

PENGUJIAN TEKNIK KORELASI UNTUK DETEKSI PENGARUH AKTIVITAS GEMPA BUMI BESAR PADA IONOSFER [EXAMINATION OF CORRELATION TECHNIQUE FOR DETECTING THE INFLUENCE OF GREAT EARTHQUAKE ACTIVITIES ON IONOSPHERE]

Buldan Muslim

Pusat Sains Antariksa

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Dr. Djundjuna 133 Bandung 40173 Indonesia

e-mail: mbuldan@gmail.com

Diterima 2 Februari 2015; Direvisi 13 Februari 2015; Disetujui 16 Maret 2015

ABSTRACT

Correlation technique has been used to study earthquake activities effect on the ionosphere, but it is still limited in some cases because of limited ionospheric data and great earthquake occurrences. The technique has not been tested by using ionospheric data with wider spatial coverage and has not yet used ionosphere anomaly threshold value. The ionospheric data from the nearest to the great earthquake epicenters are obtained from Global Ionosphere Maps (GIM). By assumption that the great earthquakes (magnitude ≥ 8 SR) can cause ionospheric anomalies, the correlation technique with the threshold value of ionospheric anomaly has been tested for detecting the great earthquakes effect on the ionosphere. The testing shows that by using the correlation technique, mostly the great earthquake precursors can be detected, and most of the great earthquake effects on the ionosphere can not be detected. The detection of the great earthquake precursors by using the correlation technique is only effective if no moderate or more strong geomagnetic storms. Therefore, the application of the correlation techniques for detecting the great earthquake effect on the ionosphere needs to be supported with geomagnetic activity, geophysical and atmospheric data if it will be used to support earthquake early warning system.

Keywords: *Earthquake, Ionosphere, Correlation, Detection.*

ABSTRAK

Teknik korelasi telah digunakan untuk penelitian deteksi pengaruh aktivitas gempa bumi dari data ionosfer, tetapi penelitian tersebut masih terbatas pada beberapa kasus karena keterbatasan data ionosfer dan kejadian gempa bumi besar. Teknik korelasi belum diuji menggunakan data ionosfer yang lebih luas cakupan spasialnya dan belum menerapkan nilai ambang batas anomali ionosfer. Data ionosfer di atas lokasi terdekat dengan episenter gempa bumi diperoleh dari *Global Ionosphere Maps* (GIM). Dengan asumsi gempa bumi besar dengan kekuatan ≥ 8 SR dapat menimbulkan anomali di ionosfer, teknik korelasi dengan penerapan nilai ambang batas anomali ionosfer telah diuji untuk deteksi pengaruh gempa bumi pada ionosfer. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mayoritas besar gempa bumi besar tersebut dapat diketahui prekursorinya, dan sebagian besar efek gempa bumi tidak dapat dideteksi dari anomali ionosfer. Deteksi prekursor dan efek gempa bumi besar pada ionosfer hanya efektif jika sebelum atau sesudah gempa bumi tidak terjadi badai geomagnet moderat atau lebih kuat. Oleh karena itu penerapan teknik korelasi untuk deteksi pengaruh gempa bumi besar pada ionosfer perlu didukung dengan data aktivitas geomagnet, data geofisika dan atmosfer lainnya jika akan digunakan untuk mendukung sistem peringatan dini gempa bumi besar.

Kata kunci: *Gempa bumi, Ionosfer, Korelasi, Deteksi.*

1 PENDAHULUAN

Pada 1969, seismolog dari *The Union Soviet Socialist Republic* (USSR) telah melaporkan adanya perubahan kecepatan seismik sebelum gempa bumi yang terjadi di dekat Garm. Diikuti dengan beberapa laporan ditemukannya beberapa perubahan seismik sebelum gempa bumi di daerah Amerika Serikat (Mjachkin *et al.*, 1975). Sejak itu pengujian perubahan seismik sebelum gempa bumi semakin intensif dilakukan sehingga telah dikembangkan teori dilatasi dari deformasi kerak bumi yang disebut retakan dan pembentukan patahan utama yang kemudian disebut dengan daerah persiapan gempa bumi (Scholz *et al.*, 1973; Mjachkin *et al.*, 1975). Di daerah persiapan gempa yang luasnya sebanding dengan besar gempa bumi dapat terjadi anomali-anomali sebelum gempa yang disebut dengan prekursor gempa bumi. Prekursor gempa bumi telah diamati dari beberapa parameter seperti keluarnya gas radon yang berlebihan, peningkatan gas CO₂, munculnya beberapa unsur-unsur metal seperti Hg, As dan Sb. Aerosol metal tersebut mudah terionisasi sehingga dapat menimbulkan anomali medan listrik di udara dekat permukaan bumi. Anomali medan listrik tersebut dapat menimbulkan anomali variasi ionosfer di daerah persiapan gempa bumi (Pulinets dan Boyarchuk, 2004).

Gempa bumi yang dapat menimbulkan kerusakan bangunan dan korban jiwa memiliki kekuatan di atas 6,0 SR yang dikelompokkan dalam gempa bumi kuat. Anomali kerapatan elektron lapisan F ionosfer beberapa hari sebelum gempa bumi di atas 6,0 SR telah dilaporkan (Pulinets *et al.*, 1994; Pulinets, 1998; Liu *et al.*, 2001). Liu *et al.*, (2002) telah menganalisis frekuensi plasma ionosfer (atau kerapatan elektron) hasil pengamatan ionosonda dan ternyata mendapatkan bahwa frekuensi kritis lapisan F (foF2) secara signifikan berkurang beberapa hari sebelum gempa bumi untuk sebagian besar kasus gempa bumi yang lebih kuat atau sama dengan 6 SR yang terjadi di Taiwan antara 1994-1999.

Selain dari data ionosonda, prekursor gempa bumi juga diamati dari data *Total Electron Content* (TEC) yang diturunkan dari data GPS (Liu *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2004). Liu *et al.*, (2004) telah menggunakan nilai median TEC selama 15 hari sebelum gempa bumi dan nilai kuartil atas dan bawah sebagai batas kondisi ionosfer normal. Jika nilai TEC berada di atas atau di bawah nilai kuartil tersebut maka Liu *et al.*, (2004) menyatakan ionosfer dalam kondisi anomali dengan tingkat kepercayaan 80-85 %.

Selain itu teknik korelasi telah digunakan untuk mendeteksi anomali ionosfer lokal yang bersumber dari prekursor gempa bumi. Pulinets dan Boyarchuk (2004) menggunakan dua stasiun GPS untuk mendeteksi prekursor gempa bumi dari data TEC. Satu stasiun GPS yang terletak di dekat pusat gempa bumi yang terjadi di San Simeon, California pada 22 Desember 2003, digunakan sebagai sensor anomali ionosfer sebelum gempa bumi. Sementara stasiun GPS yang jauh dari episenter gempa bumi digunakan sebagai kontrol yang ionosfernya dianggap tidak terpengaruh gempa bumi. Dengan konstruksi dua stasiun GPS tersebut jika terjadi anomali di stasiun sensor dan tidak terjadi di stasiun kontrol maka nilai korelasinya akan rendah. Sebaliknya jika tidak terjadi gangguan di salah satu stasiun GPS maka nilai korelasinya tetap tinggi. Jika terjadi gangguan di dua stasiun GPS tersebut yang disebabkan oleh badai geomagnet maka nilai korelasi variasi TEC antara dua lokasi tersebut juga tetap tinggi. Tetap tingginya korelasi ionosfer di dua lokasi pada saat badai geomagnet disebabkan oleh sifat gangguan ionosfer yang global karena kejadian badai geomagnet yang bersifat global. Gwal *et al.*, (2012) menggunakan dua ionosonda untuk pemunculan prekursor gempa bumi di Athens pada 8 Januari 2006 dan mendapatkan bahwa teknik korelasi silang variasi diurnal kerapatan elektron maksimum (NmF2) berhasil mengidentifikasi prekursor gempa bumi dua hari sebelum kejadiannya.

Cara lain untuk mendeteksi anomali ionosfer sebelum gempa bumi adalah

dengan autokorelasi yang sudah disinggung oleh Pulinets dan Boyarchuk (2004) tetapi belum dikaji lebih lanjut karena (Pulinets *et al.*, 2004; Gwal *et al.*, 2012) lebih fokus pada teknik korelasi silang daripada teknik autokorelasi. Jika teknik korelasi silang mungkin lebih cocok diterapkan untuk daerah lintang menengah, yang mungkin tidak sesuai untuk ionosfer di atas Indonesia, karena variabilitas spasial ionosfer di Indonesia lebih besar dibandingkan dengan daerah lintang menengah. Oleh karena itu teknik autokorelasi perlu diuji untuk wilayah Indonesia dan perlu dikembangkan agar dapat digunakan untuk mendeteksi pengaruh gempa bumi pada ionosfer.

Di samping mendeteksi prekursor gempa bumi di ionosfer, efek gempa bumi pada ionosfer pada saat gempa dan satu hari sampai dua hari sesudahnya juga telah dapat dideteksi dari data TEC ionosfer. Dampak gempa bumi terhadap ionosfer adalah terjadinya gangguan ionosfer 1 - 2 hari setelah gempa sebagaimana telah diteliti untuk kejadian gempa 8 Januari dan 5 Mei 2007 di India (Singh *et al.*, 2010).

Saat ini telah tersedia data TEC dari jaringan pengamatan GPS global dalam bentuk peta TEC dari *Global Ionosphere Maps* (GIM) yang dapat diakses bebas dan *real time*. Tetapi data TEC dari GIM tersebut belum digunakan untuk pengujian teknik korelasi untuk penentuan prekursor dan efek gempa bumi. Makalah ini memaparkan hasil pengujian teknik korelasi yang telah dikembangkan untuk deteksi pengaruh aktivitas gempa bumi pada ionosfer dari GIM. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat keberhasilan teknik korelasi dalam mendeteksi efek gempa bumi pada ionosfer baik sebelum gempa (prekursor) maupun sesudahnya (efek gempa) dan rekomendasi pemanfaatannya.

2 DATA DAN METODOLOGI

Gempa bumi dengan kekuatan di atas 6,0 SR masih dapat dikelompokkan menjadi tiga kelas yaitu gempa bumi kuat (6,0 SR - 6,9 SR), gempa bumi mayor (7,0 SR - 7,9 SR) dan gempa bumi besar dengan ukuran lebih besar atau sama dengan 8,0 SR (Pulinets dan Boyarchuk, 2004). Penulis hanya menggunakan data ionosfer saat terjadi gempa bumi besar dengan alasan bahwa dalam pengujian teknik korelasi ini digunakan asumsi bahwa semua gempa bumi besar ($\geq 8,0$ SR) berpengaruh terhadap lapisan ionosfer sehingga menimbulkan gangguan di ionosfer baik sebelum maupun sesudahnya. Maka data gempa bumi ≥ 6 SR tidak semua digunakan dalam penelitian ini karena asumsi semua gempa bumi $\geq 6,0$ SR berpengaruh pada ionosfer tidak sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan hanya sebagian besar (bukan semuanya) gempa bumi $\geq 6,0$ SR dapat memunculkan prekursor di ionosfer. Alasan lain hanya digunakan data gempa bumi besar ($\geq 8,0$ SR) adalah bahwa gempa bumi besar tersebut secara total dapat menimbulkan kerusakan yang fatal dan korban meninggal sampai ratusan ribu yang tergantung pada kepadatan populasi di daerah sekitar episenter gempa bumi.

Gangguan ionosfer juga dapat disebabkan oleh badai geomagnet. Maka dari itu untuk penentuan penyebab anomali ionosfer yang disebabkan oleh gempa bumi atau badai geomagnet, selain data ionosfer juga diperlukan data indeks Dst untuk gempa bumi di daerah lintang rendah dan ekuator, dan indeks Ap untuk gempa bumi yang terjadi di lintang menengah dan tinggi. Data ionosfer yang digunakan dalam penelitian ini adalah TEC dari peta ionosfer GIM yang bisa diunduh dari <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE>, yang beresolusi spasial $2,5^\circ$ arah lintang dan 5° arah bujur, dan beresolusi temporal 2 jam. Peta TEC ini diturunkan dari data GPS yang tersebar di seluruh dunia baik di lintang tinggi, menengah, rendah maupun ekuator. Adapun data indeks Kp diperoleh dari <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov> dan indeks Dst diunduh dari <http://wdc.kugi>.

kyoto-u.ac.jp.

Data gempa bumi besar dapat diambil dari *United States Geological Services* (USGS) dan ditampilkan pada Tabel 2-1. Karena data TEC tersedia dan bertepatan dengan gempa bumi besar terjadi mulai 2000 maka hanya data gempa bumi sejak 2000 yang ditampilkan, walaupun data TEC GIM telah tersedia sekitar 1996. Pada Tabel 2-1 tersebut kolom pertama adalah waktu kejadian gempa bumi, kolom kedua dan ketiga adalah lintang dan bujur episenter gempa bumi, kolom keempat adalah kekuatan gempa dalam SR dan kolom kelima adalah jumlah korban serta kolom terakhir adalah lokasi gempa. Ada 17 gempa bumi besar yang terjadi tetapi ada satu gempa bumi terjadi pada waktu yang sama dengan episenter yang tidak jauh berbeda sehingga penulis menganggap kejadian gempa bumi 11 April 2012 sebagai satu kejadian gempa bumi.

Data TEC terdekat dengan episenter gempa bumi telah digunakan untuk mendeteksi pengaruh aktivitas gempa bumi pada lapisan ionosfer. Data TEC tersebut dipilih 15 hari sebelum dan sesudah gempa bumi dan pada saat gempa terjadi sehingga terdapat 31 hari data TEC untuk setiap kejadian gempa bumi.

Tabel 2-1: GEMPA BUMI BESAR \geq 8 SR SEJAK 2000 ([http:// earthquake. usgs. gov/ earthquakes/ eqarchives/year/mag8/magnitude8_1900_date.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/year/mag8/magnitude8_1900_date.php), Akses 14 Juli 2014)

Waktu Gempa	Lintang	Bujur	Lintang Magnetik	Skala Richter	Jumlah korban	Lokasi
16/11/2000	-3,980	152,169	11,48	8,0	2	<u>Papua New Guinea</u>
23/06/2001	-16,264	-73,641	-5,48	8,4	75	<u>Peru</u>
25/09/2003	41,815	143,910	33,19	8,3		<u>Hokkaido, Jepang</u>
23/12/2004	-49,312	161,345	-54,26	8,1		<u>Pulau Macquarie</u>
26/12/2004	3,295	95,982	-7,00	9,1	227898	Sumatera Utara
28/03/2005	2,074	97,013	-8,00	8,6	1313	<u>Sumatera Utara</u>
03/05/2006	-20,187	-174,123	-21,70	8,0		<u>Tonga</u>
15/11/2006	46,592	153,226	38,75	8,3		Kepulauan Kuril
13/01/2007 04:23:21	46,243	154,524	38,55	8,1		<u>Bagian Timur Kepulauan Kuril</u>
01/04/2007 20:39:58	-8,466	157,043	-15,00	8,1	34	Kepulauan Solomon
15/08/2007 23:40:57	-13,386	-76,603	-3,03	8,0	650	<u>Utara Pantai Tengah</u>
12/09/2007 11:10:26	-4,438	101,367	-14,55	8,5	25	<u>Sumatera Selatan</u>
29/09/2009 17:48:10	-15,489	-172,095	-16,72	8,1	192	<u>Kepulauan Samoa</u>
27/02/2010 06:34:14	-35,846	-72,719	-25,47	8,8	577	<u>Chile</u>
11/03/2011 05:46:23	38,322	142,369	29,80	9,0	28050	<u>Honshu, Jepang</u>
11/04/2012 08:38:37	2,311	93,063	7,58	8,6		<u>Sumatera Utara</u>

11/04/2012
10:43:09

0,773

92,452

8.73

8,2

Sumatera Utara

Data TEC GIM memiliki resolusi waktu dua jam mulai pukul 00:00 sampai 22:00 UT. Rata-rata TEC dihitung pada jam tertentu selama 31 hari sehingga diperoleh variasi diurnal rata-rata bulanan TEC. Analisis korelasi dilakukan antara variasi diurnal TEC pada hari tertentu untuk 31 hari dengan variasi diurnal rata-rata bulanan TEC yang menghasilkan 31 koefisien korelasi. Dengan teknik korelasi antara variasi diurnal TEC pada hari tertentu dengan variasi diurnal nilai rata-rata tiap jam selama sekitar satu bulan, maka anomali variasi diurnal TEC dapat dideteksi. Anomali variasi diurnal ionosfer tersebut dapat disebabkan oleh anomali medan listrik sebelum gempa bumi atau badai geomagnet. Anomali variasi diurnal TEC ionosfer dengan periode beberapa puluh menit sulit dideteksi karena data TEC GIM yang digunakan memiliki resolusi setiap dua jam.

Perbandingan simpangan koefisien korelasi harian untuk 31 hari terhadap nilai rata-rata koefisien korelasi (skk) dibagi dengan deviasi standar koefisien korelasi (dskk) digunakan sebagai indikator anomali ionosfer. Nilai skk/dskk dijadikan dasar penentuan anomali ionosfer yang dapat dikelompokkan menjadi sepuluh kategori sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2-2. Tabel tersebut dibuat berdasarkan kriteria pengaruh gempa bumi terhadap ionosfer seperti ditunjukkan pada Gambar 2-1.

Penulis menentukan adanya anomali ionosfer yang disebabkan oleh gempa bumi dan atau badai geomagnet didasarkan pada nilai skk/dskk yang kurang dari -1. Jika memenuhi syarat tersebut maka pada hari dengan $skk/dskk < -1$ ditetapkan sebagai kondisi ionosfer yang tidak normal (anomali ionosfer). Jika terjadi sebelum gempa bumi (H-) maka anomali ionosfer dikelompokkan sebagai prekursor gempa bumi terdeteksi (PGT). Tetapi jika terjadi sesudah gempa bumi (H+) maka anomali ionosfer dikategorikan sebagai efek gempa bumi terdeteksi (EGT). Kriteria PGT maupun EGT harus memenuhi syarat pada saat tersebut tidak terjadi badai geomagnet moderat yang diindikasikan dengan indeks Dst yang kecil dari -50 nT untuk di daerah lintang rendah dan ekuator, dan berdasarkan indeks geomagnet Kp yang nilainya kurang dari 4 untuk gempa bumi yang terjadi di lintang tengah dan tinggi.

Tabel 2-2: PENGELOMPOKKAN PENGARUH AKTIVITAS GEMPA BUMI DI IONOSFER DARI DATA TEC GIM

No.	Kategori	Keterangan
1.	PGT	Prekursor Gempa Bumi Terdeteksi
2.	PGT/EMT	Prekursor Gempa Bumi/Efek Badai Geomagnet Terdeteksi
3.	PGLT	Prekursor Gempa Bumi Lainnya Terdeteksi
4.	PGTT/EMTT	Prekursor Gempa Bumi/Efek Badai Geomagnet Tidak Terdeteksi
5.	PGTT	Prekursor Gempa Bumi Tidak Terdeteksi
6.	EGT	Efek Gempa Bumi Terdeteksi
7.	EMT	Efek Badai Geomagnet Terdeteksi
8.	EGT/EMT	Efek Gempa Bumi / Badai Geomagnet Terdeteksi
9.	EGTT	Efek Gempa Bumi Tidak Terdeteksi
10.	EMTT	Efek Badai Geomagnet Tidak Terdeteksi

Setelah pengelompokan pengaruh gempa bumi diperoleh, kemudian persentase tiap-tiap kelompok dihitung untuk mengetahui tingkat keberhasilan teknik korelasi dalam mendeteksi prekursor dan efek gempa bumi dari data TEC ionosfer



Gambar 2-1: Kriteria anomali ionosfer berdasarkan perbandingan simpangan koefisien korelasi dengan deviasi standar koefisien korelasi (skk/dskk), indeks Dst, Kp dan waktu kejadian anomali sebelum gempa bumi (H-), dan sesudah gempa bumi (H+)

Loewe dan Prolls (1997) telah mengklasifikasikan badai geomagnet menjadi 5 kelompok yaitu: lemah ($-50 < Dst < -30$), moderat ($-100 < Dst < -50$), kuat ($-200 < Dst < -100$), severe ($-350 < Dst < -200$), dan besar atau super ($Dst < -350$). Pada makalah ini penulis mengasumsikan bahwa badai geomagnet yang dapat menyebabkan anomali variasi diurnal ionosfer sebagaimana diindikasikan dengan $skk/dskk < -1$ adalah dengan kekuatan < -50 atau minimal badai geomagnet moderat.

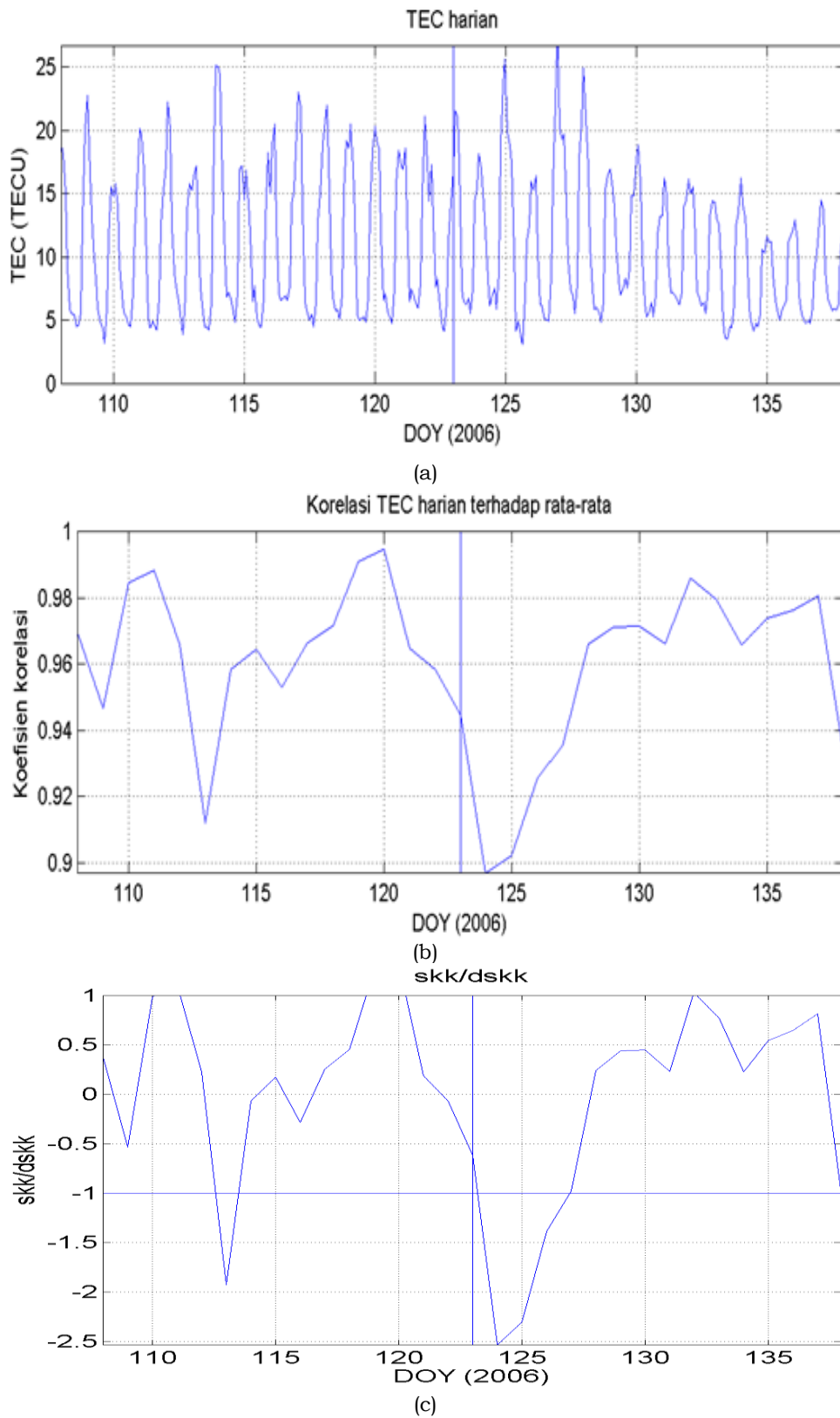
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian teknik korelasi untuk deteksi pengaruh gempa bumi besar yang terjadi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2-1 meliputi kejadian gempa bumi di daerah ekuator, lintang menengah dan lintang tinggi. Hasil dari pengujian teknik korelasi secara rinci ditunjukkan untuk masing-masing kelompok daerah berdasarkan lintang tersebut pada Gambar 3-1 (daerah lintang menengah) dan Gambar 3-2 (daerah ekuator dan lintang tinggi).

Pada kejadian gempa bumi di daerah lintang menengah yaitu gempa bumi Tonga (-21.74 LM) 3 Mei 2006 yang besarnya 8,0 SR, variasi TEC ionosfer diperlihatkan pada Gambar 3-1, yang meliputi variasi diurnal TEC GIM (a), koefisien korelasi antara variasi diurnal pada hari tertentu dengan rata-rata variasi diurnal TEC selama satu bulan (b) dan perbandingan simpangan koefisien korelasi dengan deviasi standar koefisien korelasi (skk/dskk) (c). Waktu gempa bumi ditandai dengan garis lurus arah vertikal di tengah gambar dan nilai ambang batas anomali ionosfer ditandai dengan garis horisontal pada $skk/dskk = -1$.

Adapun nilai koefisien korelasi pada saat terjadi anomali ionosfer sebelum dan sesudah gempa bumi ditunjukkan pada Tabel 3-1. Diperlihatkan pada tabel tersebut bahwa anomali ionosfer berdasarkan nilai skk/dskk terjadi sepuluh hari sebelum dan satu hari setelah kejadian gempa bumi. Untuk anomali ini yang terjadi sebelum gempa bumi dapat dikelompokkan dalam prekursor gempa bumi terdeteksi (PGT) karena memenuhi anomali terjadi sebelum gempa bumi dan tidak ada badai geomagnet ($Dst -12$ nT dan $Kp < 3$).

Untuk anomali satu hari setelah gempa bumi terjadi bersamaan dengan gangguan geomagnet dengan indeks Kp di atas 5, sehingga pada saat tersebut tidak diketahui apakah anomali ionosfer disebabkan oleh gempa bumi (EGT) atau oleh efek badai geomagnet (EMT) sehingga dikelompokkan dalam EGT/EMT sesuai dengan kriteria pada Tabel 2-2 dan ditunjukkan pada Gambar 2-1.



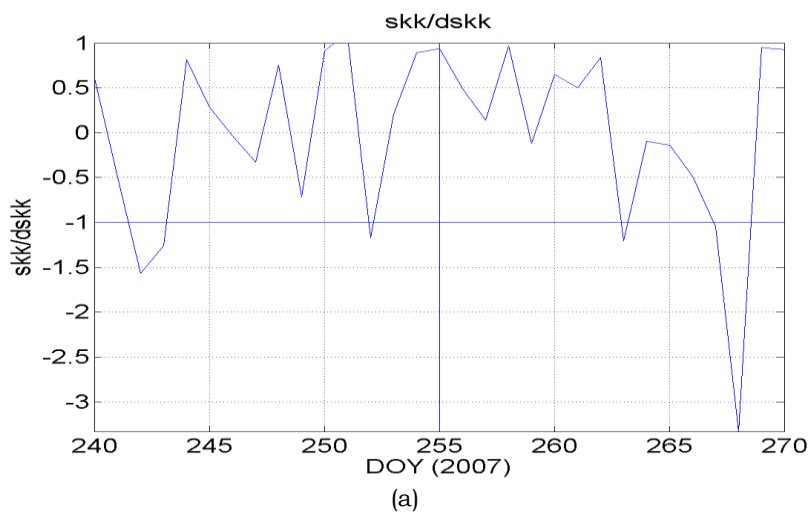
Gambar 3-1: Variasi diurnal (a) koefisien korelasi (b) dan perbandingan simpangan koefisien korelasi dengan deviasi standard koefisien korelasi (c) di daerah lintang menengah

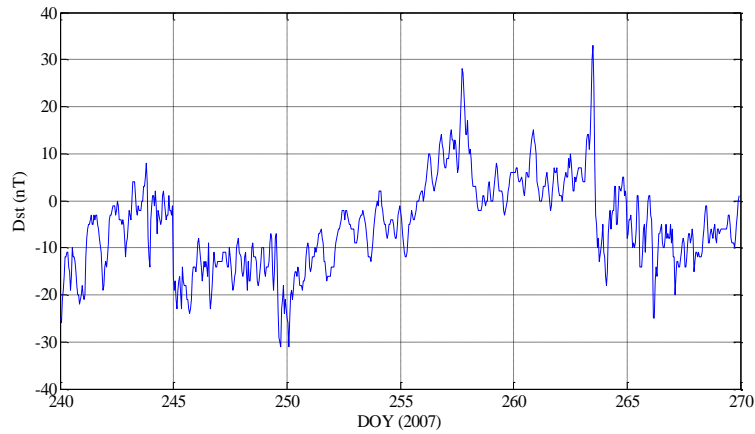
Tabel 3-1: PENGELOMPOKAN PENGARUH GEMPA BUMI TONGA 3 MEI 2006 BERDASARKAN TEKNIK KORELASI, DENGAN MEMPERTIMBANGKAN INDEK GANGGUAN GEOMAGNET DAN WAKTU KEJADIANNYA

Tanggal	Koefisien korelasi	Rata-rata korelasi	dskk	skk	Skk/d skk	Dst (nT)	Kp	Klasifikasi anomali
4 Mei 2006 (1 hari setelah gempa bumi)	0,8698	0,9806	0,0251	-0,0634	-2,5259	> - 50	>= 5	EGT/EMT
25 April 2006 (10 hari setelah gempa bumi)	0,9120	0,9806	0,0251	-0,0482	-1,9203	> -50	< 3	PGT

Dengan cara yang sama dapat diperoleh Gambar 3-2 yang menunjukkan variasi harian skk/dskk untuk kasus gempa bumi besar di daerah ekuator yaitu di Sumatera Selatan pada 12 September 2007 dan Gambar 3-3 untuk kasus gempa bumi yang terjadi di lintang tinggi yaitu pada 25 September 2003 di Hokkaido, Jepang. Pada gambar-gambar tersebut juga ditampilkan data indeks Dst untuk pembandingan sumber penyebab anomali ionosfer di ekuator dan data indeks Kp untuk pembandingan sumber anomali ionosfer di lintang tinggi.

Dari Gambar 3-2 (a) ditemukan adanya anomali ionosfer berdasarkan nilai skk/dskk < -1 yaitu 3 hari dan 12 hari sebelum gempa bumi di Sumatera Selatan. Pada saat terdeteksi anomali ionosfer tidak terjadi badai geomagnet karena nilai Dst > -30 (b). Untuk kasus gempa bumi di daerah ekuator ini telah digunakan indeks geomagnet Dst sebagai indikasi anomali bersumber dari gempa bumi atau badai geomagnet. Dikarenakan indeks Dst tidak menunjukkan adanya badai geomagnet pada saat terdeteksi efek gempa bumi di ionosfer, maka anomali beberapa hari sebelum gempa bumi dapat dikelompokkan dalam prekursor gempa bumi terdeteksi (PGT). Untuk anomali ionosfer setelah gempa bumi yang terjadi lebih dari tiga hari setelah gempa bumi (8 dan 13 hari setelah gempa bumi) tidak dapat dikelompokkan dalam efek gempa bumi terdeteksi (EGT) dan tidak dapat juga dikelompokkan dalam efek badai geomagnet terdeteksi (EMT). Berdasarkan kriteria sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2-1, anomali ionosfer setelah gempa bumi tersebut termasuk dalam kelompok prekursor gempa bumi lainnya (PGLT)

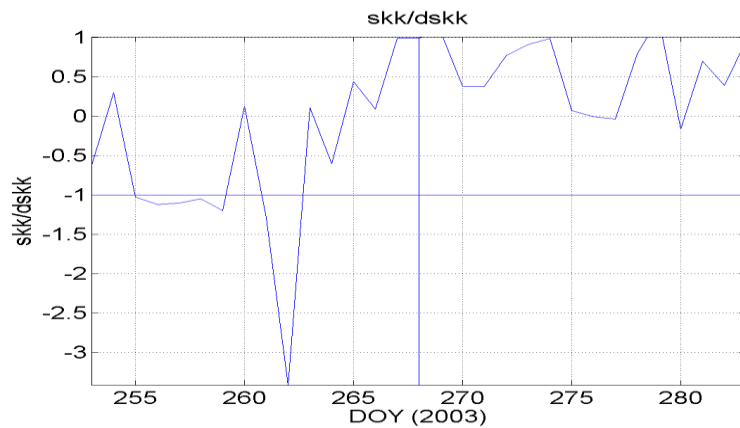




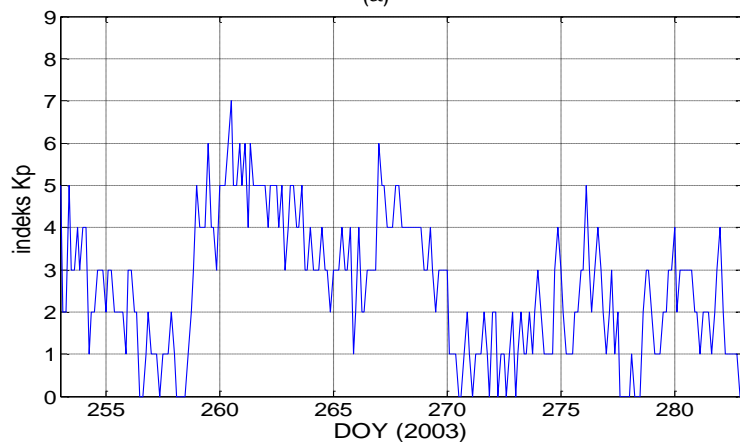
(b)

Gambar 3-2: Variasi harian skk/dskk ionosfer 15 hari sebelum, saat dan 15 hari sesudahnya pada kasus gempa bumi besar 12 September 2007 (a) dan indeks Dst yang bersesuaian (b)

Untuk kasus gempa bumi di daerah lintang tinggi yang terjadi pada 25 September 2003 di Hokkaido Jepang, nilai skk/dskk menembus nilai ambang batas beberapa hari sebelum gempa bumi tepatnya enam hari sebelum gempa dengan nilai skk/dskk $< -3,4$ (Gambar 3-3 (a)). Sementara itu indeks Kp pada saat terjadi anomali ionosfer menunjukkan ada badai geomagnet yang diindikasikan dengan $Kp > 4$ (Gambar 3-3 (b)). Dengan demikian anomali ionosfer yang diindikasikan dengan skk/dskk < -1 tersebut dikelompokkan dalam prekursor gempa bumi terdeteksi atau disebabkan oleh efek badai geomagnet (PGT/EMT).



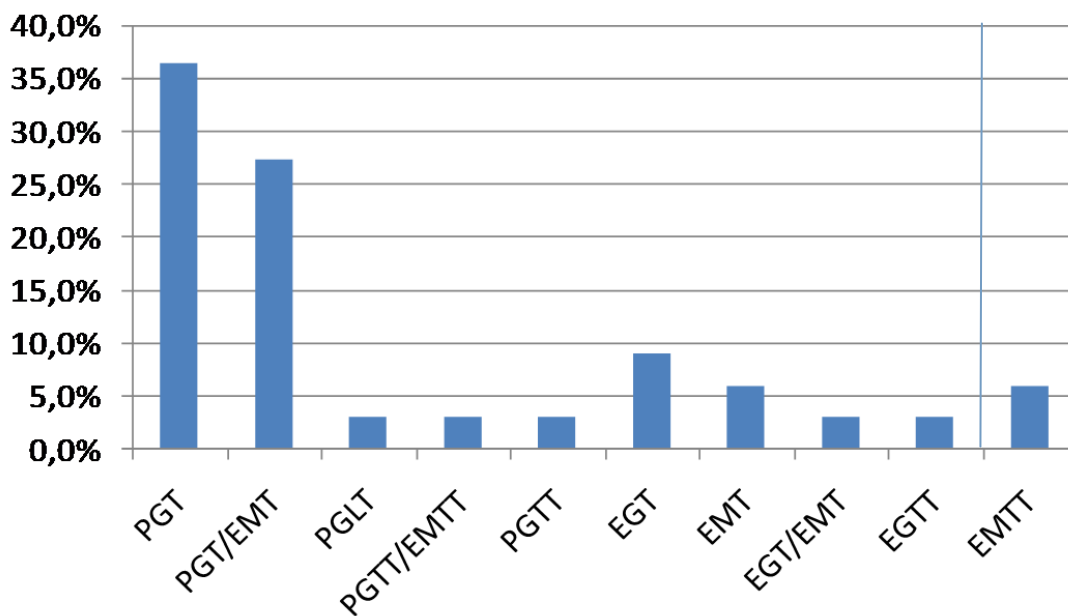
(a)



(b)

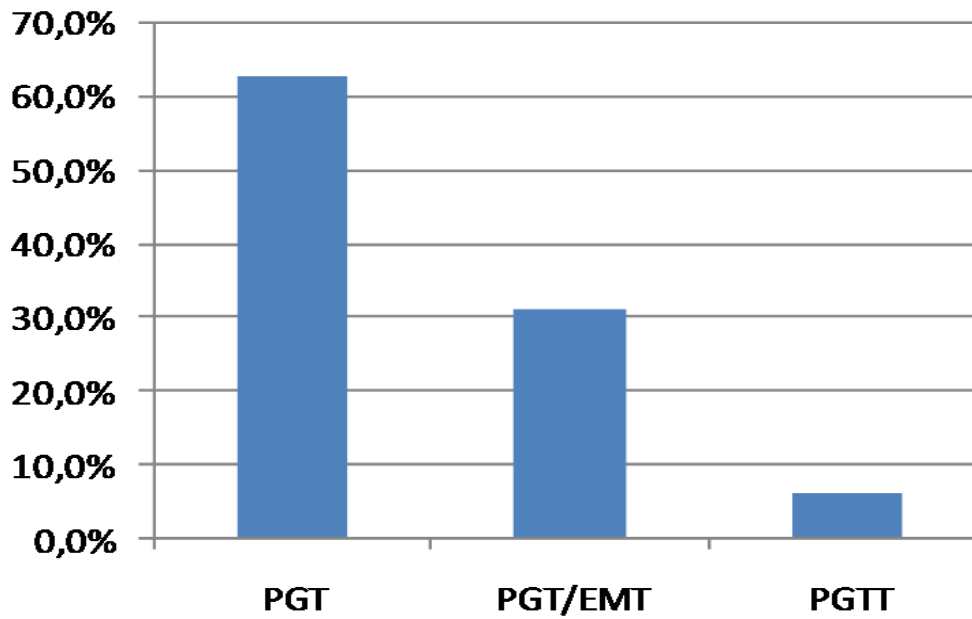
Gambar 3-3: Grafik skk/dskk pada kasus gempa bumi besar 25 September 2003 (a) beserta indeks Kp pada waktu yang bersesuaian (b)

Dengan cara yang sama pengaruh gempa bumi yang terdeteksi, atau yang tidak terdeteksi (Tabel 2-2) dari data TEC ionosfer telah diidentifikasi dari semua gempa bumi pada Tabel 2-1. Pengelompokan persentase kejadiannya dapat dilihat pada Gambar 3-4. Dari gambar tersebut diketahui bahwa prekursor gempa bumi yang terdeteksi (PGT) menempati urutan pertama yaitu lebih dari 36 %. PGT adalah prekursor gempa bumi yang terdeteksi dari nilai skk/dskk yang bernilai kurang dari -1 dan terjadi sebelum gempa bumi serta tidak ada badai geomagnet moderat. Pada urutan kedua persentase kejadian prekursor yang bersamaan dengan badai geomagnet (PGT/EMT) mencapai 27 %. Jika PGT dikumpulkan dengan tidak mempertimbangkan efek badai geomagnet (EMT) maka prekursor gempa bumi yang terdeteksi dengan teknik korelasi adalah sekitar 63 %. Tingkat kegagalan teknik korelasi dalam mendeteksi prekursor gempa bumi kurang dari 5 %. Teknik korelasi ini juga mendeteksi efek gempa bumi di ionosfer sampai 9 % yang merupakan urutan tertinggi anomali ionosfer terdeteksi setelah gempa bumi dengan kondisi geomagnet tenang.

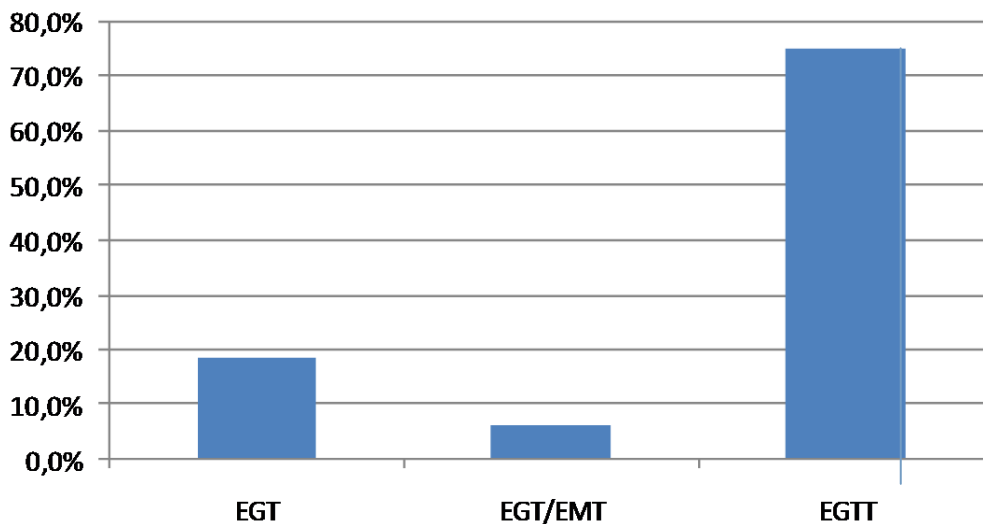


Gambar 3-4: Pengelompokan pengaruh gempa bumi besar (≥ 8 SR) terhadap lapisan ionosfer yang dideteksi dengan teknik korelasi dari data TEC GIM

Gambar 3-4 tersebut disusun berdasarkan semua anomali ionosfer yang terdeteksi dari 17 gempa bumi besar pada Tabel 2-1. Padahal satu gempa bumi dapat menimbulkan lebih dari satu anomali ionosfer baik sebelum maupun sesudahnya. Jika dari prekursor yang muncul atau efek yang muncul dari gempa bumi yang dideteksi dengan teknik korelasi ini hanya dibatasi satu prekursor dan satu dampak terdeteksi walaupun kenyataannya ada lebih dari satu pengaruh gempa yang terdeteksi, maka dapat dibuat persentase keberhasilan deteksi pengaruh aktivitas gempa bumi di ionosfer seperti ditunjukkan pada Gambar 3-5 dan 3-6. Pada Gambar 3-5 ditunjukkan bahwa persentase kejadian prekursor gempa bumi terdeteksi sekitar 62 %, prekursor gempa yang bersamaan dengan badai geomagnet sebanyak 31 % dan prekursor yang tidak terdeteksi adalah sekitar 7 %.



Gambar 3-5: Persentase keberhasilan deteksi prekursor gempa bumi besar dengan teknik korelasi



Gambar 3-6: Tingkat keberhasilan deteksi efek gempa bumi besar di ionosfer dengan teknik korelasi

Penggunaan teknik korelasi untuk mendeteksi efek gempa bumi di ionosfer setelah terjadinya gempa bumi hanya memiliki keberhasilan sekitar 19% seperti ditunjukkan pada Gambar 3-6. Sekitar 75 % efek gempa tidak dapat dimunculkan atau dideteksi dengan teknik korelasi berdasarkan data TEC GIM resolusi dua jam. Anomali ionosfer setelah gempa bumi yang bersamaan dengan badai geomagnet dapat dideteksi sebanyak 6%. Ketidakberhasilan teknik korelasi ini bukan disebabkan oleh tidak cocoknya metode tersebut untuk deteksi efek gempa bumi di ionosfer tetapi disebabkan oleh resolusi temporal data TEC yang digunakan. Efek gempa bumi berupa gelombang gravitasi akustik yang periodenya kurang dari satu jam tidak muncul di data TEC beresolusi dua jam tersebut.

Perbandingan hasil deteksi anomali ionosfer terkait prekursor gempa bumi dengan hasil penelitian sebelumnya ditunjukkan pada Tabel 3-2. Dari 16 gempa bumi ada empat anomali ionosfer dalam anomali yang bersesuaian waktunya dengan hasil penelitian lain sebelumnya yaitu hasil Hasbi et al (2011), Saradjian dan Akhoondzadeh (2011) dan Akhoondzadeh (2012).

Tabel 3-2: KLASIFIKASI ANOMALI IONOSFER SEBELUM GEMPA BUMI MENGGUNAKAN TEKNIK KORELASI DAN PERBANDINGANNYA DENGAN HASIL PENELITIAN SEBELUMNYA

Waktu Gempa	Skala Richter	Anomali ionosfer terdeteksi	Hasil peneliti lain
16/11/2000	8,0	9 dan 11 hari sebelum gempa PGT/EMT	Tidak ada laporan
23/06/2001	8,4	13 hari sebelum gempa PGT	Tidak ada laporan
25/09/2003	8,3	6 hari sebelum gempa PGT/EMT	5 hari sebelum gempa PGT (Zakharenkova <i>et al.</i> , 2007)
23/12/2004	8,1	10 hari sebelum gempa PGT/EMT	Tidak ada laporan
26/12/2004	9,1	5 hari sebelum gempa PGT	5-6 hari sebelum gempa (Hasbi <i>et al.</i> , 2011)
28/03/2005	8,6	8 dan 12 hari sebelum gempa PGT	4-6 hari sebelum gempa (Hasbi <i>et al.</i> 2011)
03/05/2006	8,0	10 hari sebelum gempa PGT	7, 2 dan 1 hari sebelum gempa PGT (Zhang <i>et al.</i> , 2012)
15/11/2006	8,3	6 hari sebelum gempa PGT	5 hari sebelum gempa EMT (Afraimovich <i>et al.</i> , 2008)
13/01/2007 04:23:21	8,1	PGTT	Tidak ada laporan
01/04/2007 20:39:58	8,1	8 hari sebelum gempa PGT/EMT	Tidak ditemukan laporan
15/08/2007 23:40:57	8,0	7 hari sebelum gempa PGT	Tidak ditemukan laporan
12/09/2007	8,5	3 hari sebelum gempa PGT	Ada anomali 3 hari sebelum gempa tetapi tidak menentukan prekursor gempa (Hasbi <i>et al.</i> , 2011)
29/09/2009	8,1	5 hari sebelum gempa PGT	5 hari sebelum gempa PGT (Saradjian and Akhoondzadeh, 2011)
27/02/2010	8,8	4 hari sebelum gempa PGT	Tidak Terdeteksi (Yao <i>et al.</i> , 2010)
11/03/2011	9,0	10 hari sebelum gempa PGT/EMT	10 hari sebelum gempa EMT (Akhoondzadeh, 2012)
11/04/2012 08:38:37	8,6	6 hari sebelum gempa PGT	11 dan 3 hari sebelum gempa (Guo <i>et al.</i> , 2015)
11/04/2012	8,2		

Empat prekursor gempa bumi tersebut adalah untuk gempa bumi 26 Desember 2004, 12 September 2007, 29 September 2009, dan 11 Maret 2011. Dua diantaranya berkekuatan lebih dari 9 SR yaitu gempa bumi Aceh 26 Desember 2004 dan Tohoku 11 Maret 2011. Tetapi untuk gempa Tohoku ini ada perbedaan klasifikasi anomali ionosfer. Pada tulisan ini anomali ionosfer sepuluh hari sebelum gempa Tohoku 11 Maret 2011 dikelompokkan dalam PGT/EMT atau tidak bisa dipastikan apakah anomali tersebut sebagai prekursor gempa bumi karena bersamaan dengan waktu terjadinya badai geomagnet. Sementara Akhoondzadeh (2012) menetapkan anomali ionosfer pada sepuluh hari sebelum gempa tersebut disebabkan oleh badai geomagnet.

Dari Tabel 3-2 juga diketahui ada enam anomali ionosfer yang ditemukan dengan teknik korelasi yang tidak dilaporkan oleh peneliti sebelumnya. Ini menunjukkan bahwa teknik korelasi dengan tambahan ambang batas mampu mendeteksi anomali ionosfer sebagai tanda prekursor gempa bumi yang tidak dilaporkan sebelumnya oleh peneliti lain.

Tabel 3-2 juga menunjukkan ada lima anomali ionosfer yang berbeda waktu terdeteksinya dengan hasil waktu anomali oleh peneliti sebelumnya menggunakan teknik yang berbeda yaitu dari hasil penelitian oleh Zakharenkova *et al.* (2007), Hasbi *et al.* (2011), Zhang *et al.* (2012), dan Astafyeva, E. I., (2008) dan Guo *et al.* (2015). Perbedaan waktu prekursor gempa bumi antara hasil teknik korelasi dengan teknik lainnya disebabkan oleh karena naik atau turunnya ionosfer dalam satu hari tidak selalu menghasilkan nilai korelasi yang lebih rendah sehingga dapat dideteksi adanya anomali ionosfer. Turunnya nilai korelasi pada saat adanya prekursor gempa bumi lebih disebabkan oleh adanya perubahan variasi diurnal ionosfer karena perubahan medan listrik di ionosfer. Sebagai contoh pada kasus gempa bumi 15 Nopember 2006 di Kepulauan Kuril, Afraimovich dan Astafyeva (2008) menetapkan lima hari sebelum gempa terjadi anomali ionosfer berupa kenaikan nilai TEC yang disebabkan oleh badai geomagnet. Dengan teknik korelasi TEC pada saat terjadi badai geomagnet tidak turun secara drastis. Anomali ionosfer yang terdeteksi dengan teknik korelasi terjadi pada enam hari sebelum gempa bumi dengan nilai $skk/dskk < -1$.

Karena anomali ionosfer dari teknik korelasi terjadi satu hari sebelum badai geomagnet dan terjadi enam hari sebelum gempa bumi maka anomali tersebut termasuk dalam kelompok PGT. Dengan demikian efek badai geomagnet pada variasi diurnal ionosfer tidak selalu menyebabkan perubahan yang menjadikan nilai $skk/dskk < -1$. Dari Tabel 3-2 juga diketahui bahwa ada satu gempa bumi yang tidak dapat terdeteksi dengan teknik korelasi dengan batas ambang yaitu pada kasus gempa bumi 13 Januari 2007 di bagian timur kepulauan Kuril. Pada kejadian ini peneliti lain juga tidak melaporkan adanya prekursor gempa bumi. Untuk gempa bumi 27 Februari 2010 di Chili penulis menemukan adanya prekursor gempa bumi terdeteksi 4 hari sebelum gempa. Pada kejadian ini Yao *et al.* (2010) tidak menemukan adanya prekursor gempa bumi.

4 KESIMPULAN

Pengujian teknik korelasi untuk deteksi prekursor gempa bumi besar pada lapisan ionosfer telah dilakukan menggunakan data TEC GIM. Teknik korelasi yang diuji adalah autokorelasi dengan tambahan batas anomali yang penulis tetapkan dari perbandingan nilai simpangan koefisien-koefisien korelasi terhadap deviasi standard koefisien korelasi dengan nilai kurang dari -1. Jika badai geomagnet diabaikan teknik korelasi untuk deteksi prekursor gempa bumi tersebut memiliki potensi keberhasilan sekitar 93 %. Tetapi jika efek badai geomagnet dipertimbangkan maka tingkat

keberhasilannya hanya sekitar 63 %. Hanya sekitar 7 % prekursor gempa bumi yang tidak dapat dimunculkan dengan teknik korelasi. Sementara itu tingkat keberhasilan teknik korelasi untuk pemunculan efek gempa bumi di ionosfer hanya sekitar 19 % dan yang gagal dimunculkan sekitar 73 %. Dengan demikian teknik korelasi hanya memiliki peluang keberhasilan yang tinggi untuk deteksi prekursor gempa bumi besar selama tidak terjadi badai geomagnet. Untuk deteksi efek gempa bumi besar, teknik korelasi berdasarkan data TEC GIM kurang berhasil. Oleh karena itu deteksi efek gempa bumi besar dari data TEC ionosfer memerlukan data TEC dengan resolusi waktu yang lebih tinggi secara temporal sehingga gejala gelombang gravitasi akustik yang menjalar sampai ketinggian ionosfer dapat dideteksi dengan lebih baik. Teknik korelasi dengan tambahan nilai ambang batas berpeluang dapat digunakan untuk mendukung sistem peringatan dini gempa bumi besar jika dilengkapi dengan data geomagnet dan atmosfer lainnya untuk bahan pertimbangan penentuan klasifikasi anomali ionosfer termasuk Prekursor Gempa Bumi (PGT) atau karena Efek Badai Geomagnet (EMT).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada *Center of Orbit Determination in Europe* (CODE) selaku penyedia data TEC dalam bentuk *Global Ionospheric Maps (GIM)* yang dapat diunduh dari <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/> dan kepada *United States Geological Survey* (USGS) yang telah memberikan data kejadian gempa bumi secara real time sehingga penulis dapat mengunduh data kejadian gempa bumi besar dari <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives>.

DAFTAR RUJUKAN

- Afraimovich E. L.; dan Astafyeva, E. I., 2008. *TEC Anomalies—Local TEC Changes Prior to Earthquakes or TEC Response to Solar and Geomagnetic Activity Changes?*, *Earth Planets Space*, 60, 961–966.
- Akhoondzadeh, M., 2012. *Anomalous TEC Variations Associated with the Powerful Tohoku Earthquake of 11 March 2011*, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 1453–1462.
- Guo, J.; Li, W.; Liu, X.; Wang, J.; Chang, X.; Zhao, C., 2015. *On TEC Anomalies as Precursor Before MW8.6 Sumatera Earthquake and MW 6.7 Mexico Earthquake on April 11, 2012*, *Geoscience Journal*, DOI 10.1007/s12303-015-0005-6, The Geological Society of Korea.
- Gwal A.K.; Santosh, J.; Gopal, P.; Gujar, Y.S.; Raghuwanshi S.; and Vijay S.K., 2012. *Study of Ionospheric Perturbations During Strong Seismic Activity by Correlation Technique using NmF2 Data*, *Research Journal of Recent Sciences*, Vol. 1(1), 2-9.
- Hasbi, A. M.; Ali, M. A. M.; and Misran, N., 2011. *Ionospheric Variations Before Some Large Earthquakes Over Sumatera*, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 597–611.
- Liu, J. Y.; Chen, Y. I.; Chuo, Y. J.; dan Tsai, H. F., 2001. *Variations of Ionospheric Total Content During the Chi-Chi Earthquake*, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1381-1386.
- Liu, J. Y.; Chuo, Y. J.; Pulinets, S. A.; Tsai, H. F.; and Zeng, X., 2002. *A Study on the TEC Erturbations Prior to the Rei-Li, Chi-Chi and Chia-Yi earthquakes*, in *Seismo-Electromagnetics Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*, Eds. Hayakawa M and Molchanov OA, TERRAPUB, Tokyo, 297-301.
- Liu, J. Y.; Chuo, Y. J.; Shan, S. J.; Tsai, Y. B.; Pulinets, S. A.; and Yu, S. B., 2004. *Pre-earthquake Ionospheric Anomalies Monitored by GPS TEC*, *An. Geophys.*, 22, 1585-1593.
- Mjachkin, V.; Brace, W.; Sobolev, G.; and Dietrich, J., 1975. *Two Models of Earthquake Forerunners*, *Pageoph.*, 113, 169-181.
- Pulinets, S. A.; Legen'ka, A. D.; and Alekseev, V. A., 1994. *Pre-earthquakes Effects and their Possible Mechanisms*, in: *Dusty and Dirty Plasmas, Noise and Chaos in Space and in the Laboratory*, Plenum Publishing, New York, 545-557.

- Pulinets, S. A.; Khagai, V. V.; Boyarchuk, K. A.; and Lomonosov, A. M., 1998. *Atmospheric Electric Field as a Source of Ionospheric Variability*, Physics-Uspekhi, 41, 515-522.
- Pulinets, S. A.; and Boyarchuk, K., 2004. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*, Springer, Berlin.
- Pulinets, S. A., Gaivoronska, T. B., Contreras, A. L., Ciraolo, L., 2004. *Correlation Analysis Technique Revealing Ionospheric Precursors of Earthquake*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 4, 697-702.
- Saradjian, M. R.; and Akhoondzadeh, M., 2011. *Prediction of the Date, Magnitude and Affected Area of Impending Strong Earthquakes using Integration of Multi Precursors Earthquake Parameters*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 1109–1119.
- Scholz, C. H., Sykes, L. R., dan Aggarwal, Y. P., 1973. *Earthquake Prediction: A Physical Basis*, Science, 181, 803-809.
- Singh, V.; Chauhan, V.; Singh, O. P.; Singh, B., 2010. *Ionospheric Effect of Earthquakes as Determined from Ground Based TEC Measurement and Satellite Data*, Indian Journal of Radio and Space Physics, Vol. 39, no. 2.
- Yao, Y. B.; Chen, P.; Zhang, S.; Chen, J. J.; Yan, F.; and Peng, W. F., 2012. *Analysis of Pre-earthquake Ionospheric Anomalies before the Global M = 7.0+ Earthquakes in 2010*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 575–585.
- Zakharenkova, I. E.; Shagimuratov, I. I.; Krankowski, A.; and Lagovsky, A. F., 2007. *Precursory Phenomena Observed in the Total Electron Content Measurements before Great Hokkaido Earthquake of September 25, 2003 (M = 8.3)*, *Studia Geophysica Et Geodaetica*, Volume 51, Issue 2, 267-278.
- Zhang, X.; Ouyang, X.; Liu, J.; and Shen, X., 2012. *The Perturbation Characteristics in Plasma Parameters in Ionosphere before Strong Earthquakes*, EGU General Assembly 2012, held 22-27 April, 2012 in Vienna, Austria., 1467.

