

Anomali *Total Electron Content* (TEC) Di Ionosfer Sebagai Prekursor Gempa Bumi Di Sumatra

Rohadatul Aisy Syafda^{1,*}, Dwi Pujiastuti¹, Afrizal B²

¹Laboratorium Fisika Bumi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Andalas, Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163

²BPAA LAPAN Agam Bukit Kota Tabang

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 1 Februari 2021
Direvisi: 8 Februari 2021
Diterima: 10 Februari 2021

Kata kunci:

Total Electron Content (TEC)
gempa bumi
prekursor
teknik korelasi
analisis spasial

Keywords:

Total Electron Content (TEC)
earthquake
precursors
correlation technique
spatial analysis

Penulis Korespondensi:

Rohadatul Aisy Syafda
Email: aisysyafda@gmail.com

ABSTRAK

Anomali *Total Electron Content* melalui data sinyal radio frekuensi-ganda GPS dapat menunjukkan adanya perubahan aktivitas ionik di ionosfer yang dapat disebabkan oleh badai geomagnetik maupun peristiwa seismo-ionospheric coupling. Pantai barat Sumatera merupakan lokasi yang rawan akan bencana gempa bumi akibat batas dari zona subduksi. Penelitian beberapa gempa dalam kurun beberapa dekade terakhir di barat Sumatra menggunakan data SuGAR dan IGS telah dilakukan untuk mengetahui adanya prekursor gempa bumi melalui analisis anomali TEC. Terdapat lima gempa yang dianalisis dengan skala 5 hingga 9 SR dengan menggunakan teknik korelasi dan analisis spasial. Dari hasil analisis yang telah dilakukan diperoleh empat gempa yang menunjukkan anomali TEC yaitu gempa dengan magnitudo 6 hingga 9 SR dimana terdapat satu hari atau dua hari anomali TEC yang dianggap sebagai prekursor gempa bumi.

Total Electron Content anomalies from dual-frequency GPS radio signals can shown the change of ionic activity on ionosphere that caused by geomagnetic storm or seismo-ionospheric coupling. The East coast of Sumatera is a very vulnerable location of earthquakes because it adjust with subduction zone. Research on some earthquake in last decade on the east part of Sumatera has been identified use SuGAR and IGS data to determine the earthquake precursors from TEC anomaly analysis. Five earthquakes were analyzed on a scale of 5 to 9 SR using correlation techniques and spatial analysis. From the analysis results that have been carried out, it was found that four earthquakes showed TEC anomalies, namely earthquakes with a magnitude of 6 to 9 SR where there were one day or two days of TEC anomalies which were considered as earthquake precursors.

Copyright © 2020 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan sebuah guncangan yang menjalar ke permukaan bumi yang disebabkan oleh gangguan di dalam kerak bumi. Banyak faktor yang mempengaruhi terjadinya gempa bumi, misalnya akibat akumulasi energi pada patahan di bawah permukaan bumi yang apabila energi itu dilepaskan maka akan terjadi gempa bumi. Selain itu gempa bumi juga dapat terjadi karena adanya aktivitas material radioaktif yang ada di bawah permukaan bumi. Aktivitas gempa bumi menyebabkan terjadinya fluktuasi aktivitas seismik yang dapat menimbulkan gelombang gravitasi atmosfer dan gelombang infrasonik. Gelombang gravitasi dan gelombang infrasonik ini menjalar hingga ionosfer yang menyebabkan ion-ion yang terdapat di ionosfer mengalami fluktuasi (Muslim dkk., 2014).

Perubahan ion-ion yang terjadi pada waktu sebelum dan setelah terjadinya gempa bumi dengan magnitudo yang besar ($M > 6$) dapat menyebabkan anomali di ionosfer (Liu dkk., 2001). Anomali sebelum gempa yang terjadi di lapisan ionosfer diakibatkan oleh radon yang tersimpan di dalam batuan terlepas ke udara ketika batuan mengalami deformasi (Pulinets, 2004). Radon yang meluruh ke udara kemudian mengionisasi atom sehingga menyebabkan perubahan di lapisan ionosfer. Semakin besar kekuatan gempa maka akan semakin luas daerah yang terkena gangguan berupa anomali yang terjadi di lapisan ionosfer, sehingga anomali yang terjadi dapat diindikasikan sebagai prekursor gempa bumi (Pulinets, 2004).

Hingga saat ini telah banyak penelitian yang menunjukkan perubahan nilai TEC di ionosfer sebelum gempa bumi. Pattisahusiwa dkk. (2014) melakukan penelitian Seismo-ionosfer pada dua gempa besar di Sumatera (Sumatera Selatan M8.5 2007 dan Lepas Pantai Barat Sumatera Utara M8.6 2012). Dari hasil penelitian diperoleh bahwa kedua gempa ini menunjukkan adanya anomali TEC di sekitar dua wilayah episentrum gempa bumi ini.

Rhoades dkk. (2015) meneliti perubahan nilai TEC di ionosfer terhadap empat gempa bumi di New Zealand (Darfield M7.1 2010, Christchurch M6.3 2011, Seddon M6.5 2013 dan Lake Grassmare M6.6 2013) Berdasarkan penelitian ini ditemukan bahwa tiga diantara empat gempa bumi tersebut (Darfield, Seddon dan Lake Grassmare) tidak menunjukkan adanya anomali TEC. Hal ini disebabkan oleh efek geo-magnetik dan tidak terkait dengan kejadian gempa bumi, sehingga data TEC tidak dapat dianggap sebagai prekursor pada ketiga gempa bumi tersebut. Namun gempa bumi Christchurch menunjukkan adanya anomali TEC yang terjadi tiga hari sebelum terjadinya *mainshock*, sehingga anomali TEC ini dapat diasumsikan sebagai prekursor terjadinya gempa Christchurch. Rhoades dkk. (2015) menambahkan bahwa prekursor gempa ini bisa menjadi informasi yang cukup baik untuk memprediksi gempa bumi meski hanya untuk gempa bumi bermagnitudo besar.

Tinjauan ini menguatkan hipotesis bahwa adanya pengaruh gempa bumi terhadap anomali TEC. Apabila dibandingkan dengan data gempa yang digunakan Rhoades dkk. (2015) maka magnitudo yang digunakan dalam penelitian Pattisahusiwa dkk. (2014) lebih besar, sehingga potensi munculnya anomali TEC lebih besar. Anomali ini dapat dianggap sebagai prekursor munculnya gempa bumi.

II. METODE

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Fisika Bumi Jurusan Fisika Universitas Andalas. Alat yang digunakan pada penelitian adalah software GRS_TEC_v.2.9.3 dan software Python. Data yang digunakan untuk melakukan perhitungan TEC dalam penelitian ini menggunakan data beberapa stasiun penerima GPS yang berada dalam jaringan *Sumatran GPS Array* (SuGAR). Data *precise ephemeris* yang digunakan untuk perhitungan nilai TEC diambil dari GNSS NASA untuk setiap stasiun pada *Day of Year* (DOY) yang digunakan dalam perhitungan. Magnitudo yang dipilih berskala 5 hingga 9 magnitudo. Kelima gempa yang dipilih adalah gempa M5,7 Kepulauan Batu 2009, gempa M6,5 Kepulauan Mentawai 2008, gempa M7,4 Simeulue 2002, gempa M8,4 Sumatera Selatan 2007 dan gempa M9,1 Aceh 2004. Kelima gempa ini dipilih sebagai representasi gempa bermagnitudo 5 hingga 9, sehingga bisa diketahui apakah magnitudo akan berpengaruh pada perubahan nilai TEC di ionosfer. Kelima gempa ini juga dipilih atas dasar ketersediaan data harian *receiver* GPS. Tahapan teknik penelitian yang dilakukan sebagai berikut:

2.1 Perhitungan TEC

Di dalam penelitian ini perhitungan TEC dilakukan menggunakan software GPS_Gopi_v.2.9.3. Data *rinex*, *precise ephemeris*, *pseudorange* dan *carrier phase* digunakan untuk menghitung TEC harian.

Data yang diambil dalam periode 31 hari, yaitu 23 hari sebelum gempa, hari-h gempa dan 7 hari setelah gempa (Muslim, 2015). Seluruh data tersebut diolah untuk dilihat anomali harian dari TEC yang dapat diperkirakan sebagai prekursor.

2.2 Teknik Korelasi

Salah satu metode yang digunakan untuk analisis TEC adalah metode statistik. Muslim (2015) melakukan penelitian menggunakan teknik korelasi untuk melihat prekursor beberapa gempa besar yang terjadi di dunia. Nilai rata-rata TEC pada jam tertentu dalam 1 hari dikorelasikan dengan median dari rata-rata jam yang sama dari 31 data diurnal yang telah dihitung. Tiga puluh satu koefisien korelasi diperoleh dari hasil korelasi tertentu dengan nilai median ini. Seluruh koefisien korelasi dirata-ratakan sehingga diperoleh satu nilai rata-rata koefisien korelasi. Adapun untuk mencari nilai koefisien korelasi dapat dilakukan melalui persamaan berikut :

$$r_{xy} = \frac{N.\Sigma XY - \Sigma X \Sigma Y}{\sqrt{[(N.X^2) - (\Sigma X)^2] [(N.\Sigma Y^2) - (\Sigma Y)^2]}} \quad (1)$$

dengan r_{xy} merupakan nilai koefisien korelasi antara variabel X dan Y, N merupakan banyaknya data, ΣX merupakan jumlah data pada variabel X, ΣY merupakan jumlah data pada variabel Y, ΣXY merupakan jumlah dari hasil perkalian variabel X dan variabel Y. ΣX^2 merupakan jumlah dari masing-masing variabel X yang dikuadratkan, dan ΣY^2 merupakan jumlah dari masing-masing variabel Y yang dikuadratkan.

Masing-masing nilai koefisien korelasi dikurangkan dengan nilai rata-rata koefisien korelasi maka diperoleh nilai simpangan koefisien korelasi (skk). Setelah 31 nilai skk diperoleh maka dicari nilai standar deviasinya (dskk). Setiap simpangan ini dibagi dengan standar deviasi maka akan diperoleh skk/dskk selama 31 hari yang digunakan sebagai indikator adanya prekursor gempa bumi.

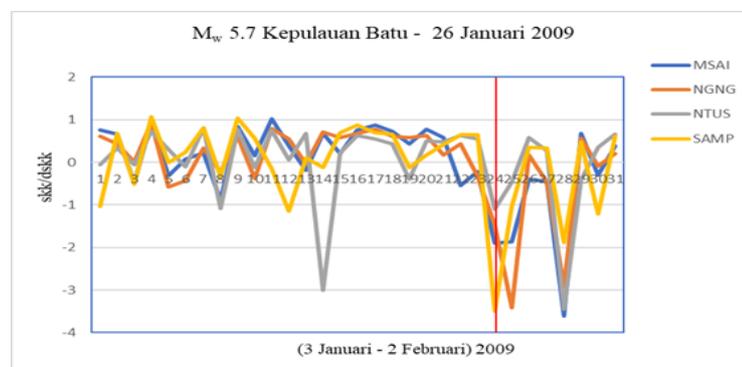
Prekursor gempa bumi dapat terlihat apabila nilai skk/dskk kurang dari -1 dengan syarat tidak ada badai magnetik atau nilai indeks Dst > -50 nT. Apabila nilai skk/dskk kurang dari -1 namun indeks Dst < -50 nT maka tidak dapat dikatakan sebagai prekursor gempa, karena anomali nilai TEC tersebut dapat disebabkan oleh badai geomagnetik.

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Analisis Hasil Korelasi

3.1.1 Anomali TEC Gempa M 5,7 Kepulauan Batu - 26 Januari 2009 (DOY 26)

Gempa berkekuatan 5,7 SR ini berada disekitar Kepulauan Mentawai dan memiliki hiposenter 10 km. Empat stasiun GPS digunakan untuk melakukan analisis TEC pada gempa ini, antara lain : MSAI, NGNG, NTUS, SAMP. Dari hasil analisis skk/dskk 23 hari sebelum gempa tidak ada nilai skk/dskk yang bernilai kurang dari -1 (dapat diamati dari Gambar 2), maka dapat dikatakan tidak adanya prekursor gempa sebelum gempa ini terjadi.

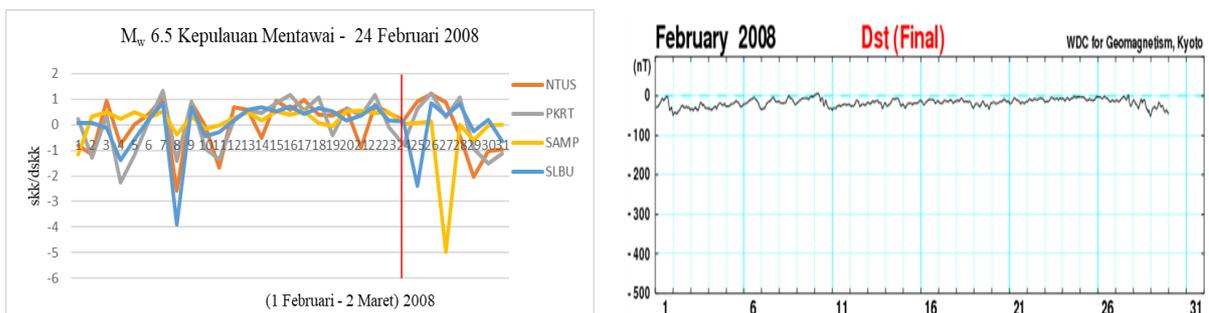


Gambar 2 Hasil pengolahan gempa bermagnitudo M 5,7.

Dari hasil pengolahan skk/dskk gempa ini dapat dilihat pada keseluruhan hari sebelum gempa (disebelah kiri garis merah) hampir tidak ada nilai skk/dskk yang kurang dari -1, sehingga dapat diketahui bahwa tidak munculnya prekursor pada gempa magnitudo ini.

3.1.2 Anomali TEC Gempa M 6,5 Kepulauan Mentawai - 24 Februari 2008 (DOY 55)

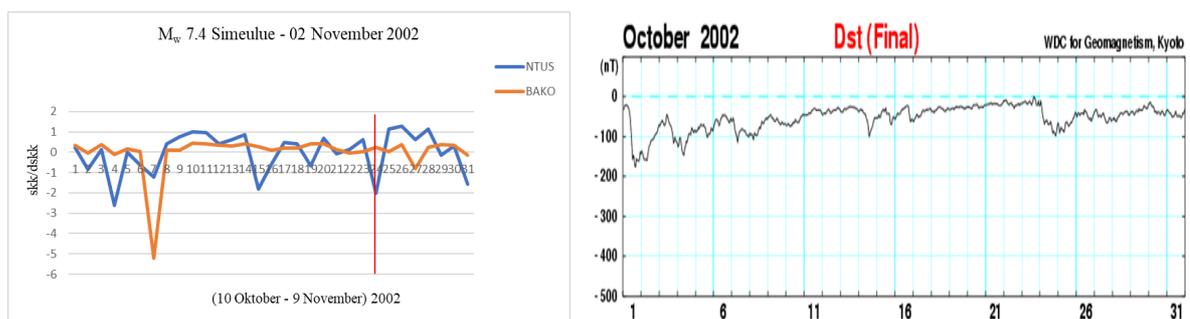
Gempa dengan kekuatan 6,5 SR ini juga berada di sekitar Kepulauan Mentawai yang memiliki kedalaman hiposenter 22 km. Stasiun GPS yang digunakan untuk analisis TEC antara lain : NTUS, PKRT, SAMP, SLBU. Dari hasil analisis skk/dskk 23 hari sebelum gempa bumi terlihat adanya 5 hari yang memiliki nilai skk/dskk kurang dari -1 yang dikonfirmasi oleh hampir semua stasiun pengamatan (Gambar 3). Kelima hari tersebut yaitu: DOY 33, 35, 36, 39, 42. Garis vertikal merah pada gambar menunjukkan hari kejadian gempa. Dari analisis indeks Dst badai magnetik (Gambar 3) tidak terjadi pada kelima hari tersebut. Kelima hari tersebut dapat diidentifikasi sebagai prekursor gempa. Kemudian kelima hari yang diduga sebagai prekursor ini dianalisis lebih lanjut melalui analisis spasial untuk mengkonfirmasi dugaan prekursor ini.



Gambar 3 Hasil pengolahan gempa bermagnitudo M 6,5 beserta indeks Dst

3.1.3 Anomali TEC Gempa M 7,4 Simeulue - 02 November 2002 (DOY 306)

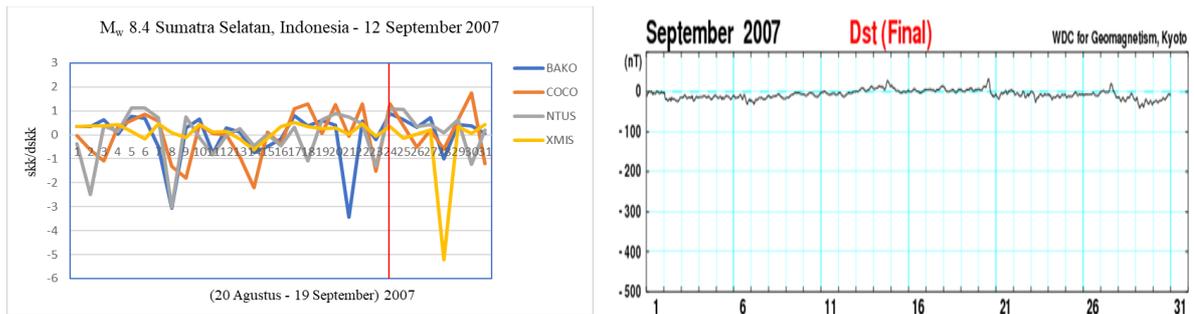
Gempa dengan magnitudo 7,4 SR ini berada di barat provinsi Aceh, disekitar Pulau Simeulue. Hiposenter dari gempa ini adalah 30 km dan stasiun yang digunakan untuk analisis TEC adalah yaitu BAKO dan NTUS. Setelah dianalisis dengan teknik korelasi diperoleh bahwa terdapat 3 hari yang nilai skk/dskk kurang dari -1 yaitu DOY 286, 289, 297 yang dikonfirmasi oleh kedua stasiun sehingga ketiga hari tersebut dapat dianggap menunjukkan prekursor gempa bumi (Gambar 4). Terdapat beberapa aktivitas badai magnetik yang mengganggu pada 23 hari sebelum gempa ini terjadi namun pada ketiga hari tersebut tidak terpengaruh oleh aktivitas badai magnetik tersebut.



Gambar 4 Hasil pengolahan gempa bermagnitudo M 7,4 beserta indeks Dst

3.1.4 Anomali TEC Gempa M 8,4 Sumatra Selatan - 12 September 2007 (DOY 255)

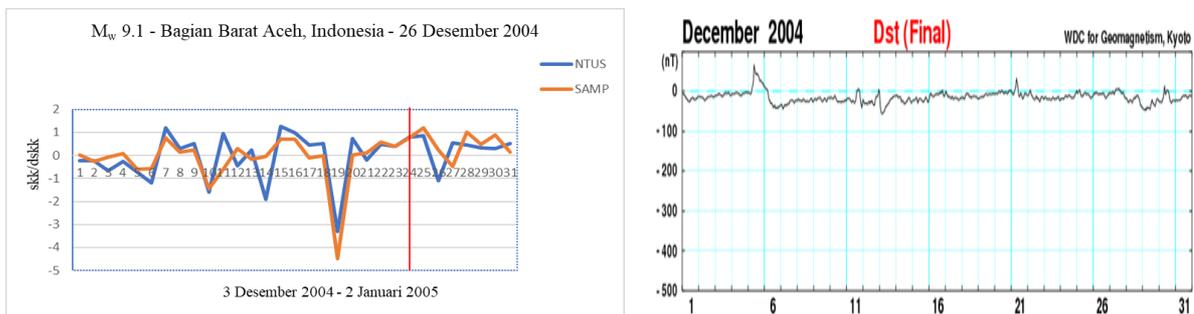
Gempa dengan hiposenter 34 km dan magnitudo 8,4 SR ini berada di bagian barat Provinsi Bengkulu. Empat stasiun GPS dalam jaringan SuGAR dan IGS yang digunakan untuk melakukan analisis TEC antara lain: BAKO, COCO, NTUS, XMIS. Pada gambar 4 dapat dilihat bahwa terdapat 2 hari sebelum gempa yang menunjukkan nilai skk/dskk kurang dari -1 yaitu pada DOY 239 dan DOY 254 yang dikonfirmasi oleh stasiun BAKO, COCO dan NTUS (Gambar 5). Tidak ada badai magnetik yang mengganggu pada 23 hari sebelum gempa ini, maka kedua hari tersebut dapat dikatakan sebagai prekursor gempa.



Gambar 5 Hasil pengolahan gempa bermagnitudo M 8,4 beserta indeks Dst

3.1.5 Anomali TEC Gempa M 9,1 Aceh - 26 Desember 2004 (DOY 361)

Gempa ini merupakan salah satu gempa terbesar yang pernah terjadi dalam abad ini. Gempa ini berada di barat Provinsi Aceh dengan kedalaman hiposenter 30 km. Dua stasiun GPS yang digunakan untuk analisis TEC yaitu NTUS dan SAMP. Dari hasil analisis nilai skk/dskk diketahui bahwa terdapat 2 hari yang menunjukkan nilai skk/dskk kurang dari -1 yaitu DOY 347 dan DOY 356 (Gambar 6). Tidak ada badai magnetik yang terjadi sebelum terjadinya gempa ini, sehingga kedua hari tersebut dapat mengindikasikan munculnya prekursor gempa. Selain itu hasil dari beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pada DOY 356 (21 Desember 2004) terdapat anomali TEC di ionosfer yang diidentifikasi sebagai prekursor gempa bumi. Hasil dari kedua hari yang diduga sebagai prekursor ini kemudian dilanjutkan dengan analisis spasial agar dapat dilihat tren perubahan anomali di setiap stasiun. Apabila terjadi anomali ionosfer yang diakibatkan oleh gempa bumi maka akan terekam kuat pada stasiun yang dekat dengan episenter dan semakin jauh dari stasiun maka nilai anomali semakin mengecil dan menghilang.



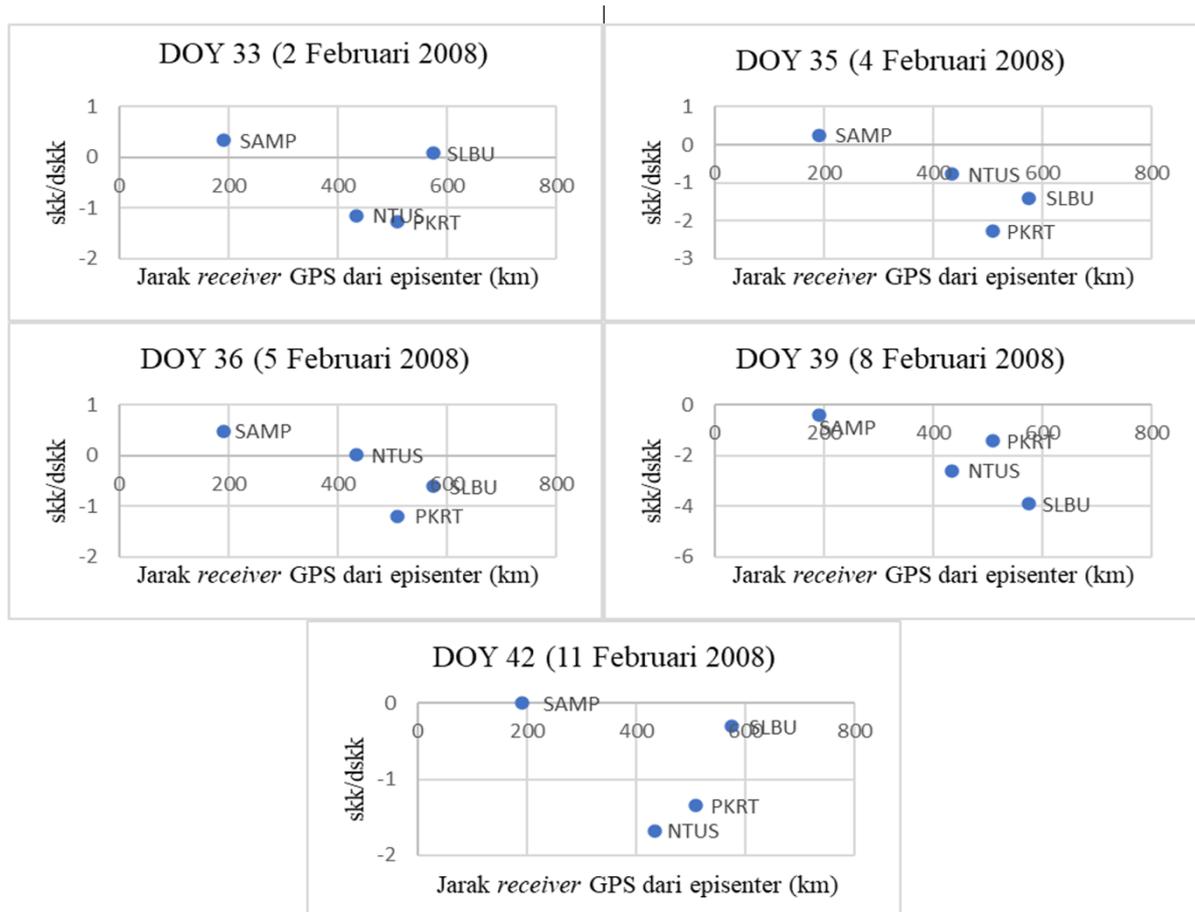
Gambar 6 Hasil pengolahan gempa bermagnitudo M 9,1 beserta indeks Dst

3.2 Analisis Spasial

3.2.1 Gempa M 6,5 Kepulauan Mentawai - 24 Februari 2008

Kelima hari yang dilakukan analisis spasial adalah DOY 33, 35, 36, 39, 42. Dari hasil analisis skk/dskk terhadap jarak dapat diketahui bagaimana tren perubahan nilai skk/dskk, apabila semakin menjauh dari episenter gempa dan nilai skk/dskk semakin besar maka dapat dikatakan sebagai prekursor yang disebabkan akibat gempa tersebut. Dari hasil analisis spasial yang diperoleh didapatkan bahwa hanya DOY 42 (11 Februari 2008) yang menunjukkan kecenderungan nilai skk/dskk semakin besar (Gambar 7). Pada DOY 33, 35, 36, 39 tidak menunjukkan kecenderungan semakin besar, namun nilai skk/dskk bersifat acak besarnya terhadap jarak meskipun nilainya kurang dari -1. Dengan demikian, yang dapat dikatakan sebagai prekursor gempa adalah yang terdeteksi terjadi pada DOY 42.

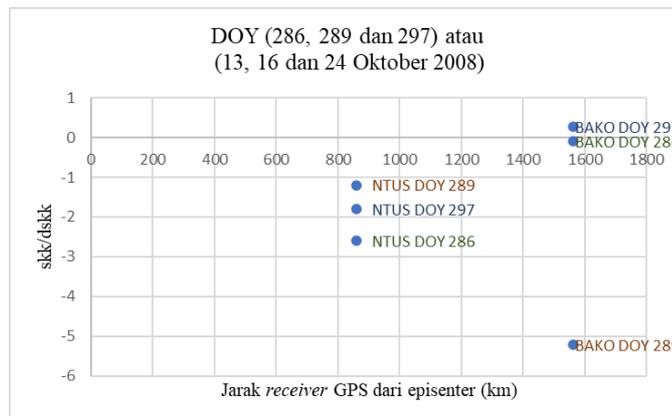
Dari hasil pengolahan data dapat dilihat bahwa semakin jauh jarak stasiun dari episenter gempa maka nilai skk/dskk semakin besar, meskipun terdapat beberapa stasiun yang nilai skk/dskk tidak semakin besar.



Gambar 6 Hasil analisis spasial pada gempa bermagnitudo M 6,5.

3.2.2 Gempa M 7,4 Simeulue – 02 November 2002

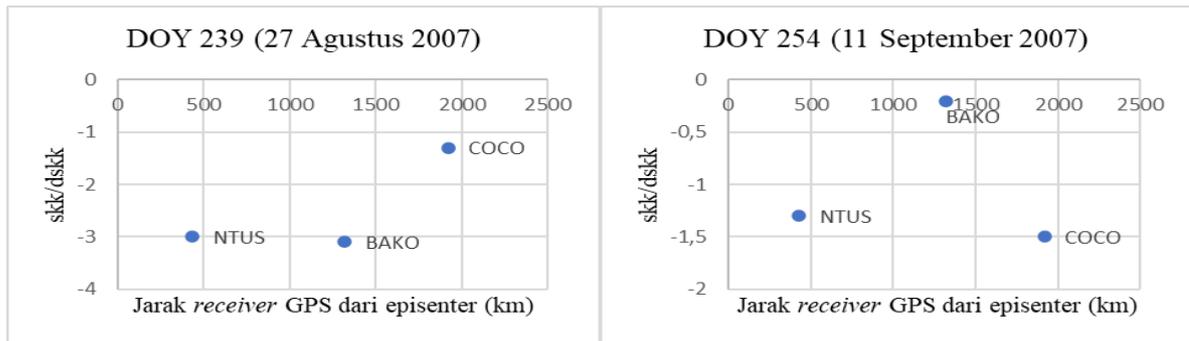
Terdapat 2 hari sebelum gempa yang menunjukkan nilai $skk/dskk$ kurang dari -1 yaitu DOY 239 dan DOY 254. Melalui analisis teknik korelasi diperoleh bahwa terdapat 3 hari yang nilai $skk/dskk$ kurang dari -1 yaitu DOY 286, 289, 297. Setelah dilakukan analisis terhadap jarak episenter (Gambar 8) terdapat 2 hari yang menunjukkan kecenderungan nilai $skk/dskk$ semakin besar yaitu DOY 286 dan DOY 297. Dengan demikian, DOY 286 dan DOY 297 merupakan prekursor gempa terdeteksi.



Gambar 8 Hasil analisis spasial pada gempa bermagnitudo M 7,4

3.2.3 Gempa M 8.4 Sumatra Selatan – 12 September 2007

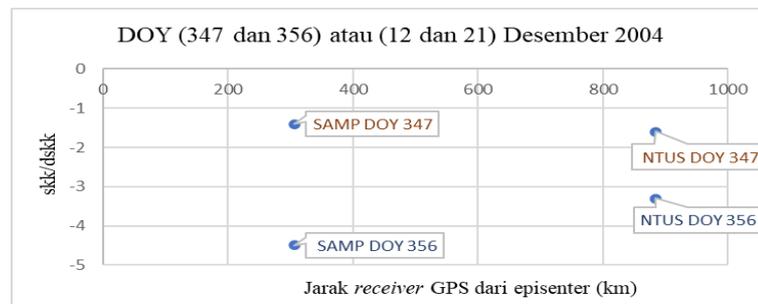
Setelah melakukan analisis secara spasial diketahui bahwa pada DOY 239 (27 Agustus 2007) nilai $skk/dskk$ semakin besar seiring dengan semakin jauhnya jarak stasiun ke episenter gempa (Gambar 9). Maka DOY 239 atau H-16 sebelum gempa merupakan prekursor gempa terdeteksi.



Gambar 9 Hasil analisis spasial pada gempa bermagnitudo M 8,4

3.2.4 Gempa M 9,1 Aceh – 26 Desember 2004

Dari hasil analisis skk/dskk diketahui bahwa terdapat 2 hari yang menunjukkan nilai skk/dskk kurang dari -1 yaitu DOY 347 dan DOY 356 (Gambar 10). Setelah dianalisis secara spasial, perubahan skk/dskk yang nilainya semakin besar ditunjukkan oleh DOY 356 atau H-5 sebelum gempa merupakan prekursor gempa bumi terdeteksi dan DOY 347 atau H-14 sebelum gempa bukan merupakan prekursor gempa terdeteksi.



Gambar 10 Hasil analisis spasial pada gempa magnitudo M 9,1

3.3 Perbandingan Hasil Penelitian Dengan Penelitian Terdahulu

Berdasarkan hasil penelitian Putra dkk., (2017) menunjukkan bahwa pada gempa M8.4 – Sumatera Selatan terdapat anomali TEC H-16 sebelum terjadinya gempa dan dianggap sebagai prekursor gempa. Hasil penelitian pada gempa tersebut memberikan hasil yang serupa dengan hasil penelitian yang telah dilakukan yaitu terdapat anomali TEC pada H-16 sebelum terjadinya gempa. Puspito dkk., (2007) melakukan penelitian anomali TEC pada gempa M9.1 Sumatera dan memperoleh hasil bahwa adanya anomali pada H-5 sebelum gempa. Hasil ini juga dikonfirmasi dalam penelitian ini yang menunjukkan bahwa adanya anomali TEC H-5 sebelum terjadinya gempa.

Tetapi sejauh ini belum ada satu teori yang bersifat unik yang dapat menjelaskan dengan baik kemunculan anomali TEC sebelum kejadian suatu gempa. Namun ada beberapa pendapat yang memberikan gambaran mengenai mekanisme fisis dari munculnya anomali TEC di ionosfer yang berkaitan dengan terjadinya gempa (Puspito dkk., 2017).

IV. KESIMPULAN

Adanya anomali di ionosfer ditandai dengan penurunan kandungan elektron di ionosfer beberapa hari menjelang terjadinya gempa bumi tidak berasosiasi dengan gangguan badai magnetik. Dari kelima gempa yang dianalisis terdapat 4 skala gempa yang menunjukkan adanya anomali TEC yaitu dari gempa dengan magnitudo 6 hingga 9, sedangkan gempa dengan magnitudo 5 tidak menunjukkan anomali TEC. Hal ini didukung melalui analisis spasial, dimana hanya terdapat satu atau dua hari pada masing-masing gempa yang merupakan prekursor gempa terdeteksi. Pola-pola anomali yang terdeteksi ini selanjutnya dapat dilengkapi dengan meninjau gempa-gempa yang lain sehingga dapat diekstrak pola serupa untuk proses klasifikasi dan prediksi gempa bumi.

DAFTAR PUSTAKA

- Liu, J.Y., Chen, Y.I., Chuo, Y.J., dan Tsai, H.F., 2001, Various of Ionospheric Total Electron Content During the Chi-chi Earthquake, *Geophysical Research Letter*, Vol. 28, hal. 1383-1386.
- Muslim, B., 2015, Pengujian Teknik Autokorelasi Untuk Mendeteksi Pengaruh Aktivitas Gempa Bumi Besar Pada Ionosfer, *Jurnal Sains Dirgantara*, Vol. 12, No. 2, Pusat Sains dan Antariksa Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional, hal. 87-102.
- Muslim, B., Effendi, J., Aldrian, E., Fakhrizal, Sunari, B., dan Angga, 2014, Pengembangan Sistem Monitoring Gelombang Ionosfer Terkait Gempa Bumi Menggunakan Data GPS (GPSIONOQUAKE), *Prosiding Seminar Nasional Sains Atmosfer dan Antariksa (SNSAA) 2014*, Bandung.
- Aminah, S., 2017, Bionanokomposit Film Berbasis PVA dan Nanoselulosa dari Serat Kenaf, *Jurnal Institut Pertanian Bogor*, Vol. 5, No. 2, hal 13-44.
- Pattisahasiswa, A., The, H., dan Furqon A., 2014, Pola Anomali Data Temporal Total Electron Content (TEC) Ionosfer yang Berhubungan dengan Dua Gempa Besar Terkini, *Prosiding Seminar Kontribusi Fisika 2014*, Bandung.
- Pulinets, S.A., 2004, Ionospheric Precursors of Earthquake, Recent Advances in Theory and Practical Applications, *TAO*, Vol. 15, No. 3.
- Puspito, N.T., Barus, P.A., dan Widarto, D.S., 2007, Anomali Total Electron Content (TEC) di Ionosfer Sumatra dan Hubungannya dengan Gempa Besa Aceh 26 Desember 2004, *Jurnal Geofisika 2007*, hal. 14-24.
- Putra, S.Y.S., Subakti, H., dan Muslim, B., 2017, Identifikasi Perubahan Total Electron Content Sebelum Gempabumi di Sumatra, *Prosiding Seminar Nasional Sains Antariksa*, Bandung.
- Rhoades, D.A., Buxton, R., Mueller, C., dan Gerstenberger, M.C., 2015, Ionospheric earthquake Precursors, *GNS Science Consultancy Report 2015* Vol. 6, 26p.