

PERBANDINGAN ANTARA PENGARUH BADAI GEOMAGNET 17 MARET DAN 23 JUNI 2015 TERHADAP PERBEDAAN RESPONS TEC IONOSFER (COMPARISON BETWEEN THE 17 MARCH AND 23 JUNE 2015 GEOMAGNETIC STORM EFFECT ON DIFFERENT RESPONSE OF IONOSPHERIC TEC)

Sri Ekawati^{1,*} dan Anwar Santoso²

¹Graduate School of System and Information Engineering, University of Tsukuba, Japan

²Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN), Indonesia

*e-mail: sri.ekawati@lapan.go.id; sri.ekawati.lapan@gmail.com

Diterima 12 Oktober 2018; Direvisi 12 Juni 2019; Disetujui 14 Juni 2019

ABSTRACT

So far, the largest geomagnetic storms of solar cycle-24 were recorded on 17 March, 2015 (Dst index of -223 nT) and on 23 June, 2015 (Dst index of -204 nT). A geomagnetic storm is one of major space weather event resulted from Solar Coronal Mass Ejection (CME) that affected the ionospheric layer. This research aims to investigate the comparison between the 17 March and 23 June 2015 geomagnetic storms and their effects on positive and the negative ionospheric storm. It also aims to investigate the reason behind the different responses of ionospheric TEC to geomagnetic storms with the same class (strong storm). Therefore, the solar wind plasma condition and CME as a driver of these geomagnetic storms were thoroughly examined. In this research, we used solar activity data, solar wind data, geomagnetic data (Dst-index) and ionospheric data (TEC). Ionospheric TEC data was obtained from GPS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor (GISTM) in Pontianak (0.03° S; 109.33° E), Bandung (6.90° S; 107.60° E) and Manado (1.48° N; 124.85° E). The quiet VTEC (qVTEC) was calculated as a background and the delta VTEC (Δ VTEC) was calculated as a measure of the enhancement or depression of ionospheric density. Interestingly, our result shows that there was a negative ionospheric storm caused by the 17 March 2015 geomagnetic storm with the minimum Δ VTEC reached -32.83 TECU over Pontianak, -61.47 TECU over Bandung and -50.64 TECU over Manado. In contrast, there was a positive ionospheric storm affected by the 23 June 2015 geomagnetic storm with the maximum Δ VTEC reached +17.6 TECU over Pontianak, +15.72 TECU over Bandung and +17.00 TECU over Manado. Furthermore, the time delay of ionospheric response to the 17 March geomagnetic storm is around 9-11 hours from the onset, while that of 23 June is around 1-2 hours. The other results show that the significant enhancement and depression of VTEC might be caused by ionospheric electrodynamics processes and the onset time of the geomagnetic storm.

Keywords: *geomagnetic storm, Dst-index, ionosphere, TEC*

ABSTRAK

Sampai saat ini, badai geomagnet terbesar yang tercatat pada siklus Matahari ke-24 terjadi pada tanggal 17 Maret 2015 (indeks Dst mencapai -223 nT) dan 23 Juni 2015 (indeks Dst mencapai -204 nT). Badai geomagnetik merupakan bagian dari cuaca antariksa yang disebabkan oleh lontaran massa korona Matahari yang memengaruhi lapisan ionosfer. Penelitian ini bertujuan untuk menelaah perbandingan pengaruh antara badai geomagnet 17 Maret dan 23 Juni 2015 terhadap peristiwa badai ionosfer negatif dan positif. Penelitian ini juga bertujuan untuk menginvestigasi alasan di balik perbedaan respons TEC ionosfer terhadap badai geomagnet dengan kelas yang sama (badai kuat). Oleh karena itu, kondisi plasma angin surya dan CME sebagai sumber penggerak badai geomagnetik ini diperiksa dengan seksama. Data TEC diperoleh dari GPS *Ionospheric Scintillation and*

TEC Monitor (GISTM) di Pontianak (0,03°LS;109,33°BT), Bandung (6,90°LS; 107,60°BT), dan Manado (1,48°LU; 124,85°BT). Nilai *quiet* VTEC (qVTEC) dihitung untuk dijadikan sebagai dasar acuan dan nilai delta VTEC (Δ VTEC) dihitung untuk dijadikan dasar ukuran peningkatan atau penurunan densitas elektron. Menariknya, hasil menunjukkan adanya badai ionosfer negatif, yang disebabkan oleh badai geomagnet tanggal 17 Maret 2015, dengan nilai minimum Δ VTEC mencapai -32,83 TECU di atas Pontianak, -61,47 TECU di atas Bandung, dan -50,64 TECU di atas Manado. Sebaliknya, terjadi badai ionosfer positif, yang disebabkan badai geomagnet tanggal 23 Juni 2015, dengan nilai maksimum Δ VTEC mencapai +17,60 TECU di atas Pontianak, +15,72 TECU di atas Bandung, dan +17,00 TECU di atas Manado. Adapun selang waktu respons ionosfer pada badai geomagnet 17 Maret adalah sekitar 9-11 jam dari waktu *onset*, sedangkan selang waktu pada badai 23 Juni adalah sekitar 1-2 jam. Hasil lainnya menunjukkan peningkatan dan penurunan VTEC yang signifikan tersebut mungkin disebabkan oleh proses elektrodinamika di ionosfer dan waktu *onset* badai geomagnet.

Kata kunci: *badai geomagnet, indeks Dst, ionosfer, TEC*

1 PENDAHULUAN

Total Electron Content (TEC) di ionosfer sangat rentan dipengaruhi oleh perubahan sistem arus listrik di magnetosfer akibat terjadinya badai geomagnet (Balan *et al.*, 2013; Muslim, 2013; Ekawati, 2016; Hamada *et al.*, 2015; Santoso, 2015). Peningkatan TEC yang ekstrim dinamakan badai ionosfer positif, sedangkan penurunan TEC yang ekstrem dinamakan badai ionosfer negatif (Balan *et al.*, 2013; Fagundes *et al.*, 2016). Mekanisme terjadinya badai ionosfer positif adalah terjadi peningkatan densitas oksigen dan perubahan pada angin meridional serta medan listrik arah timur yang menaikkan ionosfer ke ketinggian yang lebih tinggi sehingga laju rekombinasi rendah. Sementara itu, mekanisme terjadinya badai ionosfer negatif disebabkan oleh perubahan komposisi partikel netral yang menyebabkan penurunan rasio kerapatan Oksigen (O) dan Nitrogen (N₂) akibat gangguan atmosfer (de Abreu *et al.*, 2014; Fagundes *et al.*, 2016; Goncharenko *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2005).

Badai geomagnet yang kuat terjadi akibat peningkatan kecepatan angin surya yang sangat tinggi dan mendadak dan bersamaan dengan orientasi komponen *Interplanetary Magnetic Field* (IMF) ke arah Selatan (Fagundes *et al.*, 2016; Schunk dan Sojka, 1996). Peristiwa badai geomagnet

terdiri atas fase tumbuh, fase utama, dan fase pemulihan. Pada fase tumbuh, medan listrik di magnetosfer dan percepatan partikel meningkat, medan listrik menjadi sangat kuat dan percepatan menjadi sangat intens. Pada fase ini laju pemanasan Joule dan partikel serta arus elektrojet meningkat. Pada fase utama, energi tersebut memasuki ionosfer sangat maksimal. Terakhir, pada fase pemulihan, aktivitas geomagnet serta masukan energi ke ionosfer mengalami penurunan.

Respons TEC ionosfer terhadap badai geomagnet telah diobservasi terkait dengan peristiwa badai geomagnet akibat CME tanggal 28 dan 29 Oktober 2003 (Muslim, 2013). Penurunan TEC yang mencapai 50% terjadi sekitar 2 jam setelah partikel CME mencapai magnetosfer Bumi (Muslim, 2013). Pengaruh badai geomagnet tanggal 17 Maret 2015, atau lebih dikenal dengan *the 2015 St. Patrick's day storm*, terhadap TEC ionosfer di atas di Asia tenggara juga telah diobservasi (Spogli *et al.*, 2016). Namun, penelitian tentang badai geomagnet tanggal 23 Juni 2015 belum banyak dilakukan, padahal keduanya merupakan badai geomagnet terkuat pada siklus Matahari ke-24. Pada tanggal 17 Maret 2015, Dst mencapai nilai -223 nT, sedangkan pada tanggal 23 Juni 2015 Dst mencapai -204 nT. Penelitian sebelumnya (Ekawati, 2016) hanya membahas tentang peristiwa badai

ionosfer tanggal 18 Maret 2015 akibat badai geomagnet 17 Maret 2015 dengan menampilkan data *vertical* TEC (VTEC) di atas Manado tanggal 15-23 Maret 2015.

Pada makalah ini, penelaahan tidak hanya dilakukan pada data VTEC saja, tetapi juga menggunakan metode lain yaitu melakukan perhitungan *quiet* VTEC (qVTEC) (Chakraborty *et al.*, 2015) dan menghitung perubahan VTEC (Δ VTEC) menggunakan data TEC ionosfer dari tiga stasiun (Pontianak, Bandung, dan Manado). Selain itu, pembahasan juga dilakukan secara menyeluruh dari sumber pemicu badai geomagnet, perilaku angin surya, indeks badai geomagnet (indeks Dst) sampai pengaruhnya ke lapisan ionosfer. Selanjutnya, dilakukan juga perbandingan antara kedua peristiwa badai geomagnet tersebut dan pengaruhnya terhadap perbedaan perilaku atau respons ionosfer. Pemahaman interaksi antara aktivitas Matahari, geomagnetosfer, dan ionosfer secara keseluruhan ini dapat meningkatkan pemahaman mengenai bagaimana respons plasma ionosfer terhadap badai geomagnet dan apakah terjadi peningkatan atau penurunan plasma ionosfer (Horvath dan Lovell, 2015; Sahai *et al.*, 2009) yang dapat berpotensi menjadi gangguan terhadap sistem komunikasi dan navigasi.

Maka dari itu, masalah yang ingin dipecahkan pada penelitian ini meliputi:

1. Seberapa besar penurunan atau peningkatan densitas elektron di ionosfer sebagai respons dari kedua badai geomagnet tersebut dengan menggunakan metode perhitungan qVTEC (Chakraborty *et al.*, 2015) dan Δ VTEC.
2. Berapa lama selang waktu antara onset badai geomagnet dan badai ionosfer.

3. Apakah TEC ionosfer memberikan respons yang sama atau berbeda terhadap kedua badai geomagnet dengan klasifikasi yang sama (Gonzales *et al.*, 1994; Loewe dan Prolss, 1997).

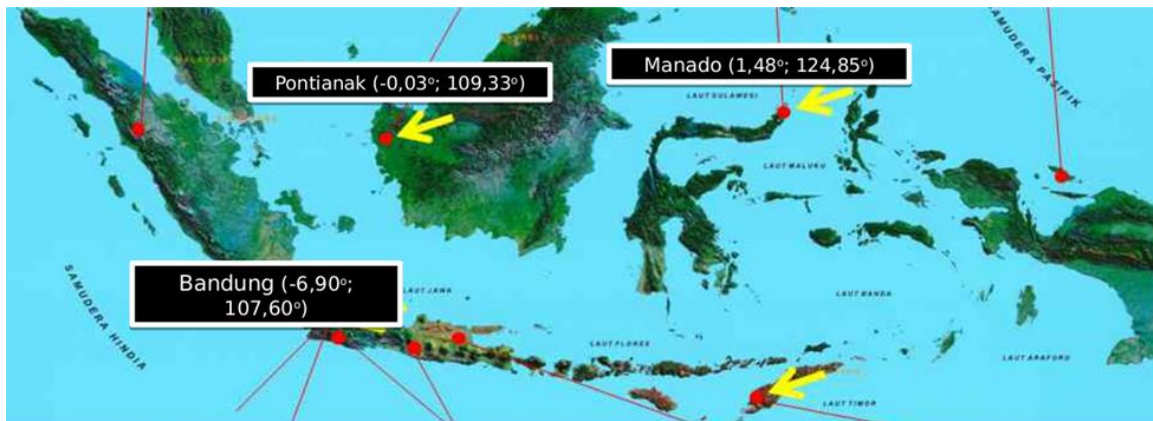
4. Bila respons yang diberikan oleh ionosfer berbeda, apakah kemungkinan faktor yang menyebabkan perbedaan respons terhadap kedua badai geomagnet dengan klasifikasi yang sama.

Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk membandingkan perubahan TEC di atas Pontianak, Bandung, dan Manado, sebagai respons terhadap badai geomagnet kategori kuat yang terjadi bukan hanya pada tanggal 17 Maret dan 23 Juni 2015. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk meneliti mengapa terjadi perbedaan perilaku TEC ionosfer terhadap kedua badai geomagnet tersebut meskipun kategori badai geomagnet tersebut relatif sama. Oleh karena itu, pada makalah ini, pembahasan tidak hanya ditekankan pada kondisi ionosfer saja, tetapi juga pada kondisi geomagnet, perilaku angin surya, dan sumber pemicunya.

2 METODOLOGI

2.1 Data dan Lokasi Pengamatan

Data ionosfer yang digunakan pada penelitian ini adalah data *Total Electron Content* (TEC) ionosfer yang diperoleh dari *GPS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor* (GISTM) yang ditempatkan di tiga stasiun pengamatan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2-1. Stasiun pengamatan Manado berada di wilayah Indonesia bagian tengah (WITA, UT+8) dengan lokasi 1,48° LU; 124,85° BT, sedangkan stasiun pengamatan Pontianak (0,03° LS; 109,33° BT) dan Bandung (6,90° LS; 107,60° BT) berada di wilayah Indonesia barat (WIB, UT+7).



Gambar 2-1: Lokasi pengamatan TEC Ionosfer yang diperoleh dari GISTM di Manado, Pontianak, dan Bandung

Selain data ionosfer, penelitian ini juga menggunakan data indeks gangguan geomagnet (*Dst/Disturbance Index*) dari *World Data Center for Geomagnetism* (WDC), parameter angin surya dari NASA/OMNI, serta data aktivitas Matahari. Parameter angin surya yang digunakan adalah IMF arah vertikal (B_z dalam nT), temperatur plasma proton (K), densitas proton (n/cm^3), serta kecepatan plasma (km/s). Data aktivitas Matahari yang digunakan adalah data *Coronal Mass Ejection* (CME) yang juga terkait secara bersamaan data *flare* sinar-X.

Semua data yang digunakan merupakan data beberapa hari sebelum, saat, dan beberapa hari setelah terjadinya peristiwa badai geomagnet pada tanggal 17 Maret dan 23 Juni 2015. Data TEC yang digunakan adalah data selama bulan Maret dan Juni 2015. Data angin surya yang digunakan adalah data sebelum dan pada saat terjadinya badai geomagnet. Sementara itu, data CME, sebagai sumber penggerak fenomena badai geomagnet, adalah data beberapa hari sebelum terjadinya badai geomagnet.

2.2 Perhitungan $\Delta VTEC$

Data mentah dari GISTM yang merupakan data biner diubah menjadi data dengan format ASCII menggunakan perangkat lunak `parseISMR.exe`. Setelah itu, dengan data tersebut, dihitung nilai

vertical TEC (VTEC). Selanjutnya, data TEC tersebut dibandingkan dengan nilai median TEC pada saat hari tenang geomagnet. Data TEC dari semua satelit digambarkan lalu dihitung nilai VTEC dari masing-masing satelit. Kemudian, dihitung nilai mediannya. Sebagai pembandingan, dihitung juga nilai VTEC pada waktu hari tenang geomagnet (terdapat 5 hari tenang dalam satu bulan yang diperoleh dari WDC). Hari tenang geomagnet selama bulan Maret 2015 adalah pada tanggal 5, 9, 10, 14, dan 30 Maret 2015 dan hari tenang geomagnet selama bulan Juni 2015 adalah pada tanggal 2, 3, 4, 5, dan 20 Juni 2015.

$$qVTEC_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n qVTEC_{t,i} \quad (2-1)$$

dengan $n = 1, 2, \dots, 5$ menyatakan hitungan hari tenang dan $t = 1, 2, \dots, 24$ menyatakan waktu pengamatan. Selanjutnya, perubahan VTEC dihitung dengan persamaan:

$$\Delta VTEC_t = VTEC_t - qVTEC_t \quad (2-2)$$

Kemudian, besarnya peningkatan dan penurunan VTEC dibandingkan dengan nilai rata-rata VTEC pada 5 hari tenang geomagnet ($qVTEC$) yang ditunjukkan persamaan (2-1). Metode perhitungan nilai $qVTEC$ sebagai dasar acuan ini dianggap cukup baik, karena nilai $qVTEC$ ini adalah nilai VTEC yang mewakili kondisi ionosfer pada saat kondisi

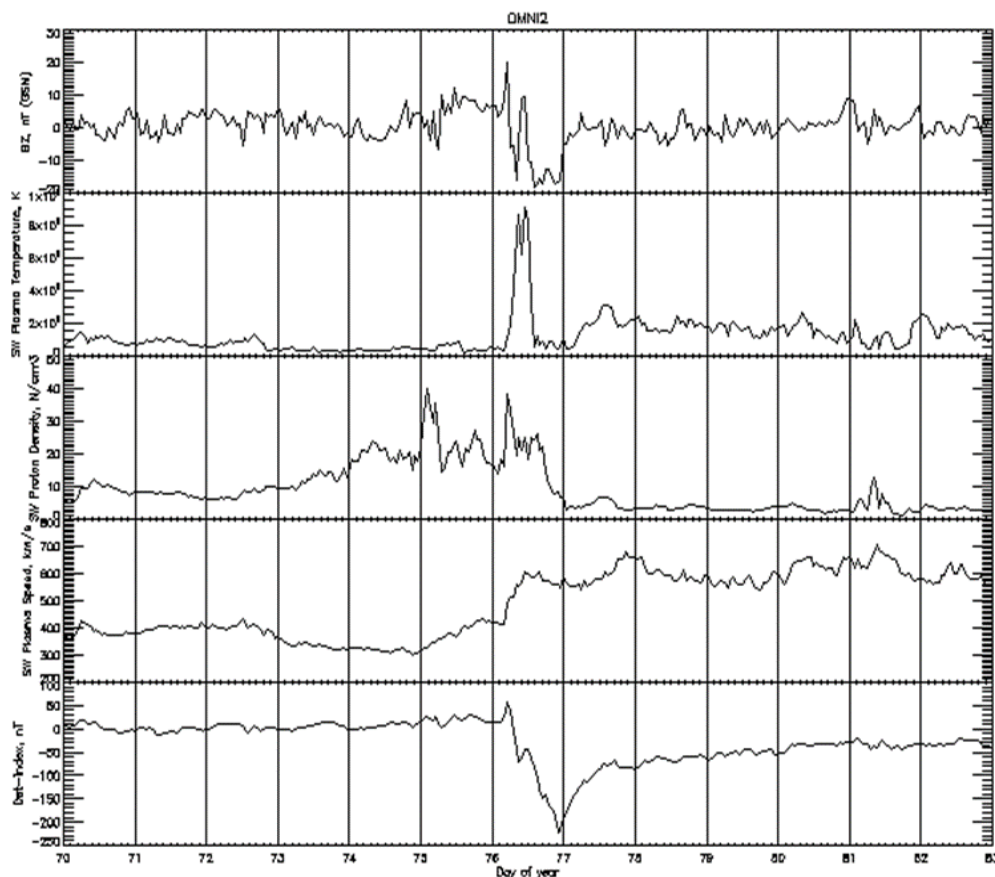
geomagnet tenang (Chakraborty *et al.*, 2015). Setelah itu, nilai delta VTEC (Δ VTEC), yang ditunjukkan persamaan (2-2), dihitung untuk memperoleh besarnya peningkatan dan penurunan densitas elektron ionosfer.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

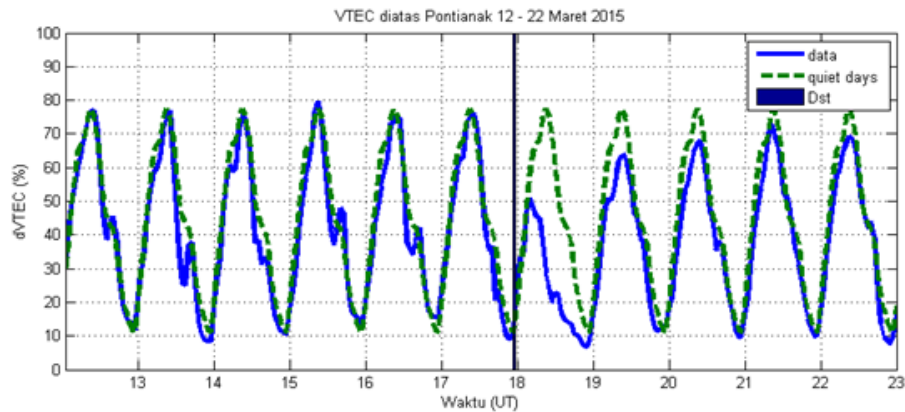
3.1 Badai Geomagnet 17 Maret 2015

Gambar 3-1 menunjukkan indeks Dst selama bulan Maret 2015 dengan nilai minimum sebesar -223 nT pada tanggal 17 Maret 2015 pukul 23.00 UT (18 Maret 2015 pukul 06.00 WIB atau 07.00 WITA) dan parameter angin surya terkait dengan peristiwa badai geomagnet kategori kuat pada tanggal 17 Maret 2015. Gambar 3-1 berturut-turut dari panel atas ke bawah menunjukkan B_z , temperatur, densitas, dan kecepatan

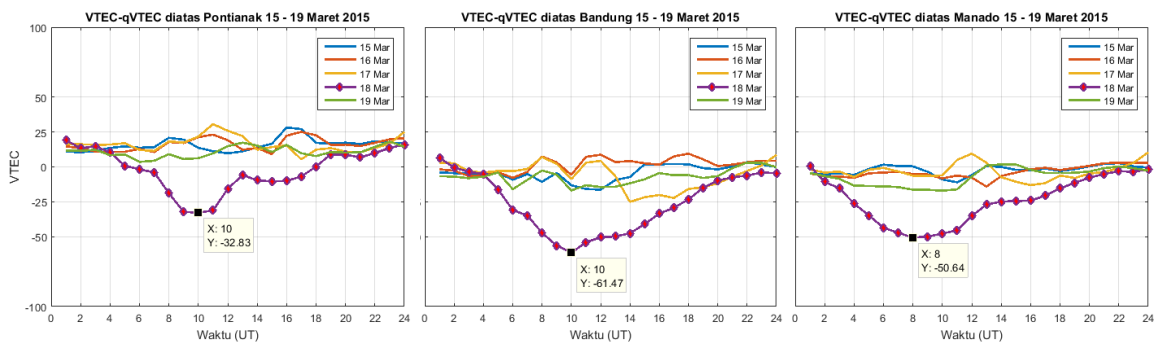
plasma angin surya, serta terakhir dibandingkan dengan indeks Dst. IMF B_z merupakan parameter yang sangat penting karena arah orientasinya menjadi penentu terjadinya rekoneksi. IMF B_z ke arah selatan merupakan gerbang utama masuknya partikel-partikel dari plasma Matahari ke magnetosfer Bumi (Winarko dan Santoso, 2016). Gambar 3-1 menunjukkan pada saat orientasi IMF B_z dominan ke arah selatan, maka densitas plasma yang besar dengan kecepatannya yang tinggi langsung mengakibatkan gangguan di magnetosfer Bumi dan temperatur plasma pun menjadi tinggi. Proses pemulihan pun cenderung lambat karena orientasi IMF B_z masih dominan ke arah Selatan ($B_z < 0$).



Gambar 3-1: Parameter angin surya terkait dengan peristiwa badai geomagnet 17 Maret 2015, berturut-turut dari panel atas ke bawah adalah: B_z IMF (nT), temperatur plasma proton (K), densitas proton (cm^{-3}), kecepatan plasma (km/s), dan indeks Dst (nT)



Gambar 3-2: VTEC tanggal 12-22 Maret 2015 dibandingkan dengan median VTEC pada saat hari tenang geomagnet tanggal 5, 9, 10, 14, dan 30 Maret 2015 diasosiasikan dengan peristiwa badai magnet kuat tanggal 17 Maret 2015 pukul 23.00 UT (18 Maret 2015 pukul 06.00 WIB atau 07.00 WITA)



Gambar 3-3: Δ VTEC (dalam TECU) di atas Pontianak (kiri), Bandung (tengah), dan Manado (kanan) pada tanggal 15-19 Maret 2015. Penurunan VTEC terjadi tanggal 18 Maret dengan intensitas yang berbeda

Dua kejadian CME yang berinteraksi satu sama lain diduga menjadi penggerak badai geomagnet 17 Maret 2015 (Liu *et al.*, 2015). CME yang pertama (CME1) terjadi pada tanggal 14 Maret 2015 dengan kecepatan 350 km/s terkait dengan peristiwa *flare* C2.6 dari daerah aktif AR12297 (21° S, 20° B) dengan puncak pada pukul 11.55 UT. Sementara itu CME kedua terjadi pada tanggal 15 Maret 2015 dengan kecepatan 702-1100 km/s terkait dengan peristiwa *flare* C9.1 dari daerah aktif AR 12297 (22° S, 25° B) dengan puncak pada pukul 02.13 UT. Fenomena ini cukup mengejutkan karena peristiwa *flare* kelas C dapat dikaitkan dengan kemunculan peristiwa badai geomagnet dengan skala kuat.

Setelah sumber penggerak badai diketahui, selanjutnya dilakukan

perbandingan nilai VTEC dengan qVTEC untuk mengetahui seberapa besar penurunan nilai densitas elektron. Gambar 3-2 adalah nilai VTEC dari tanggal 12-22 Maret 2015 (garis biru) dan nilai qVTEC (garis putus-putus berwarna hijau). Perbandingan nilai VTEC dengan nilai qVTEC bulan Maret 2015 tersebut sangat memperjelas penurunan nilai densitas elektron yang sangat ekstrem pada tanggal 18 Maret 2015.

Gambar 3-3 menunjukkan nilai Δ VTEC di atas Pontianak, Bandung, dan Manado pada tanggal 15-19 Maret 2015. Nilai Δ VTEC yang sangat signifikan dibandingkan dengan hari lainnya, yaitu Δ VTEC pada tanggal 18 Maret 2015 dengan nilai minimum sebesar -32,83 TECU di atas Pontianak, -61,47 TECU di atas Bandung, dan -50,64 TECU di atas Manado. Dengan demikian, respons

ionosfer terhadap badai geomagnet 17 Maret 2015 adalah berupa penurunan densitas elektron. Peristiwa ini dinamakan dengan peristiwa badai ionosfer negatif. Respons ionosfer ini terjadi sekitar 9-11 jam setelah terjadinya badai. Terjadinya penurunan densitas elektron di atas ionosfer Indonesia ini diduga karena perubahan komposisi partikel netral yang menyebabkan penurunan rasio densitas Oksigen (O) dan Nitrogen (N₂) akibat gangguan atmosfer (de Abreu *et al.*, 2014, Fagundes *et al.*, 2016; Goncharenko *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2005).

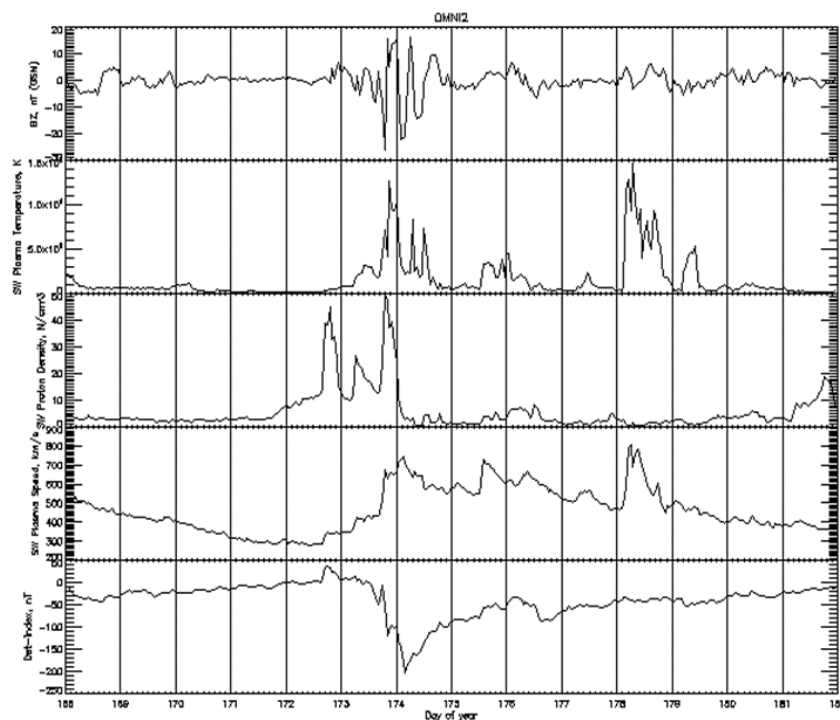
3.2 Badai Geomagnet 23 Juni 2015

Peristiwa badai geomagnet skala kuat yang kedua adalah badai geomagnet yang terjadi pada tanggal 23 Juni 2015 pukul 05.00 UT. Bila dikonversi ke waktu lokal Indonesia, maka peristiwa badai geomagnet ini terjadi pada tanggal 23 Juni 2015 pukul 12.00 WIB atau 13.00 WITA.

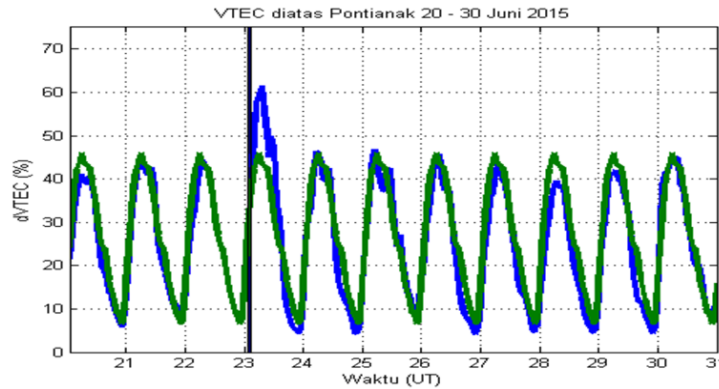
Gambar 3-4 menunjukkan indeks Dst selama bulan Juni 2015 serta parameter angin surya yang terkait dengan peristiwa badai 23 Juni 2015.

Nilai Dst paling rendah sebesar -204 nT yang terjadi pada siang hari (waktu lokal di Indonesia) atau pada saat puncak ionisasi di ionosfer.

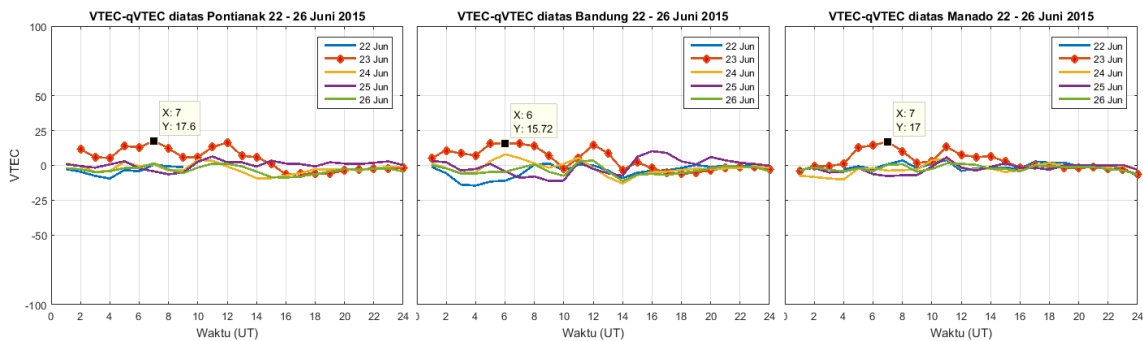
Gambar 3-6 berturut-turut dari panel atas ke bawah menunjukkan B_z IMF, temperatur plasma angin surya, densitas proton, kecepatan plasma angin surya, dan terakhir dibandingkan dengan indeks Dst. Densitas plasma pada panel 3 menunjukkan peningkatan yang cukup tinggi pada tanggal 21-22 Juni 2015, namun orientasi IMF B_z pada panel paling atas arahnya berfluktuasi dari arah utara ke selatan. Pada saat orientasi IMF B_z dominan ke arah selatan dengan nilai B_z mencapai -20 nT, maka densitas plasma yang besar dengan kecepatannya yang tinggi langsung mengakibatkan gangguan di magnetosfer Bumi. Peristiwa CME yang diduga sebagai sumber penggerak gangguan badai geomagnet, yaitu CME dengan kecepatan sekitar 976 km/s terkait dengan peristiwa *flare* M6.5 (13° U, 05° B) dengan puncaknya terjadi pada tanggal 21 Juni 2015 pukul 02.36 UT. Data CME tersebut diperoleh dari LASCO C2 dan C3 dengan lebar sudut sebesar 116 derajat.



Gambar 3-4: Serupa dengan Gambar 3-1, tetapi untuk peristiwa badai 23 Juni 2015



Gambar 3-5: VTEC tanggal 20-30 Juni 2015 dibandingkan dengan median VTEC pada saat hari tenang geomagnet tanggal 2, 3, 4, 5, dan 20 Juni 2015 diasosiasikan dengan peristiwa badai magnet kuat tanggal 23 Juni 2015 pukul 05.00 UT (23 Juni 2015 pukul 12.00 WIB atau 13.00 WITA)



Gambar 3-6: Δ VTEC (dalam TECU) di atas Pontianak (kiri), Bandung (tengah), dan Manado (kanan) pada tanggal 22-26 Juni 2015. Peningkatan VTEC terjadi tanggal 23 Juni dengan intensitas yang berbeda

Setelah dibahas perilaku angin surya dan sumber penggerak terjadinya badai geomagnet 23 Juni 2015, selanjutnya akan dibahas bagaimana pengaruhnya terhadap ionosfer. Gambar 3-5 adalah nilai VTEC tanggal 20-30 Juni 2015. Perbandingan nilai VTEC dengan qVTEC juga memperjelas terjadinya peningkatan nilai VTEC yang signifikan pada tanggal 23 Juni 2015. Sehingga respons ionosfer terhadap badai geomagnet 23 Juni 2015 adalah berupa peningkatan densitas elektron yang dinamakan badai ionosfer positif.

Gambar 3-6 menunjukkan nilai Δ VTEC di atas Pontianak, Bandung dan Manado dengan nilai paling maksimum sebesar +17,60 TECU di atas Pontianak, +15,72 TECU di atas Bandung, dan +17,00 TECU di atas Manado. Respons

ionosfer ini terjadi sekitar 1-2 jam setelah peristiwa badai. Peristiwa peningkatan densitas elektron ini diduga karena perubahan ketinggian ionosfer ke arah atas, sehingga laju rekombinasi semakin lambat (de Abreu *et al.*, 2014; Fagundes *et al.*, 2016; Goncharenko *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2005).

3.3 Perbandingan Badai 17 Maret dengan 23 Juni 2015

Tabel 3-1 menunjukkan perbandingan peristiwa badai geomagnet pada tanggal 17 Maret dan 23 Juni 2015 berdasarkan kemungkinan berkaitan dengan sumber pemicu (CME, flare), kondisi badai geomagnet (indeks Dst dan waktu onset) dan bagaimana respons ionosfer terhadap kedua badai tersebut (Δ VTEC dan selang waktu).

Tabel 3-1: PERBANDINGAN BADAI GEOMAGNET BERDASARKAN KEMUNGKINAN SUMBER PEMICU, KONDISI BADAI, DAN RESPONS IONOSFER

	Badai Geomagnet 17 Maret 2015	Badai Geomagnet 23 Juni 2015
CME	CME 15 Maret	CME 21 Juni
Flare sinar-X	C1.9	M6.5
Indeks Dst	-223 nT (badai kuat)	-204 nT (badai kuat)
Waktu onset	06.00 WIB/07.00 WITA Pagi hari (sebelum puncak ionisasi)	12.00 WIB/13.00 WITA Siang hari (mendekati puncak ionisasi)
Respons badai ionosfer	negatif	positif
$\Delta VTEC$	Pontianak: -32,83 TECU (17.00 WIB/18.00 WITA) Bandung: -61,47 TECU (17.00 WIB/18.00 WITA) Manado: -50,64 TECU (15.00 WIB/16.00 WITA)	Pontianak : +17,60 TECU (14.00 WIB /15.00 WITA) Bandung : +15,72 TECU (13.00 WIB /14.00 WITA) Manado : +17,00 TECU (14.00 WIB /15.00 WITA)
Selang Waktu	9-11 jam	1-2 jam

Sumber badai 17 Maret diduga dari CME 15 Maret berkaitan dengan peristiwa *flare* C1.9. Sementara itu, sumber badai 23 Juni diduga dari CME 21 Juni yang berkaitan dengan peristiwa flare 21 Juni. Indeks Dst pada badai 17 Maret mencapai minimum pada pagi hari (waktu lokal Indonesia) atau terjadi ketika sebelum proses ionisasi. Sementara itu, indeks Dst pada badai 23 Juni mencapai minimum terjadi pada siang hari (waktu lokal Indonesia) atau terjadi mendekati puncak ionisasi. Respons ionosfer di atas Indonesia terhadap badai 17 Maret adalah penurunan densitas elektron yang drastis mencapai sekitar -32,83 sampai dengan -61,47 TECU dengan selang waktu sekitar 9-11 jam dari waktu *onset* badai geomagnet 17 Maret 2015. Sedangkan respons ionosfer di atas Indonesia terhadap badai geomagnet 23 Juni adalah peningkatan densitas elektron yang drastis mencapai sekitar 15,72-17,60 TECU dengan selang waktu sekitar 1-2 jam dari waktu *onset* badai geomagnet 23 Juni 2015. Badai ionosfer negatif terjadi pada tanggal 18 Maret 2015 dan badai ionosfer positif terjadi pada tanggal 23 Juni 2015.

4 KESIMPULAN

Dua badai geomagnet 17 Maret 2015 dan 23 Juni 2015 dengan klasifikasi yang sama (klasifikasi badai geomagnet kuat) direspons tidak sama oleh ionosfer di atas Indonesia. Badai 17 Maret mengakibatkan badai ionosfer negatif sedangkan badai 23 Juni mengakibatkan badai ionosfer positif. Besarnya nilai $\Delta VTEC$ di setiap lokasi pengamatan juga bervariasi. Selang waktu respons ionosfer terhadap badai pun bervariasi. Penurunan dan peningkatan densitas elektron ionosfer yang signifikan tersebut kemungkinan disebabkan oleh proses elektrodinamika dan sistem arus listrik di ionosfer akibat perubahan atau gangguan medan magnet di magnetosfer (badai geomagnet). Proses tersebut kemungkinan dapat berbeda mekanismenya ketika badai geomagnet terjadi antara sebelum (pagi hari) atau saat puncak proses ionisasi berlangsung (siang hari). Dengan demikian, waktu *onset* terjadinya badai geomagnet kemungkinan akan memengaruhi penurunan atau peningkatan densitas elektron ionosfer.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada program beasiswa *Research and Innovation in Science and Technology Project (RISET-Pro)*. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada tim jaringan dan stasiun pengamatan Manado, Pontianak dan Bandung yang telah menyediakan data TEC ionosfer, Universitas Kyoto, Jepang dan NASA *Goddard Space Flight Center* Amerika Serikat yang telah menyediakan data indeks Dst dan angin surya. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada mitra bestari atas saran dan masukannya dalam penyempurnaan makalah ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Balan, N., Y. Otsuka, M. Nishioka, J.Y. Liu, dan G.J. Bailey, 2013. *Physical Mechanisms of the Ionospheric Storms at Equatorial and Higher Latitudes during the Recovery Phase of Geomagnetic Storms*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 118, 2660-2669.
- Chakraborty, M., S. Kumar, B.K. De, dan A. Guha, 2015. *Effects of Geomagnetic Storm on Low Latitude Ionospheric Total Electron Content: A Case Study from Indian Sector*. Journal of Earth System Science, 124, 1115.
- de Abreu, A.J., P.R. Fagundes, M. Gende, O.S. Bolaji, R. de Jesus, dan C. Brunini, 2014. *Investigation of Ionospheric Response to Two Moderate Geomagnetic Storms using GPS-TEC Measurements in the South American and African Sectors during the Ascending Phase of Solar Cycle 24*. Advances in Space Research, 53, 1313.
- Ekawati, S., 2016. *Badai Ionosfer Negatif di Atas Manado berdasarkan Data GPS Terkait Peristiwa Badai Geomagnet 17 Maret 2015*. Prosiding Workshop Riset Cuaca Antariksa dan peluang Pemanfaatannya. ISSN: 2355-388X, pp 22.
- Fagundes, P.R., F.A. Cardoso, B.G. Fejer, K. Venkatesh, B.A.G. Ribeiro, dan 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*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 121, 5613.
- Goncharenko, L.P., J.C. Foster, A.J. Coster, C. Huang, N. Aponte, dan L.J. Paxton, 2007. *Observations of a Positive Storm Phase on 10 September 2005*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 69, 1253.
- Gonzalez W.D., J.A. Joselyn, Y. Kamide, H.W. Kroehl, G. Rostoker, B.T. Tsurutani, dan V.M. Vasyliunas, 1994. *What is A Geomagnetic Storm?*. Journal of Geophysical Research, 99,5771.
- Hamada, A.M., A.M. Mahrous, I. Fathy, E. Ghamry, K. Groves, dan K. Yumoto, 2015. *TEC Variations during Geomagnetic Storm/Substorm with Pc5/Pi2 Pulsation Signature*. Advances in Space Research, 55, 2534.
- Horvath, I. dan B.C. Lovell, 2015. *Positive and Negative Ionospheric Storms Occurring during the 15 May 2005 Geomagnetic Superstorm*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 120, 7822.
- Huang, C.S., J.C. Foster, L.P. Goncharenko, P.J. Erickson, W. Rideout, dan A.J. Coster, 2005. *A Strong Positive Phase of Ionospheric Storms Observed by the Millstone Hill Incoherent Scatter Radar and Global GPS Network*. Journal of Geophysical Resesearch, 110, A06303.
- Liu, Y.D., H. Hu, R. Wang, Z. Yang, B. Zhu, Y.A. Liu, J.G. Luhmann, dan J.D. Richardson, 2015. *Plasma and Magnetic Field Characteristics of Solar Coronal Mass Ejections in Relation to Geomagnetic Storm Intensity and Variability*. The Astrophysical Journal Letters, 809, L34.
- Loewe, C.A. dan G.W. Prolls, 1997. *Classification and Mean Behavior of Magnetic Storms*, J. Geophys. Res. 102, 14209.
- Muslim, B., 2013. *Pengaruh Badai Matahari Oktober 2003 pada Ionosfer dari TEC GIM*. Jurnal Fisika, 3, 63.
- Sahai, Y., F. Becker-Guedes, P.R. Fagundes, R. de Jesus, A.J. de Abreu, L.J. Paxton, L.P. Goncharenko, C. Brunini, M.

- Gende, A.S. Ferreira, N.S. Lima, F.L. Guarnieri, V.G. Pillat, J.A. Bittencourt, dan C.M.N. Candido., 2009. *Effects Observed in the Latin American Sector Ionospheric F Region during the Intense Geomagnetic Disturbances in the Early Part of November 2004*. Journal of Geophysical Research, 114, A00A19.
- Santoso, A., 2015. *Respon Magnetosfer dan Ionosfer di atas Indonesia terhadap Cuaca Antariksa Ekstrem dan Dampaknya pada Satelit LAPAN Tubsat*. Buku Bunga Rampai Makalah Workshop. ISBN:978-979-1458-85-6.
- Schunk, R.W., dan J.J. Sojka, 1996. *Ionosphere-Thermosphere Space Weather Issues*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 58, 1527.
- Spogli, L., C. Cesaroni, D.D. Mauro, M. Pezzopane, L. Alfonsi, E. Musicò, G. Povero, M. Pini, F. Dovi, R. Romero, N. Linty, P. Abadi, F. Nuraeni, A. Husin, M.L. Huy, T.T. Lan, T.V. La, V.G. Pillat, dan N. Floury, 2016. *Formation of Ionospheric Irregularities over Southeast Asia during the 2015 St. Patrick's Day Storm*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 121, 12211.
- Winarko, A. dan A. Santoso, 2016. *Pengaruh Orientasi Medan Magnet Antarplanet pada Gangguan Geomagnet di Lintang Rendah*. Jurnal Sains Dirgantara, 13, 73.

