

STUDI ANOMALI FREKUENSI KRITIS (foF2) PADA LAPISAN IONOSFER DENGAN KEJADIAN GEMPA BUMI ($M_w \geq 5,5$) DI SEGMENT MENTAWAI PERIODE 2005-2015

STUDY ON CRITICAL FREQUENCY (foF2) ANOMALY AT IONOSPHERE LAYER ACCOCIATED WITH THE OCCURENCE OF EARTHQUAKES ($M_w \geq 5.5$) IN MENTAWAI SEGMENT, 2005-2015

Ashar Muda Lubis^{1*}, Mawaddah¹, Syafrijhon², Afrizal B², Halaudidin¹, Zainal Abidin²

¹Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Bengkulu,
Jl. WR. Supratman, Kadang Limun, Muara Bangkahulu, Bengkulu, 38371

²Lembaga Penerbangan dan Antariksa, BPAA, Kototabang, Kab. Agam

*Email korespondensi: asharm1@unib.ac.id

Naskah masuk: 05 September 2020 Naskah diperbaiki: 25 September 2021 Naskah diterima: 27 September 2021

ABSTRAK

Telah dilakukan kajian frekuensi kritis (foF2) lapisan F ionosfer untuk mencari anomali foF2 berhubungan dengan kejadian gempa bumi di segmen Mentawai Sumatera Barat sehingga dapat digunakan sebagai prekursor gempa bumi dalam orde harian. Data foF2 diperoleh dari stasiun Kototabang, Kabupaten Agam, Sumatra Barat dari hasil pengamatan ionosonda tipe *Frequency Modulation Continous Wave* (FMCW) dari tahun 2005-2015. Kemudian data aktivitas geomagnetik dan aktivitas matahari (*sunspot number*) untuk melihat pengaruhnya terhadap nilai foF2. Data gempa bumi ($M_w \geq 5,5$) sebanyak 37 kejadian di wilayah Mentawai yang berasal dari USGS digunakan untuk mengkaji anomali foF2 terhadap kejadian gempa bumi selama 14 hari sebelum gempa bumi terjadi. Untuk melihat ada atau tidaknya anomali foF2 yang signifikan, maka nilai standar deviasi harian (σ) terlebih dahulu dihitung dari nilai harian foF2. Pada saat yang sama nilai foF2 dibandingkan dengan aktivitas geomagnetik dan matahari. Bila nilai foF2 melebihi nilai rata-rata $\pm 2\sigma$ dan tidak berada di sekitar waktu terjadinya badai geomagnetik dan aktivitas matahari, maka nilai anomali foF2 berhubungan dengan kejadian gempa bumi. Hasil pengamatan secara umum memperlihatkan terdapat anomali foF2 pada selang 14 hari sebelum terjadinya gempa bumi. Kemunculan foF2 tersebut dapat diduga sebagai indikasi aktivitas *pre-seismic* dalam kerak bumi pada 37 kejadian gempa bumi di wilayah Mentawai, meskipun kadang-kadang aktivitas geomagnetik dan aktivitas matahari terlihat mempengaruhi anomali foF2. Oleh karena itu kedepan diperlukan kajian lanjutan untuk menguji korelasi antara anomali foF2 dan kejadian gempa bumi secara statistik.

Kata kunci: anomali foF2, prekursor, gempa bumi, aktivitas geomagnetik, aktivitas matahari

ABSTRACT

A critical frequency study (foF2) of the ionospheric F layer has been carried out to investigate foF2 anomalies related to earthquakes in the Mentawai segment, West Sumatra, so that it can be used as earthquake precursors in daily orders. The foF2 data were obtained from the Kototabang station, Agam Regency, West Sumatra observed by ionosonde Frequency Modulation Continuous Wave (FMCW) type during 2005-2015. The geomagnetic activity data and solar activity data (sunspot number) were used to see its effect on the foF2 values. Earthquake data ($M_w \geq 5.5$) of 37 events in the Mentawai region originating from the USGS were also used to study the foF2 anomalies within 14 days before the occurrence of earthquakes. To see whether or not the foF2 values had a significant anomaly, the daily standard deviation value (σ) of daily foF2 was firstly calculated. At the same time the values of foF2 were compared with the geomagnetic activity and solar activity. If the value of foF2 exceeds the average value $\pm 2\sigma$, and is not on around the time of geomagnetic storms and solar activity that had changed significantly, the it is assumed that observed foF2 value has an anomalies associated with the earthquakes. The results generally show that foF2 anomalies are found at interval of 14 days before the earthquake. The appearance of foF2 can be presumed as an indication of pre-seismic activities in the earth's crust associated with 37 earthquakes in the Mentawai region, although sometimes geomagnetic and solar activities appear to have an effect on foF2 anomaly. Therefore, further studies are needed to carry out to study the correlation between the foF2 anomaly and the occurrence of earthquakes statistically.

Keywords: foF2 anomalies, precursor, earthquake, geomagnetic activity, sunspot number.

1. Pendahuluan

Saat ini teknologi *Global Positioning System* (GPS) telah dapat digunakan untuk memperkirakan magnitude dan kawasan yang berpotensi terjadinya gempa bumi melalui pengamatan akumulasi *stress*. Seperti, Monaker *et al.* [1] berhasil memperkirakan kekuatan gempa bumi di Haiti dan di Jepang oleh Hashimoto *et al.* [2] dengan menggunakan data geodetik GPS. Namun demikian, untuk memperkirakan kapan waktu kejadian sebuah gempa bumi dalam jangka pendek (misalnya orde harian) masih sulit dilakukan. Usaha-usaha untuk memperkirakan kapan sebuah gempa bumi sudah dimulai dengan mengamati perubahan parameter-parameter fisika di lapisan ionosfer yang berhubungan dengan kejadian suatu gempa bumi. Salah satu usaha untuk memperkirakan kejadian dengan pengamatan tanda-tanda awal sebelum gempa bumi terjadi (prekursor).

Perubahan *stress* pada material dalam bumi akibat pergerakan lempeng tektonik akan mempengaruhi sifat magnetik, radioaktivitas, resistivitas, komposisi elektron, suhu, gas radon dan parameter fisika lainnya. Fenomena ini dikenal sebagai interaksi antara *Litosfer-Atmosfer-Ionosfer* atau yang sering disebut *LAI coupling*. *LAI coupling* menjelaskan bahwa rekahan kecil didalam bumi akibat adanya perubahan *stress* atau akumulasi strain dan gaya elektrokinetis menimbulkan emisi *electromagnetic* (EM) pada spektrum *Ultra Low Frequency* (ULF), emisi radon, konduktivitas dan emisi lainnya, sehingga lapisan ionosfer mengalami gangguan baik dari segi konsentrasi elektron, radiasi elektromagnetik dan frekuensi gelombang elektromagnetik.

Beberapa metode yang digunakan untuk mengkaji tanda-tanda sebelum terjadinya gempa bumi telah banyak dilakukan, diantaranya dengan menggunakan metode *seismogeological*, metode *seismicity statistic analysis*, metode *correlation analysis* dan metode *precursor* [3]. Semakin berkembangnya ilmu seismologi, teori-teori untuk prediksi (*forecast*) gempa bumi semakin banyak bermunculan. Teori-teori tersebut pada umumnya didapatkan dengan melakukan studi kasus terhadap gempa-gempa bumi besar yang pernah terjadi. Selama aktivitas seismik meningkat juga muncul perubahan medan listrik dan elektromagnetik akibat gesekan antar lempeng. Penetrasi medan listrik vertikal dan gelombang elektromagnetik ini menyebabkan perturbasi dan iregularitas di lapisan F di ionosfer [4]. Oleh karena itu pengamatan perubahan lapisan ionosfer dapat dijadikan melihat perubahan-perubahan ionosfer sebagai akibat aktivitas geomagnetik, aktivitas matahari maupun aktivitas tektonik. Perubahan ionosfer karena aktivitas-aktivitas tersebut yang berhubungan dengan frekuensi kritis lapisan F2

ionosfer (foF2) yang mempunyai nilai frekuensi 3-30 MHz dapat dijadikan sebagai parameter untuk melihat anomali baik itu yang berhubungan dengan aktivitas tektonik maupun non tektonik.

Lapisan ionosfer terdiri dari lapisan D, E, F1 dan F2. Lapisan ionosfer merupakan lapisan dalam sistem atmosfer bumi yang terionisasi oleh radiasi energi matahari. Ionosfer terletak pada ketinggian sekitar 50 km hingga 1000 km dari permukaan bumi dan mengandung partikel-partikel bermuatan. Lapisan D berada 50-90 km, lapisan E 90-113 km, lapisan F1 113-200 km dan lapisan F2 diatas 200 km. Pada siang hari, kadang-kadang teramati adanya lapisan E sporadis pada ketinggian lapisan E, sedangkan pada malam hari jumlah ion di lapisan D, E dan F1 sangat sedikit karena tidak adanya cahaya matahari sehingga hanya lapisan F2 yang dapat teramati, tetapi bukan tidak mungkin muncul lapisan E- sporadis pada malam hari. E-sporadis merupakan lapisan ionosfer yang muncul tiba-tiba dan dapat mengganggu komunikasi radio gelombang pendek. Keberadaan lapisan ini sangat penting dalam bidang komunikasi dan aplikasi teknologi yang menggunakan gelombang elektromagnetik, karena atmosfer mampu memantulkan gelombang pendek pada rentang frekuensi tertentu. Namun, lapisan ini juga dapat digunakan sebagai pengamatan terhadap gangguan/anomali di lapisan ionosfer sebelum terjadinya gempa bumi [3, 5, 6, 7, 8, 9].

Saat sekarang ini salah satu segmen/patahan yang sangat aktif di Indonesia dan diketahui sebagai daerah *seismic gap* untuk kawasan zona subduksi Sumatra adalah segmen Mentawai [10]. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk melihat prekursor gempa bumi melalui analisa anomali foF2 pada lapisan ionosfer sebelum kejadian gempa bumi di wilayah Mentawai Sumatra Barat selama kurun waktu 2005-2015. Penelitian tentang anomali foF2 yang berhubungan dengan gempa bumi telah berhasil di beberapa tempat [11, 12, 13]. Pada penelitian ini stasiun ionosonda Kototabang, Kabupaten Agam, Sumatera Barat digunakan untuk mengamati foF2 pada lapisan F yang berhubungan dengan kejadian gempa bumi pada segmen Mentawai, zona Subduksi Sumatra selama tahun 2005-2015.

2. Metode Penelitian

Pada penelitian ini data foF2 tahun 2005-2015 diperoleh dari ionogram menggunakan ionosonda *Frequency Modulation Continuous Wave* (FMCW) yang berada di Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer (BPAA), LAPAN Kototabang, Kabupaten Agam, Sumatera Barat. Untuk tiap satu kejadian gempa bumi, data foF2 dianalisis selama 14 hari sebelum terjadinya gempa bumi dengan menghitung nilai rata-rata dan nilai standar deviasi (σ). Bila nilai foF2 yang melewati nilai rata-rata $\pm$ dua kali standar

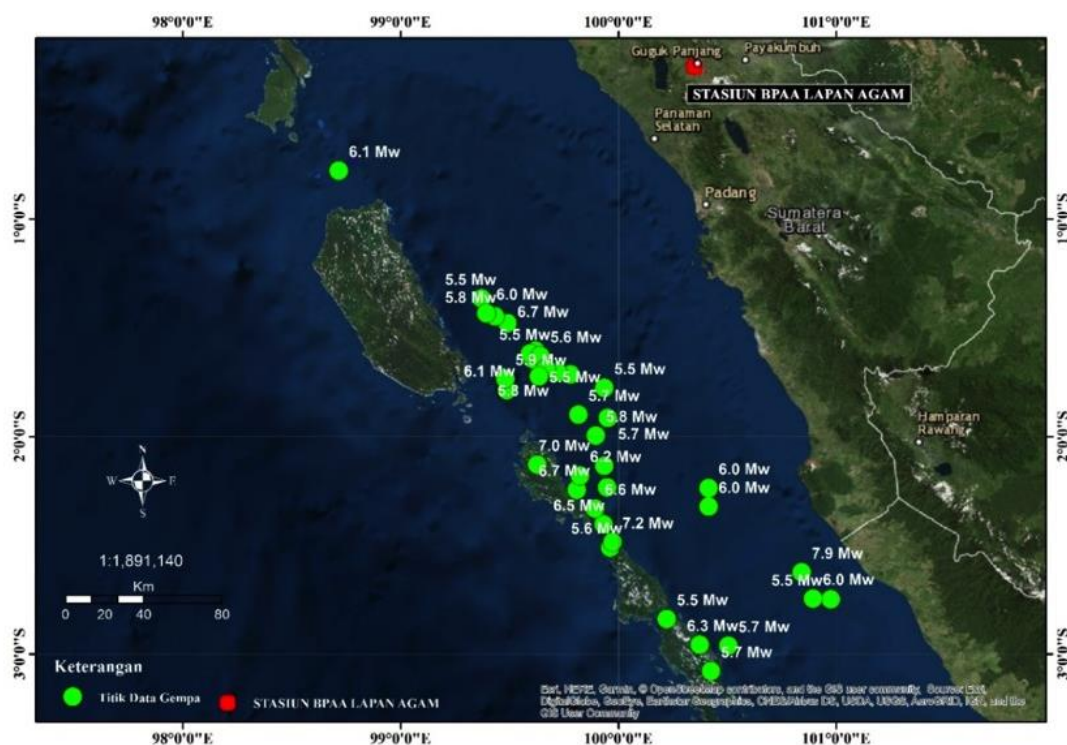
deviasi (2σ) dalam kurun waktu 14 hari sebelum kejadian gempa bumi tersebut, maka pada saat bersamaan muncul anomali foF2 [3] yang berhubungan dengan kejadian gempa bumi, aktivitas geomagnetik dan matahari. Karena anomali foF2 selain berasal dari aktivitas tektonik dalam bumi juga karena adanya gangguan aktivitas matahari dan aktivitas geomagnet. Untuk itu data indeks DST yang berasal dari global data geomagnetik dari Kyoto University melalui website <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> dan aktivitas matahari (*sunspot number*) yang didapatkan dari website <http://sidc.be/silso/daytothem?year> tahun 2005-2015 digunakan untuk memvalidasi apakah pada waktu pengamatan terdapat potensi anomali lain yang berasal dari aktivitas geomagnetik dan aktivitas matahari. Jika nilai anomali foF2 yang terjadi selama kurun waktu 14 hari sebelum kejadian gempa bumi tidak ditemukan peningkatan geomagnetik karena terjadinya badai geomagnetik dan peningkatan aktivitas matahari (*sunspot number*), maka nilai anomali foF2 tersebut dianggap berasal dari aktivitas tektonik dan dapat digunakan sebagai prekursor gempa bumi [15].

Data gempa bumi yang digunakan dalam penelitian ini sebanyak 37 kejadian gempa bumi 5 (Gambar 1, Lampiran 1). Data gempa bumi diperoleh dari katalog *The United States Geological Survey* [14] untuk tahun 2005-2015 di wilayah Mentawai Sumatera Barat dengan kekuatan $M_w \geq 5.9$ (Gambar 1)

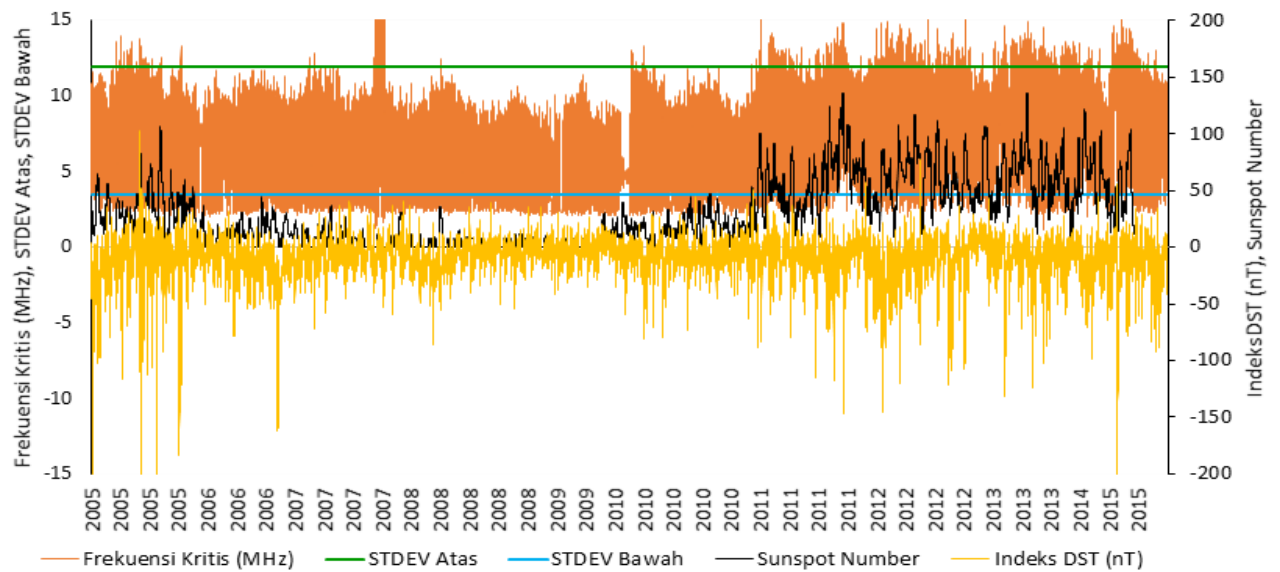
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengolahan nilai foF2 pada penelitian yang telah dilakukan selama kurun waktu 2005-2015 diperlihatkan pada Gambar 2. Secara umum dapat dilihat bahwa foF2 relatif bervariasi dari waktu ke waktu. Hal yang sama juga teramati pada nilai aktivitas matahari (*sunspot number*) dan indeks DST. Pada Gambar 2 juga dapat diperlihatkan nilai aktivitas geomagnet (DST) dan nilai aktivitas matahari (*sunspot number*) dalam kurun waktu 2011-2015.

Untuk menganalisa anomali foF2 terhadap kejadian gempa bumi maka dilakukan *zoom in* nilai foF2 untuk tiap kejadian gempa bumi yang dipilih ($M_w \geq 5.5$) selang 2005-2015 di segmen Mentawai Sumatera Barat. Gambar 3 merupakan hasil plot foF2, Indeks DST, *sunspot number* dengan standar deviasi frekuensi kritis (δfoF2) untuk gempa bumi di daerah Mentawai pada tanggal 10 April 2005. Kejadian gempa bumi dapat ditandai dengan tanda histogram/grafik yang diberi warna sesuai dengan kekuatan bumi buminya. Dapat dilihat bahwa pada gempa bumi pada tanggal 10 April 2005 terjadi sebanyak 5 kali gempa bumi dengan kekuatan M_w 5,5-6,7.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian Mentawai Sumatera Barat, titik-titik hijau letak episenter gempa bumi yang dianalisa dalam penelitian ini, sedangkan titik merah merupakan letak Stasiun BPAA LAPAN, Koto Tabang, Sumatera Barat.



Gambar 2. Hasil pengamatan frekuensi kritis (foF2), aktivitas geomagnet, aktivitas matahari dan foF2 selama 2005-2015.

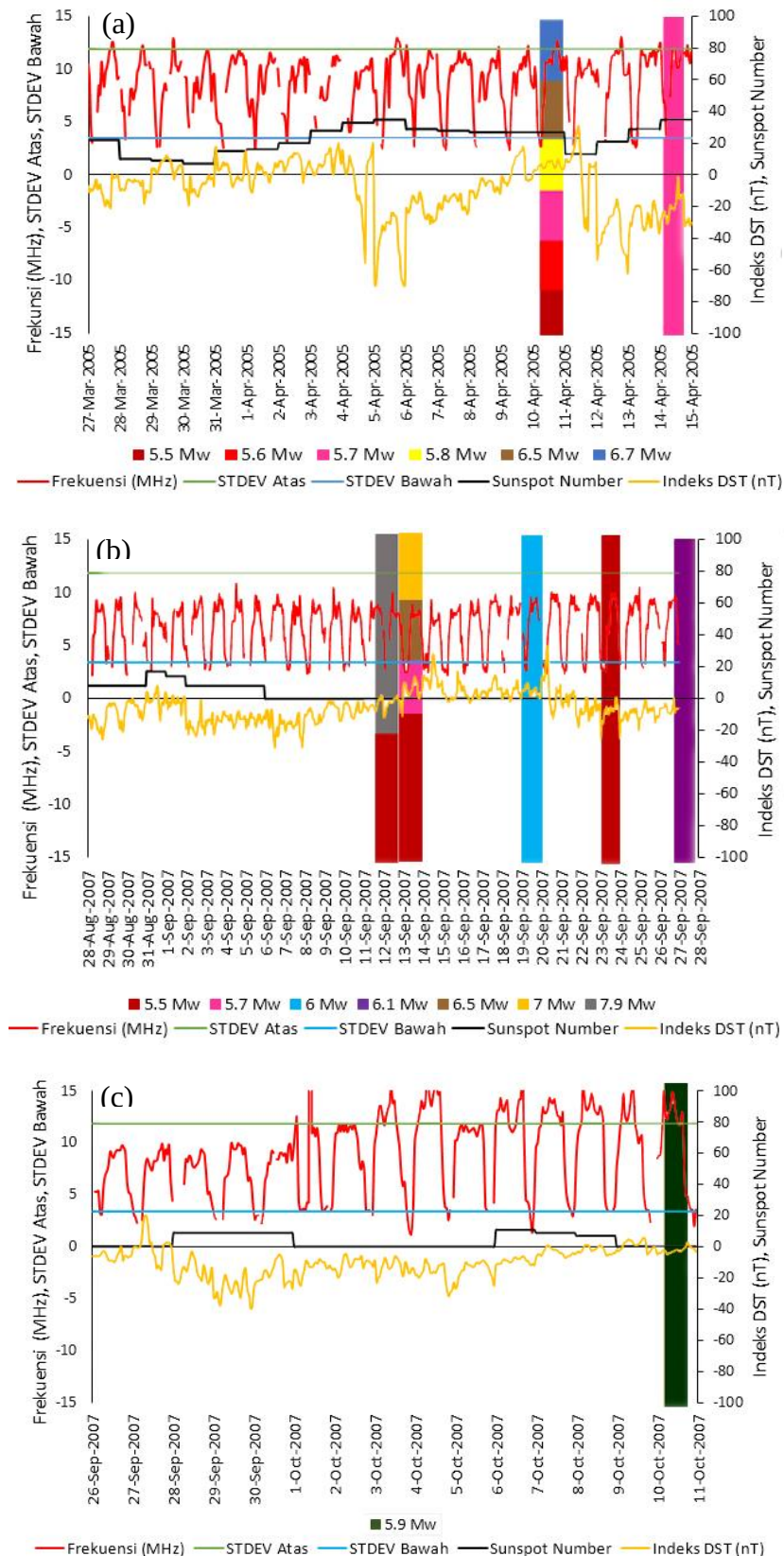
Pada Gambar 3a juga dapat dilihat adanya kenaikan foF2 hingga melebihi δfoF2 pada 14 hari sebelum terjadinya gempa bumi. Anomali foF2 pada tanggal 6 April 2005, namun data aktivitas geomagnet pada tanggal 6 April 2005 juga mengalami kenaikan. Oleh karena itu kenaikan foF2 tersebut kemungkinan dipengaruhi oleh aktivitas geomagnet mengingat pada waktu tersebut aktivitas matahari dalam keadaan normal yang ditandai melalui *sunspot number*. Selanjutnya pada tanggal 14 April 2005 gempa bumi terjadi dan foF2 mengalami kenaikan sampai 1 hari sebelum kejadian gempa bumi. Hal lain juga teramati 2 hari sebelum terjadinya gempa bumi. Pada waktu yang sama aktivitas geomagnet juga mengalami kenaikan, sehingga diduga bahwa kenaikan foF2 bisa disebabkan oleh aktivitas geomagnet.

Pada bulan September 2007 terjadi 5 kejadian gempa bumi dengan kekuatan yang berbeda seperti terlihat pada Gambar 3b. Gempa bumi di hari yang sama pada tanggal 12 September 2007 terjadi sebanyak dua kali gempa bumi, dengan hiposenter yang berdekatan, tapi kekuatannya berbeda yaitu Mw 5,5 dan Mw 7,9. FoF2 yang melebihi δfoF2 terjadi 14 hari sebelum terjadinya gempa bumi. Aktivitas matahari dan aktivitas geomagnet pada saat itu dalam keadaan normal ($> 20 \text{ nT}$, Gambar 3b). Kejadian gempa bumi pada tanggal 13 September 2007 merupakan gempa bumi *aftershock* dengan kekuatan Mw 5,5, 5,7, 6,5 dan 7,0 dan daerah pusat gempa bumi masih dalam daerah gempa bumi pada tanggal 12 September 2007. Oleh karena itu anomali foF2 yang muncul sebelum gempa-gempa *aftershock* tersebut (tanggal 13 September 2007) dan gempa bumi tanggal 12 September 2007 (Mw 7.9) itu bisa dikatakan berhubungan prekursor gempa bumi 12 September 2007.

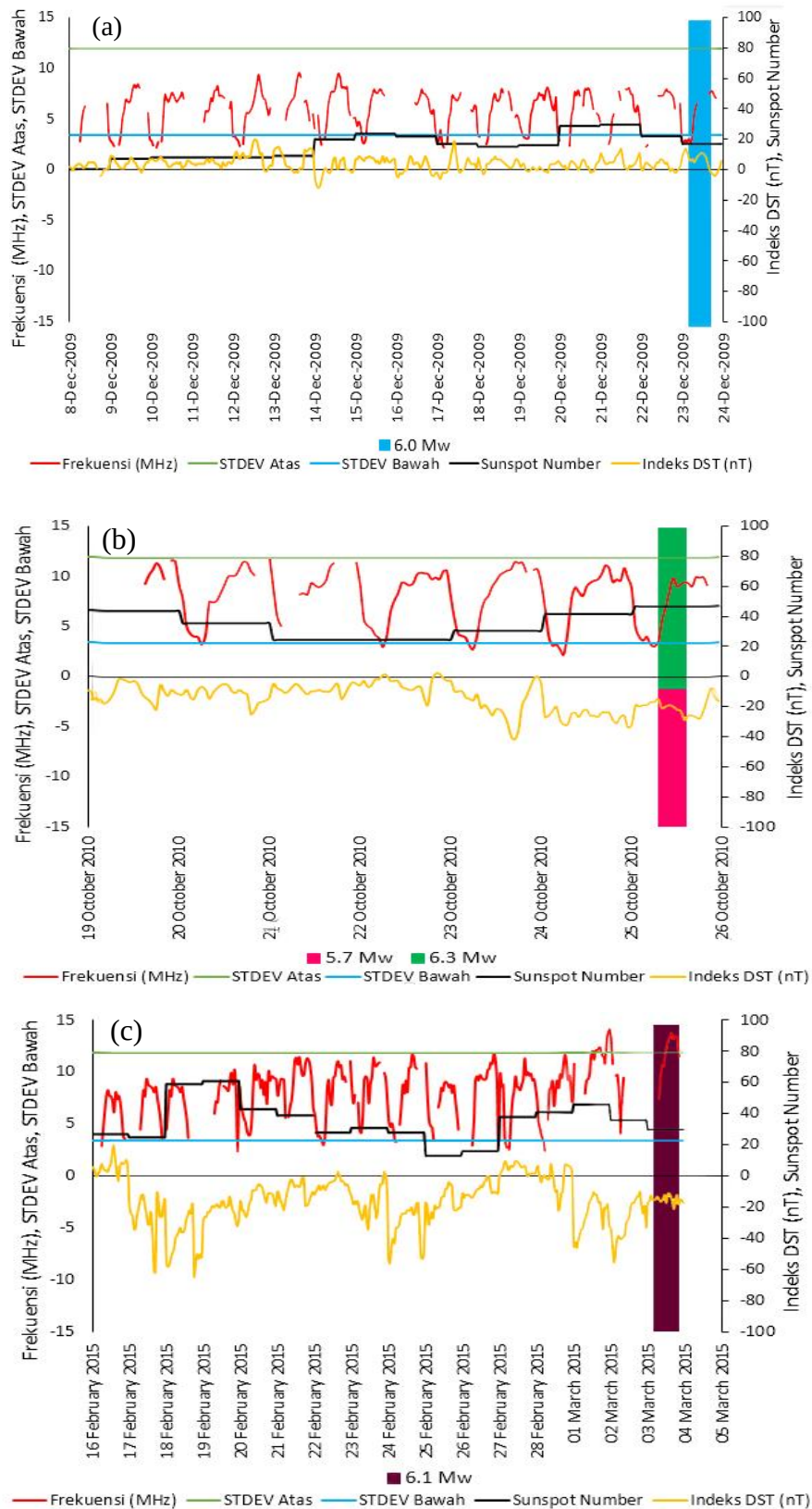
Pada gempa bumi pada tanggal 19 September 2007 kekuatan Mw 6,0 dapat dilihat anomali foF2 terjadi 5 hari sebelum kejadian gempa bumi (Gambar 3b). Sementara itu waktu yang sama aktivitas matahari dan aktivitas geomagnet dalam keadaan normal. Kemudian pada gempa bumi pada tanggal 23 September 2007 dengan kekuatan Mw 5,5 anomali foF2 terjadi 3 hari sebelum kejadian gempa bumi dengan aktivitas matahari dan aktivitas geomagnet dalam keadaan normal. Selanjutnya pada gempa bumi tanggal 26 September 2007 dengan kekuatan Mw 6,1 dapat dilihat bahwa anomali foF2 muncul 2 hari sebelum kejadian gempa bumi dimana aktivitas matahari dan geomagnet dalam keadaan normal.

Selanjutnya pada kejadian gempa bumi tanggal 10 Oktober 2007 dengan kekuatan Mw 5,9 dimana selama 14 hari sebelum terjadinya gempa bumi hasil pengamatan foF2 diperlihatkan pada Gambar 3c. Secara umum pada gempa bumi ini terlihat anomali foF2 secara jelas kecuali pada hari ke-5 dan ke-8 yang tidak terlihat secara jelas. Namun pada tanggal 26, 28, 29 dan 4 Oktober 2007 terjadi peningkatan aktivitas geomagnet yang melebihi δfoF2 . Kemungkinan foF2 dipengaruhi aktivitas geomagnet, karena pada saat itu aktivitas matahari dalam keadaan normal.

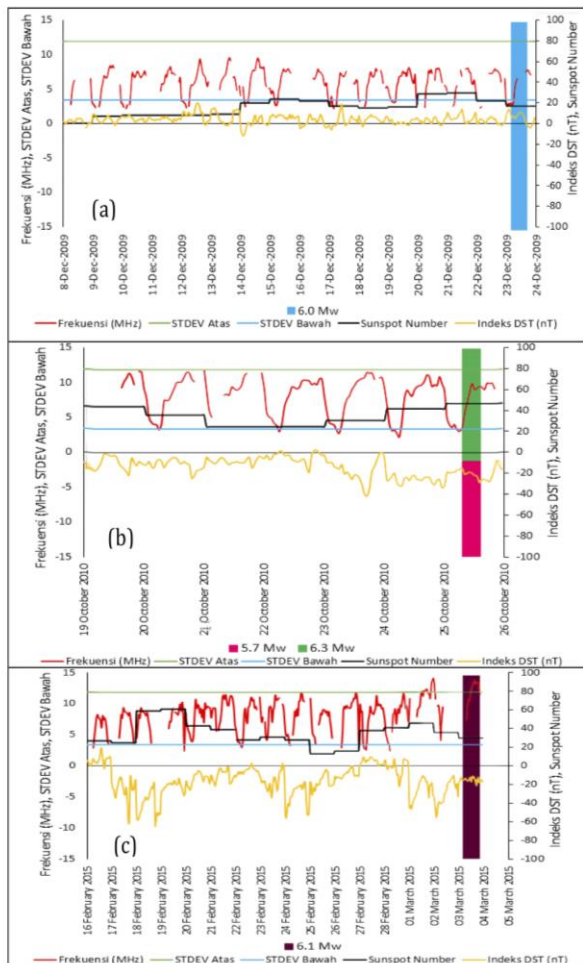
Pada gempa bumi tanggal 23 Oktober 2007 dengan kekuatan Mw 5,8 dapat diamati kemunculan foF2 tanggal 11, 12, 13, 14, 19, 20, 21 dan 22 Oktober 2007. Aktivitas geomagnet pada saat itu mengalami kenaikan dari hari yang lain seperti tanggal 12, 13, 14 Oktober 2007 (Gambar 4a). Kemudian pada tanggal 15 Oktober 2007 data foF2 tidak dapat teramati dikarenakan data tidak terekam oleh alat ionosonda. Kelihatan data foF2 pada hari-hari lain juga mungkin disebabkan oleh permasalahan pada alat ionosonda.



Gambar 3. Hasil pengamatan frekuensi kritis (f_oF_2), aktivitas geomagnet dan aktivitas matahari untuk gempa bumi, (a) tanggal 27 Maret-14 April 2005, (b) tanggal 28 Agustus-27 September 2007, dan (c) tanggal 26 September 2007-10 Oktober 2007. Anomali dapat dianggap bila melebihi batas atas dan batas bawah standar deviasi (STDEV).



Gambar 4. Hasil pengamatan frekuensi kritis (foF2), aktivitas geomagnet dan aktivitas matahari untuk gempa bumi, (a) tanggal 23 Oktober 2007, (b) tanggal 25 November 2007, dan (c) tanggal 21, 23, 24, 25 Februari dan 3 Maret 2008. Anomali dapat dianggap bila melebihi batas atas dan batas bawah standar deviasi (STDEV).



Gambar 5. Hasil pengamatan frekuensi kritis (foF2), aktivitas geomagnet dan aktivitas matahari untuk gempa bumi, (a) tanggal 23 Desember 2009, (b) tanggal 25 Oktober 2010 dan (c) tanggal 3 Maret 2015.

Anomali negatif foF2 yang berhubungan dengan gempa bumi pada tanggal 25 November 2007 dengan kekuatan Mw 6,0 dapat diamati pada tanggal 10,11,12,14,16,19,20,21,23 dan 24 November 2007 (Gambar 4b). Akan tetapi pada saat tanggal 19 dan 20 November 2007 aktivitas geomagnet juga mengalami peningkatan hari-hari biasanya. Selanjutnya selama 14 hari sebelum kejadian gempa bumi pada tanggal 21 Februari 2008 aktivitas matahari dan geomagnet dalam keadaan normal (Gambar 4c). Akan tetapi pada kejadian gempa bumi kemunculan anomali foF2 dapat diamati pada tanggal 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 dan 20 Februari 2008.

Pada gempa bumi pada tanggal 23 Februari 2008 terdapat anomali satu hari sebelum kejadian yakni pada tanggal 22 Februari 2008. Sementara itu pada tanggal 24 dan 25 Februari 2008 terjadi gempa bumi secara berturut-turut dengan jarak episenter yang berdekatan. Selanjutnya anomali foF2 pada tanggal 24 dan 25 Februari 2008 kemungkinan berhubungan

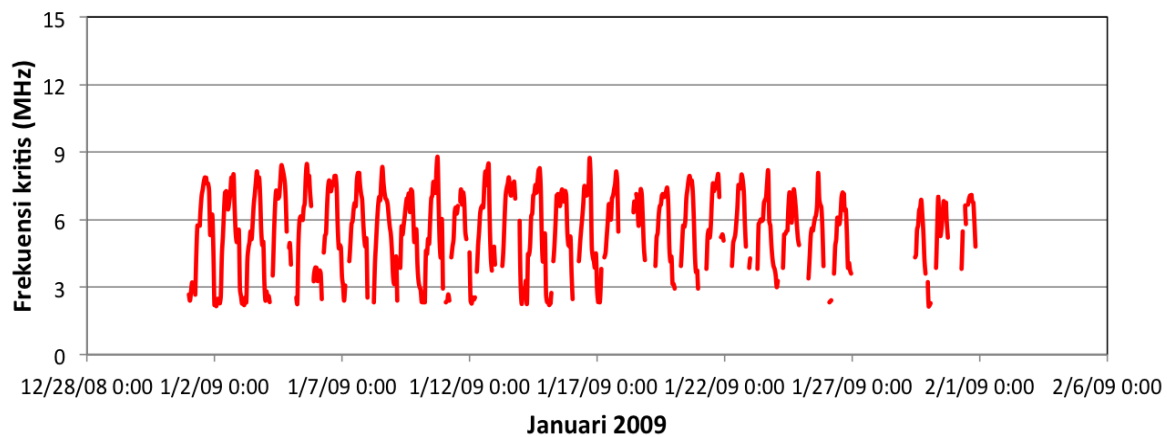
dengan gempa bumi pada tanggal 23 Februari 2008. Jika dilihat pada kejadian gempa bumi tanggal 3 Maret 2008 dengan kekuatan Mw 6,2 anomali foF2 dapat diamati pada tanggal 27, 28, 29 dan 30 Februari 2008 dimana pada waktu yang bersamaan aktivitas geomagnet kelihatan menurun dari hari biasanya, dilain pihak aktivitas matahari dalam keadaan normal.

Anomali foF2 yang berhubungan dengan gempa bumi pada tanggal 15 April 2009 dengan kekuatan Mw 5,7 dapat dilihat pada 14 hari sebelum kejadian gempa bumi (Lampiran 2). Pada tanggal 8 dan 9 April 2009 sebelum kejadian gempa bumi terlihat aktivitas geomagnet mengalami peningkatan dari hari sebelumnya. Disisi lain dapat dilihat bahwa pada tanggal 5 dan 6 Agustus 2009 sebelum kejadian gempa bumi terdapat aktivitas geomagnet meningkat dan menurun dari hari sebelumnya.

Kemudian pada tanggal 16 Agustus 2009 terdapat 2 kejadian gempa bumi dihari yang sama dengan kekuatan Mw 6,7 dan Mw 5,8. Kejadian gempa bumi ini berada pada satu event kejadian gempa bumi karena masih dalam lingkup hiposenter yang tidak jauh berbeda jaraknya dengan stasiun Koto Tabang. Secara umum anomali foF2 terjadi pada 14 hari sebelum kejadian gempa bumi, kecuali pada tanggal 2, 4, 11, 13 Agustus 2009 (Lampiran 2). Tiga hari setelah kejadian gempa bumi 16 Agustus 2009 terjadi kejadian gempa bumi lain yaitu pada tanggal 19 Agustus 2009 dengan kekuatan Mw 5,5. Pada gempa bumi tersebut ditemukan anomali foF2 sehari sebelum terjadinya gempa bumi. Anomali foF2 tersebut diduga berhubungan dengan kejadian gempa bumi pada tanggal 19 Agustus 2009. Hal ini dikarenakan pada saat itu aktivitas geomagnet dan matahari dalam keadaan normal.

Pada tanggal 23 Desember 2009 terjadi gempa bumi dengan kekuatan Mw 6,0. Pada kejadian gempa bumi tersebut dilihat anomali foF2 14 hari sebelum terjadinya gempa bumi (Gambar 5a). Pada tanggal 13 Desember 2009 sebelum kejadian gempa bumi terdapat aktivitas geomagnet menurun dari hari sebelumnya.

Kemudian pada tanggal 25 Oktober 2010 terdapat 2 kejadian gempa bumi dihari yang sama dengan kekuatan gempa bumi Mw 6,3 dan 5,7. Anomali foF2 terjadi tanggal 23 dan 24 Oktober 2010 (Gambar 5b). Selanjutnya pada kejadian gempa bumi 3 Maret 2015 dengan kekuatan Mw 6,1 ditemukan adanya anomali foF2 pada tanggal 16, 20, 23, 27, Februari dan 1 Maret 2015 (Gambar 5c). Namun pada tanggal 1 Maret 2015 kemunculan anomali foF2 sebelum kejadian gempa bumi tersebut terdapat aktivitas geomagnet yang menurun dari hari sebelumnya.



Gambar 6. Hasil pengamatan frekuensi kritis (foF2) pada bulan Januari 2009.

Pada Gambar 6 diperlihatkan nilai foF2 selama bulan Januari 2009 dimana pada periode ini tidak didapati gempa bumi yang signifikan terjadi ($M_w \geq 5,5$) di segment Mentawai Sumatera Barat. Hasil penelitian menunjukkan tidak ada anomali yang signifikan, hanya berfluktuasi antara pergantian siang dan malam karena aktivitas matahari.

Aktivitas seismik dapat mengakibatkan terjadinya gangguan terhadap foF2 lapisan ionosfer baik itu sebelum, sesaat dan setelah terjadinya gempa bumi [12] karena terjadinya perubahan stress sebelum gempa bumi yang menyebabkan adanya radiasi elektromagnetik ke lapisan ionosfer. Pada penelitian ini, terlihat ada perubahan foF2 pada lapisan ionosfer yang berhubungan dengan aktivitas matahari dan aktivitas geomagnet, namun sangat minim. Selain aktivitas matahari dan aktivitas geomagnet yang dapat mempengaruhi perubahan foF2 lapisan ionosfer sebelum terjadinya gempa bumi yaitu radius zona persiapan gempa bumi (*earthquake preparation zone*) (Lampiran 1).

Pada pandangan klasik untuk prediksi gempa bumi dalam jangka panjang (*long term forecast*) didasarkan pada siklus gempa bumi (seismik) dan perhitungan energi disimpan karena penumpukan regangan (*strain accumulation*) akibat pergerakan lempeng/patahan bumi secara periodik pada lapisan kerak bumi [4]. Proses yang seperti ini membawa pada suatu pemahaman bahwa pada kulit bumi akan terjadi perubahan sifat fisis (fisis) dan sifat kimiawi pada daerah tertentu yang dimana daerah ini disebut dengan zona daerah persiapan gempa bumi (*earthquake preparation zone*) [16]. Dengan demikian pada lokasi luas zona persiapan gempa bumi akan mengalami perubahan fisis dan kimiawi batuan sebelum gempa bumi dan dipancarkan sampai pada lapisan ionosfer [4, 17].

Pada penelitian ini kita dapat identifikasi mana anomali foF2 yang berasal dari pre-seismik (gempa

bumi) dan yang berasal dari aktivitas matahari maupun aktivitas geomagnet dengan mengamati *sunspot number* dan DST indeks, meskipun masih belum dapat diklasifikasi masing-masing kontribusinya terhadap anomali foF2 secara statistik, namun penelitian tentang kajian anomali foF2 yang berhubungan dengan kejadian gempa bumi juga terlihat di belahan dunia yang lain seperti di daerah Italia, India and China dimana anomali foF2 terdeteksi beberapa hari sebelum kejadian gempa bumi [11, 12, 13]. Hal ini dapat dimengerti karena beberapa kejadian gempa bumi selama 2005-2015 mempunyai jarak episenter gempa bumi ke ionosonda Kototabang yang berada dalam radius zona persiapan gempa bumi, maka secara teori lapisan ionosfer yang berada pada lokasi ionosonda di Kototabang juga mengalami perubahan fisis dan kimiawi yang diakibatkan peristiwa pra gempa bumi di segmen Mentawai. Bila luas zona persiapan gempa bumi dekat dengan stasiun pengamatan foF2, maka kemungkinan terlihatnya anomali yang berhubungan dengan gempa bumi dapat dilihat sebagai indikasi prekursor gempa bumi.

Seterusnya apabila jarak lokasi episenter gempa bumi ke lokasi Ionosonda di Kototabang tidak lebih dari luas zona persiapan gempa bumi, maka perubahan fisis dan kimiawi pada lapisan ionosfer yang berada di daerah antara Kototabang dengan episenter gempa bumi mungkin masih dapat direkam oleh stasiun ionosonda dan mungkin juga tidak bisa terdeteksi secara jelas. Dalam kasus seperti ini diperlukan analisa lanjutan. Disamping itu diperlukan juga kajian untuk menguji seberapa besar korelasi antara anomali foF2 dan kejadian gempa bumi secara statistik [18]. Mengingat rumitnya membedakan apakah anomali foF2 berhubungan dengan gempa bumi atau aktivitas matahari [19], maka kedepan juga diperlukan analisa analitik dalam memahami prekursor suatu gempa bumi untuk keperluan *short time* mitigasi bencana gempa bumi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa anomali foF2 lapisan ionosfer pada 37 kejadian gempa bumi Mentawai Sumatera Barat pada tahun 2005-2015 secara umum dapat diamati adanya anomali foF2 pada selang 14 hari sebelum terjadinya gempa bumi. Kemunculan foF2 tersebut dapat diduga sebagai indikasi adanya aktivitas *pre-seismic* dalam kulit bumi karena adanya perubahan stress yang menyebabkan terjadinya radiasi elektromagnetik dan dianggap sebagai prekursor gempa bumi meskipun kadang-kadang aktivitas geomagnet dan aktivitas matahari terlihat berpengaruh anomali foF2.

Minimnya gangguan aktivitas matahari maupun aktivitas geomagnet dengan mengamati *sunspot number* dan DST indek, dapat disimpulkan bahwa anomali foF2 berhubungan dengan aktivitas *pre-seismic* meskipun secara pada penelitian ini masih belum dapat untuk mengklasifikasi sumber anomali foF2 secara statistik. Fenomona yang mirip juga terdeteksi pada gempa bumi yang ada di belahan dunia lain, namun diperlukan kajian yang lebih detail untuk karakteristik foF2 sebagai prekursor gempa bumi. Kedepan juga diperlukan kajian statistik untuk menguji seberapa besar korelasi antara anomali foF2 dan kejadian gempa bumi termasuk luas zona persiapan gempa bumi dengan jarak stasiun pengamatan foF2 di wilayah Sumatera Barat.

Ucapan Terima Kasih. Penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada Lembaga Penerbangan dan Antariksa, BPAA, Kototabang, Kab. Agam, Sumatera Barat atas penyediaan data foF2 pada penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada reviewers dan Tim Redaksi Jurnal Meteorologi dan Geofisika atas masukannya untuk meningkatkan kualitas tulisan ini.

Daftar Pustaka

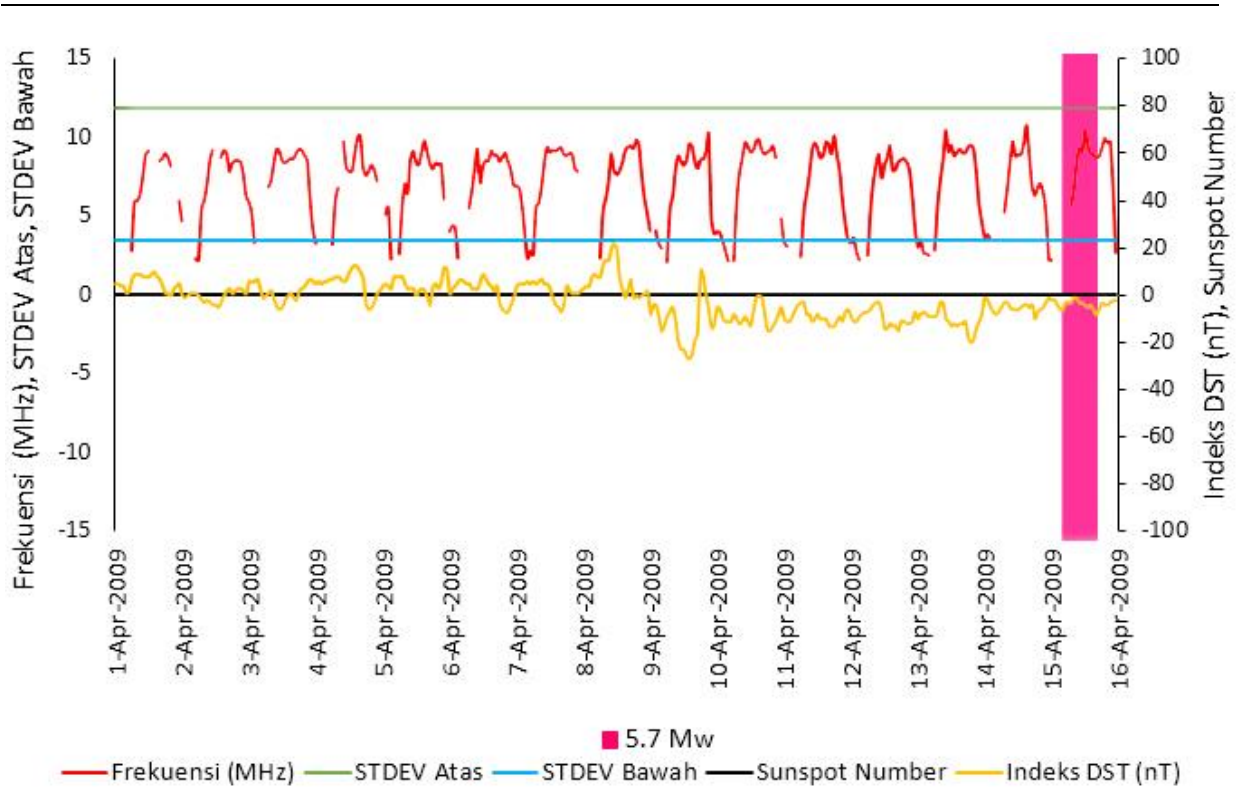
- [1] D. M. Manaker, E. Calais, A. M. Freed, S. T. Ali, P. Przybylski, G. Mattioli, P. Jansma, C. Prepetit, and J. B. de Cahbaliier, "Interseismic plate coupling and strain partitioning in the northeastern Caribbean," *Geophys. Jour. Int.*, vol. 174, pp. 889–903, 2008.
- [2] C. Hashimoto, A. Noda, T. Sagiya, and M. Matsu'ura, "Interplate seismic zones along the Kuril-Japan trench inferred from GPS data inversion," *Nature Geosci.*, vol. 2(2), pp. 141–144, 2009.
- [3] K. Hattori, ULF Electromagnetic Changes Possibly Associated with Crustal Activity. Proceeding: Electromagnetics in Seismic and Volcanic Areas. Bilateral Seminar Italy-Japan, July 25-27, 2007 Chiba Japan. Edited by Katsumi Hattori and Luciano Telesca: 41–56, 2007.
- [4] S. A. Pulnits, dan K. A. Boyarchuk, *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [5] K. Yumoto, S. Ikemoto, M.G. Cardinal, H. Hayakawa, K. Hattori, J.Y Liu, S. Saroso, M. Ruhimat, M. Husni, D.S. Widarto, E. Ramos, D. McNamara, R.E. Otadoy, G. Yumul, R. Ebor, dan N. Servdano, "A new ULF wave analysis for Seismo-Electromagnetics using CPMN/MAGDAS data," *Phys. and Chem. Earth.*, vol. 34, pp. 360–366, 2009.
- [6] K. Sharma, R. S. Dabas, S. Sarkar, R. M. Das, S. Ravindran, and A. K. Gwal, "Anomalous enhancement of ionospheric F2 layer critical frequency and total electron content over low latitudes before three recent major earthquakes in China," *J. Geophys. Res.*, vol. 115, A11313, 2010.
- [7] S. Pulnits, dan D. Ouzonov, "Litosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (LAIC) model a unified concept for earthquake precursors validation," *J. Asian Earth Sci.*, vol 41, pp 371–382, 2011.
- [8] S. Pulnits, and D. Davidenko, "Ionospheric precursors of earthquakes and global electric circuit," *Adv. Space Res.*, vol. 53(5), pp. 709–723, 2014.
- [9] A. K. Upadhayaya, S. Gupta, P. S. Brahmanandam, "F2 region response to geomagnetic disturbances across Indian latitudes: O(1S) dayglow emission," *J. Geophys. Res., Spa. Phys.*, vol. 121(3), pp. 2595–2620, 2016.
- [10] M. Chlieh, J.-P. Avouac, K. Sieh, D. H. Natawidjaja, and J. Galtzka., "Heterogeneous coupling of the Sumatran megathrust constrained by geodetic and paleogeodetic measurements," *J. Geophys. Res.*, vol. 113, B05305, 2008.
- [11] K. Sharma, R. M. Das, R. S. Dabas, K. G. M. Pillai, S. C. Garg, and A. K. Mishra, "Ionospheric precursors observed at low latitudes around the time of Koyna earthquake," *Adv. Space Res.*, vol. 42(7), pp. 1238–1245, 2008.
- [12] S. Gupta, and A. K. Upadhayaya, "Preearthquake anomalous ionospheric signatures observed at low-mid latitude Indian station, Delhi, during the year 2015 to early 2016: Preliminary results," *J. Geophys. Res., Spa. Phys.*, vol. 122(8), pp. 8694–8719, 2017.

- [13] L. Perrone, A. D. Santis, C. Abbattista, L. Alfonsi, L. Amoroso, M. Carbone, C. Cesaroni, G. Cianchini, G. D. Franceschi, A. D. Santis, R. D. Giovambattista, D. Marchetti, F. J. Pavón-Carrasco, A. Piscini, L. Spogli, and F. Santoro, "Ionospheric anomalies detected by ionosonde and possibly related to crustal earthquakes in Greece," *Ann. Geophys.*, vol. 36, pp. 361–371, 2018.
- [14] Earthquake catalog, *The United States Geological Survey*, <https://www.usgs.gov/> diakses 12 Oktober 2018.
- [15] S. Ahadi, Analysis of Patterns of Precursors of Strong Earthquakes in Sumatra 2007-2012 Period Based on the Emission of ULF (Ultra-Low-Frequency) Using Data Geomagnet. Dissertasion. Terrestrial Science Courses Bandung Institute of Technology. 2014
- [16] G. S. Tsolis, and T. D. Xenos, "Seismo-ionospheric coupling correlation analysis of earthquakes in Greece, using empirical mode decomposition," *Non. Pro. Geop.*, vol. 16(1), pp. 123–130, 2009.
- [17] G. S. Tsolis, and T. D. Xenos, "A qualitative study of the seismo-ionospheric precursors prior to the 6 April 2009 earthquake in L'Aquila, Italy," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 10(1), pp. 133–137, 2010.
- [18] H. Le, J. Y. Liu, and L. Liu, "A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 M6.0+ earthquakes during 2002–2010," *J. Geophys. Res.*, vol. 116, A02303, 2011.
- [19] T. Xu, J. Feng, J. Wu, S. C. Ge, and Y. L. Hu, "Gradual reduction in ionospheric F_2 region before the 2013 Lushan earthquake: Contributed to the forthcoming earthquake or solar activity?," *J. Geophys. Res., Spa. Phys.*, vol. 122, pp. 3500–3508, 2017.

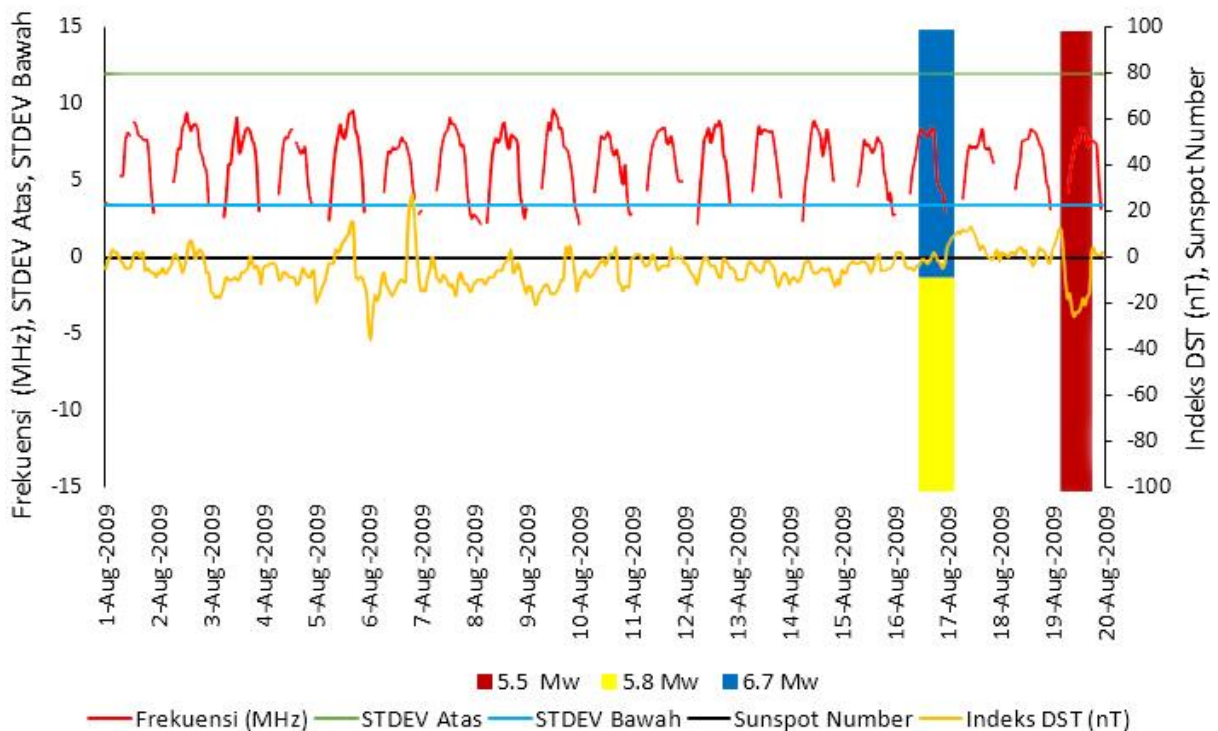
Lampiran 1: Data gempa bumi yang digunakan gunakam pada penelitian ini untuk menganalisa anomali foF2.

Waktu (UTC), Tanggal, Waktu	Lat (°)	Lon (°)	Mw	Kedalaman (m)	Hiposenter (km)	Episenter (km)	Radius (km)
10/04/2005 10:29:11	-1,644	99,607	6,7	19	219,68	218,85	651,62
10/04/2005 10:45:49	-1,606	99,618	5,7	30	216,56	214,47	247,74
10/04/2005 11:14:19	-1,714	99,779	6,5	30	222,41	220,38	537,03
10/04/2005 11:45:02	-1,619	99,594	5,5	30	218,84	216,77	204,17
10/04/2005 11:55:30	-1,705	99,720	5,8	29	223,18	221,23	272,89
10/04/2005 13:39:47	-1,630	99,641	5,6	23	217,36	216,09	224,90
10/04/2005 13:54:16	-1,777	99,934	5,5	32	225,68	223,37	204,17
14/04/2005 11:29:52	-1,915	99,951	5,7	33,	240,48	238,15	247,74
12/09/2007 11:40:01	-2,840	100,221	5,5	35	339,66	337,85	537,03
12/09/2007 23:49:03	-2,625	100,841	7,9	35	321,47	319,56	870,96
13/09/2007 01:26:34	-1,900	99,816	5,7	17	240,00	239,42	247,74
13/09/2007 02:30:03	-1,689	99,668	6,5	29	223,18	221,30	537,03
13/09/2007 03:35:28	-2,130	99,627	7,0	22	270,34	269,44	870,96
13/09/2007 05:23:23	-1,724	99,635	5,5	32	228,47	226,16	204,17
13/09/2007 13:10:14	-2,749	100,974	5,5	17	336,52	336,08	204,17
13/09/2007 16:59:24	-2,234	99,947	5,5	30	274,92	273,24	204,17
19/09/2007 07:27:50	-2,746	100,892	6,0	35	335,67	333,84	331,13
23/09/2007 14:13:43	-2,135	99,935	5,5	28	264,10	262,56	204,17
26/09/2007 15:43:01	-1,787	99,488	6,1	26	239,89	238,47	364,75
10/10/2007 00:19:16	-1,735	99,480	5,9	27	235,07	233,48	300,60
23/10/2007 19:56:47	-1,996	99,896	5,8	30	249,87	248,07	272,89
25/11/2007 17:41:38	-2,238	100,413	6,0	35	273,40	271,15	331,13
21/02/2008 23:55:36	-2,323	100,413	6,0	35	282,76	280,58	331,13
23/02/2008 07:17:11	-2,511	99,962	5,6	33	305,30	303,52	224,90
24/02/2008 14:46:21	-2,405	99,931	6,5	22	293,13	292,30	537,03
25/02/2008 08:36:33	-2,486	99,972	7,2	25	301,66	300,63	1056,81
25/02/2008 18:06:03	-2,332	99,891	6,6	25	286,04	284,95	591,56
25/02/2008 21:02:18	-2,245	99,808	6,7	25	278,21	277,08	651,62
03/03/2008 02:37:27	-2,180	99,823	6,2	25	270,83	269,67	401,79
15/04/2009 17:47:27	-3,079	100,424	5,7	19	365,05	364,55	247,74
16/08/2009 07:38:21	-1,479	99,490	6,7	20	208,07	207,10	651,62
16/08/2009 12:49:00	-1,448	99,433	5,8	21	207,94	206,88	272,89
19/08/2009 02:55:08	-1,366	99,371	5,5	10	202,54	202,29	204,17
23/12/2009 01:11:58	-1,434	99,393	6,0	19	208,49	207,62	331,13
25/10/2010 19:37:31	-2,958	100,372	6,3	26	351,90	350,94	342,58
25/10/2010 19:39:27	-2,963	100,504	5,7	32	353,57	352,13	247,74
03/03/2015 10:37:30	-0,778	98,716	6,1	28	208,71	206,82	364,75

Lampiran 2: Time series foF2., indeks DST, sunspot *number* untuk gempa bumi 15 April 2009, untuk gempa bumi 16 dan 19 Agustus 2009.



Time series foF2, indeks DST, sunspot *number* untuk gempa bumi 15 April 2009.



Time series foF2 indeks DST, *sunspot number* untuk gempa bumi 16 dan 19 Agustus 2009.