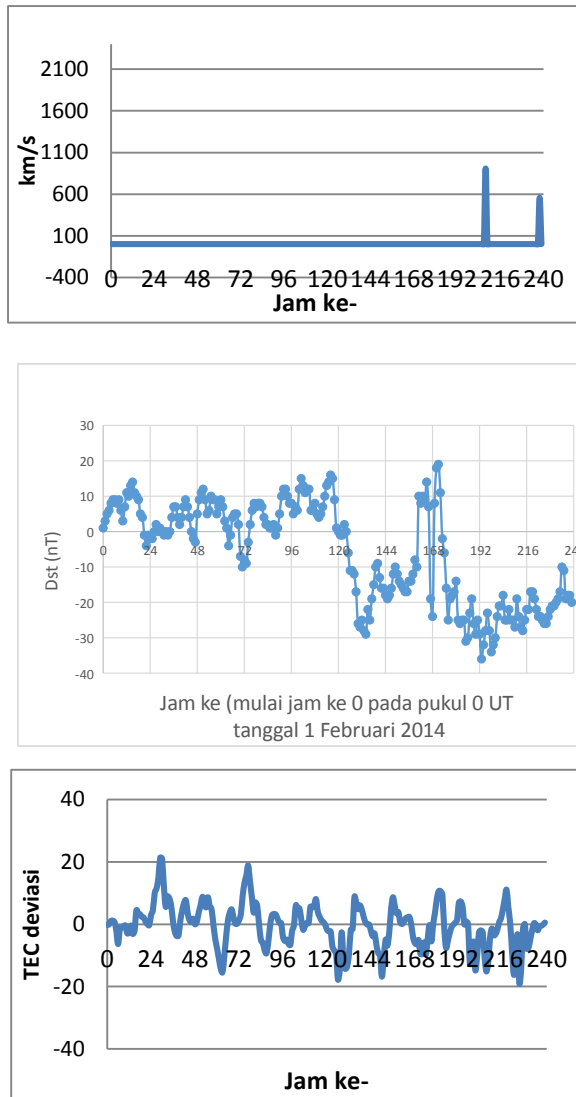
Pada badai geomagnet 29 maupun 30 Oktober mengalami fase pemulihan masing masing pada 30 dan 31 Oktober 2003. Pada fase pemulihan tersebut terjadi puncak badai ionosfer negatif terutama untuk kasus badai geomagnet besar yaitu pada 29 - 31 Oktober 2003. Terjadinya badai ionosfer negatif pada fase pemulihan badai geomagnet juga dialami pada kasus badai ionosfer pada 19 dan 20 Februari 2014. Hal ini mendukung penelitian sebelumnya oleh Fagundes *et al.* (2016) yang menyimpulkan terjadinya badai ionosfer negatif pada fase pemulihan badai geomagnet 17-18 Maret 2015. Terjadinya badai ionosfer negatif daerah lintang rendah pada fase pemulihan ini berbeda dengan badai ionosfer di lintang tengah yang pada dasarnya terjadi pada fase utama (QIU *et al.*, 2015).

Untuk badai geomagnet sedang, badai ionosfer negatif selama fase pemulihan tidak selalu konsisten. Badai ionosfer negatif juga terjadi setelah fase awal atau setelah badai geomagnet positif seperti pada kasus badai ionosfer negatif pada 16 Februari 2014. Pada kasus ini terjadi badai geomagnet positif mencapai lebih dari +47 nT. Badai geomagnet positif ini juga dikenal dengan fase awal badai geomagnet. Setelah fase awal badai geomagnet mencapai maksimum, beberapa jam kemudian terjadi badai ionosfer negatif, walaupun gangguan geomagnet tidak mencapai kondisi badai pada fase utama dengan nilai indeks Dst tidak turun melebihi -30 nT, yang merupakan nilai batas kondisi gangguan geomagnet termasuk dalam badai geomagnet lemah.

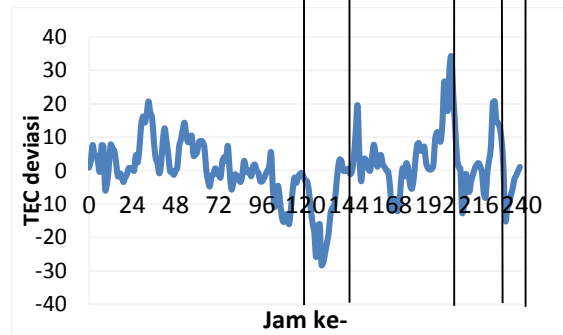
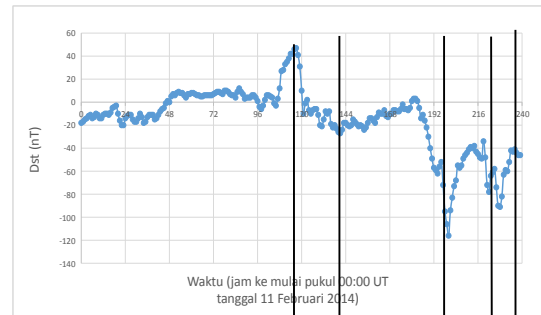
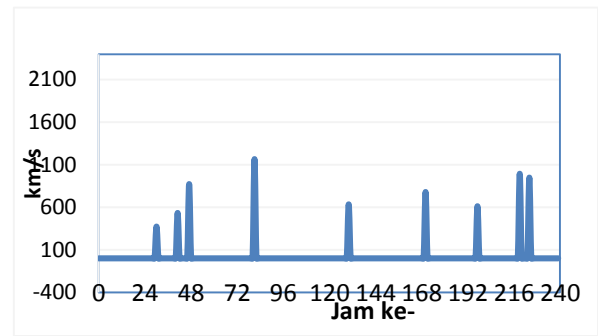
Gambar 3-6 bagian atas menunjukkan hubungan antara kelajuan CME halo penuh dengan waktu tunda yaitu selang waktu dari terjadinya hingga menimbulkan gangguan pada lapisan ionosfer. CME halo penuh pada bulan Oktober 2003 dan Februari 2014 diurutkan dari yang terkecil sampai yang terbesar. Grafik tersebut menunjukkan hubungan linier berkebalikan, artinya semakin besar kelajuan CME halo penuh

tersebut, waktu tunda yang dibutuhkan untuk menimbulkan gangguan pada TEC ionosfer semakin singkat.

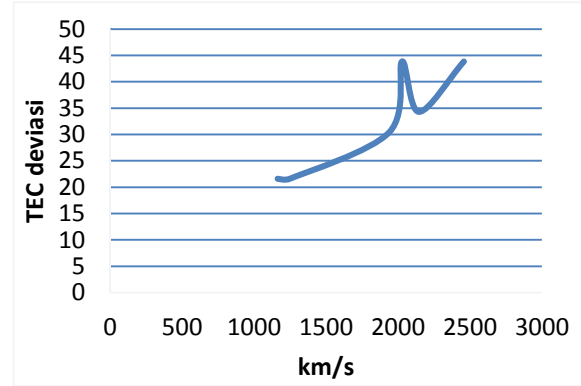
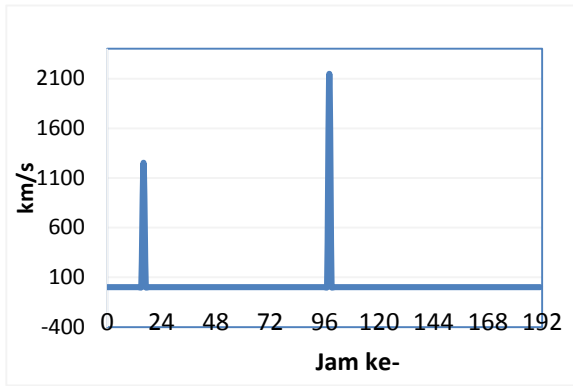
Gambar 3-6 bagian bawah menunjukkan hubungan antara kelajuan CME halo penuh dengan nilai simpangan maksimum TEC ionosfer. Dari grafik dapat terlihat bahwa semakin besar kelajuan CME Halo, nilai maksimum TEC ionosfer pun semakin meningkat.



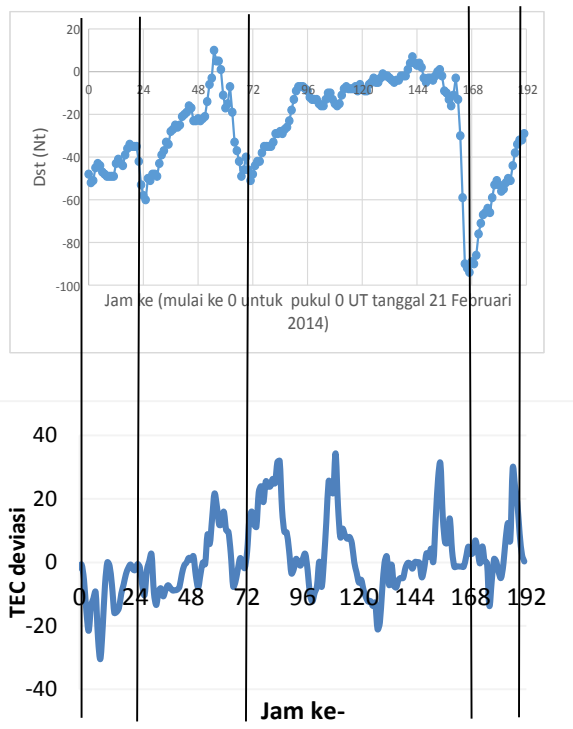
Gambar 3-3: Variasi nilai deviasi TEC (bawah), Dst (tengah), dan CME mulai 1 Februari 2014 (jam ke 0 pada pukul 0 UT) hingga 10 Februari 2014 (jam ke 239 pada pukul 23 UT)



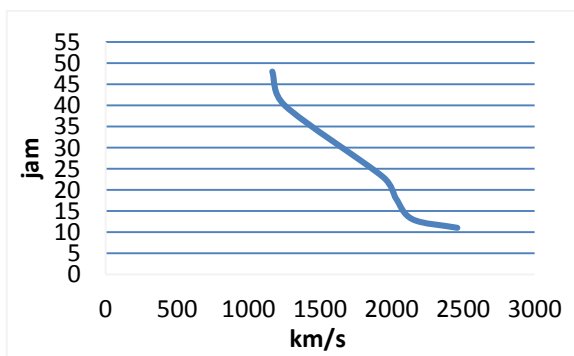
Gambar 3-4: Variasi nilai TEC deviasi mulai 11 Februari 2014 (jam ke 0) hingga 20 Februari 2014 (jam ke 240) (atas), CME Halo mulai 11 Februari 2014 (jam ke 0) hingga 20 Februari 2014 (jam ke 240) (bawah)



Gambar 3-6: Grafik hubungan kecepatan CME Halo terhadap selang waktu terjadinya gangguan pada TEC ionosfer (atas). Hubungan kecepatan CME Halo dengan nilai simpangan maksimum TEC ionosfer (bawah)



Gambar 3-5: Variasi nilai TEC deviasi mulai 21 Februari 2014 (jam ke 0) hingga 28 Februari 2014 (jam ke 240) (atas), CME Halo mulai 21 Februari 2014 (jam ke 0) hingga 28 Februari 2014 (jam ke 240) (bawah)



4 KESIMPULAN

Berdasarkan data CME halo penuh, TEC GPS dan indeks Dst pada Oktober 2003 dan Februari 2014 dapat disimpulkan bahwa CME halo penuh dengan kelajuan 2500 km/s, badai ionosfer mulai terjadi sekitar 11 jam setelah CME dengan puncak badai mencapai sekitar 45 TECU. Untuk CME halo penuh dengan kelajuan sekitar 1200 km/s, badai ionosfer mulai terjadi sekitar 48 jam setelah CME dengan besar badai ionosfer sekitar 20 TECU.

CME berkelajuan tinggi sekitar 2500 km/s, menyebabkan badai ionosfer negatif yang terjadi pada fase pemulihan. Tetapi untuk badai geomagnet yang sedang dan lemah, yang disebabkan CME halo penuh dengan kelajuan sekitar 1000 km/s, tidak selalu terjadi badai ionosfer negatif tetapi bisa kombinasi badai ionosfer positif dan negatif. Jika terjadi badai geomagnet positif (> + 30 nT) atau yang dikenal dengan fase awal badai geomagnet, maka badai ionosfer terjadi selama setelah fase awal badai geomagnet positif mencapai maksimum.

Penelitian ini selain mengkonfirmasi hasil penelitian sebelumnya oleh Fagundes *et al.* (2016) juga memberikan kontribusi tambahan bahwa badai ionosfer negatif dapat terjadi setelah badai geomagnet positif (fase awal badai geomagnet)

mencapai maksimum walau gangguan geomagnet setelahnya yaitu pada fase utama tidak sampai mencapai level badai geomagnet.

Dari penelitian ini dapat direkomendasikan bahwa jika terjadi CME halo penuh dengan laju sekitar 2500 km/s, maka dapat diprediksi akan terjadi badai ionosfer negatif beberapa hari sesudah kejadian CME. Dengan asumsi gangguan foF2 sebanding dengan gangguan pada TEC ionosfer, maka prediksi badai ionosfer negatif dari data TEC dapat digunakan sebagai bahan prediksi *MUF depression* selama fase pemulihan badai geomagnet. Penentuan waktu yang tepat kapan terjadinya *MUF depression* memerlukan informasi waktu puncak badai geomagnet.

DAFTAR RUJUKAN

- Chen, Y., W. Wang, A.G. Burns, S. Liu, J. Gong, X. Yue, G. Jiang, dan A. Coster, 2015. *Ionospheric Response to CIR-Induced Recurrent Geomagnetic Activity During the Declining Phase of Solar Cycle 23*, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 120(2), 1394-1418.
- DasGupta, A., A. Paul, dan A. Das, 2007. *Ionospheric Total Electron Content (TEC) studies with GPS in Equatorial Region*, Indian Journal of Radio & Space Physics, 35(4), 278-292.
- Fagundes, P. R., F. A. Cardoso, B. G. Fejer, K. Venkatesh, B. A. G. Ribeiro, and V. G. Pillat, 2016. *Positive and Negative GPS-TEC Ionospheric Storm Effects During the Extreme Space Weather Event of March 2015 over the Brazilian sector*, J. Geophys. Res., 108(A4), 8019, doi:10.1029/2002JA009701.
- Farid, H. M., R. Mawad, M. Yousef and S. Yousef, 2015. *The Impacts of CMEs on the Ionospheric Critical Frequency foF2*, Elixir Space Sci. 80, 31067-31070.
- Gopalswamy, N., 2010. *Coronal Mass Ejection: a Summary of Recent Results*, Proceedings of the 20th Slovank National Solar Physics Workshop, 108-130.
- Kumar, S., & A., Singh, 2012. *Effect of Solar Flares on Ionospheric TEC at Varanasi, Near EIA Crest, during Solar Minimum Period*, Indian Journal of Radio & Space Physics, 41, 141-147.
- Lara, A., N., Gopalswamy, R., Caballero-Lopez, S., Yashiro, H., Xie, and J., Valdes-Galicia, 2005. *Coronal Mass Ejections and Galactic Cosmic Ray Modulation*, Astrophys. J., 625(1), 441-450.
- Martiningrum, D. R., A., Purwono, F., Nuraeni, dan J., Muhamad, 2012. *Fenomena Cuaca Antariksa*, Pusat Sains Antariksa, LAPAN.
- Mendillo, M., 2006. *Storms in the Ionosphere: Patterns and Processes for Total Electron Content*, Rev. Geophys., 44, RG4001, doi:10.1029/2005RG000193.
- Muslim, B., 2002. *Respon Global Ionosfer Terhadap Coronal Mass Ejection, 14 JULI 2000*, J. Fis. HFI. A5(0505).
- QIU, N., Y. -H., Chen, W. Wang, J. -C., Gong, and S. -Q., LIU, 2015. *Statistical Analysis of the Ionosphere Response to the CIR and CME in Mid-latitude regions*, Chinese Journal of Geophysics, 58, 2250-2262, doi:10.6038/cjg20150704.
- Tsurutani, B. T., O. P., Verkhoglyadova, A. J., Mannucci, G. S., Lakhina, G. Li, dan G. P., Zank, 2009, *A Brief Review of "Solar Flare Effects" on the Ionosphere*, Radio Sci., 44, RS0A17, doi:10.1029/2008RS004029.
- Yatini, C. Y., 2012. *CME Halo dan Dampaknya pada Intesitas Sinar Kosmik*, Jurnal Sains Dirgantara, 9(2), 139-146.
- Yatini, C. Y., Jiyo, dan M., Ruhimat, 2009. *Badai Matahari dan Pengaruhnya pada Ionosfer dan Geomagnet di Indonesia*, Majalah Sains dan Teknologi Dirgantara, 4(1), 17-24.