

BAB I PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan daerah yang rawan akan terjadinya bencana gempa bumi, karena berada pada pertemuan 3 lempeng besar yaitu lempeng Indo – Australia, lempeng Eurasia dan lempeng Pasifik yang membentang dari bagian barat Sumatera hingga ke bagian timur Papua. Akibat dari pertemuan lempeng tersebut Indonesia disebut sebagai daerah *Ring of Fire* karena sering mengalami letusan gunung api dan gempa bumi. Pada tahun 1999 – 2018 telah terjadi 209 kejadian gempa bumi di Indonesia dengan magnitudo ≥ 6 . Dari jumlah gempa tersebut sekitar 67 kejadian gempa bumi terjadi di daerah Sumatera^[1]. Beberapa kejadian gempa bumi yang pernah terjadi menimbulkan kerugian besar di Sumatera seperti gempa Aceh tahun 2004 ($M_w = 9,2$), gempa Nias tahun 2005 ($M_w = 8,7$), gempa Bengkulu tahun 2007 ($M_w = 8,5$), gempa Padang tahun 2009 ($M_w = 7,6$), gempa Mentawai tahun 2010 ($M_w = 7,8$), dan gempa Pidie Jaya tahun 2016 ($M_w = 6,4$)^{[1][2]}. Hal ini menunjukkan Sumatera merupakan daerah yang memiliki frekuensi kejadian gempa bumi dengan magnitudo ≥ 6 yang tinggi. Tingginya frekuensi kejadian gempa bumi di Sumatera ini menyebabkan dibutuhkan upaya untuk mengurangi kerugian tersebut.

Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah prediksi peristiwa gempa bumi yang akan terjadi. Prediksi ini dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis yaitu; (i). prediksi jangka panjang (*long term*) yang membutuhkan waktu ratusan hingga ribuan tahun perekaman data kejadian gempa bumi; (ii). prediksi jangka menengah (*intermediate term*) dengan jangka waktu beberapa puluh tahun berdasarkan data kejadian gempa bumi masa lalu; dan (iii). prediksi jangka pendek (*short term*) berdasarkan kejadian awal beberapa menit hingga beberapa bulan sebelum terjadinya gempa^{[3][4][5][6][7]}. Prediksi jangka pendek dilakukan melalui pengamatan parameter geokimia, geotmosferik dan geofisika sebelum terjadinya gempa bumi yang sering disebut prekursor^[8].

Parameter geoatmosferik adalah pengamatan terhadap perubahan atmosfer sebelum terjadinya gempa bumi seperti anomali temperatur udara, anomali awan, variasi tekanan udara, awan gempa, dan lainnya^[8–11]. Parameter geokimia merupakan pengamatan terhadap perubahan sifat kimia di daerah sumber gempa bumi berupa emisi gas radon, sinar gamma, komposisi air permukaan, konsentrasi gas permukaan tanah dan lainnya^[8]. Parameter geofisika adalah pengamatan perubahan fisik yang terjadi beberapa saat sebelum gempa bumi terjadi. Pengamatan ini dapat berupa pengamatan terhadap sifat kelistrikan, kemagnetan, penjalaran gelombang seismik, gaya berat dan lainnya. Pengamatan geofisika juga bisa dilakukan dengan pengamatan terjadinya fenomena seismo – elektromagnetik sebelum terjadinya gempa bumi. Secara umum, fenomena seismo – elektromagnetik terbagi menjadi dua tipe, yaitu: (a). perubahan gelombang elektromagnetik di litosfer; dan (b). gangguan di atmosfer dan ionosfer^[7]. Perubahan gelombang elektromagnetik di litosfer biasanya direkam melalui pengamatan medan listrik atau medan magnetik di permukaan bumi, dan salah satu yang paling menjanjikan adalah gelombang elektromagnetik pada *band* frekuensi *Ultra Low Frequency* (ULF)^[12], sedangkan gangguan di atmosfer dan ionosfer dijelaskan oleh mekanisme *seismo ionospheric coupling*.

Perubahan gelombang elektromagnetik di litosfer berupa emisi gelombang elektromagnetik dihasilkan oleh proses patahnya formasi batuan di daerah tumbukan lempeng yang mengakibatkan terjadinya gempa bumi atau dikenal dengan proses seismogenik. Proses ini memancarkan spektrum gelombang elektromagnetik dari frekuensi *Ultra Low Frequency* (ULF) hingga *Very High Frequency* (VHF) di daerah persiapan gempa, namun hanya ULF yang bisa dijadikan sebagai prekursor karena hanya sedikit mengalami atenuasi dan mampu merambat ke permukaan bumi^{[6][13][14][15]}. Pendeteksian anomali ULF biasanya dilakukan menggunakan data geomagnetik pada frekuensi $< 0,1$ Hz yang telah terekam oleh instrumen seperti MAGDAS (*Magnetic Acquisition Data System*), karena pada frekuensi tersebut dianggap sebagai frekuensi aktivitas litosfer yang berkaitan dengan gempa bumi^{[6][16][17]}.

Proses seismogenik juga menyebabkan terbentuknya ion – ion positif di sekitar daerah sumber gempa bumi. Ion – ion ini kemudian akan naik ke atas dan berikatan dengan elektron bebas yang berada di ionosfer, sehingga menyebabkan kerapatan elektron bebas menjadi berkurang^[18]. Peristiwa berkurangnya kerapatan elektron bebas ini dapat dijadikan sebagai tanda awal akan terjadinya gempa bumi dengan mengukur jumlah elektron total yang berada di ionosfer atau dikenal dengan *Total Electron Content* (TEC)^[5]. Pengukuran TEC ini dilakukan dengan mengukur jumlah elektron total di sepanjang jalur antara stasiun pemancar dan penerima GPS (*Global Positioning System*), dengan asumsi terdapat kolom vertikal berbentuk silinder berpenampang seluas 1 m^2 dengan elektron total di dalamnya di sepanjang lintasan sinyal dalam lapisan ionosfer.

Emisi ULF dapat dihitung dengan metode *Power Spectral Density* (PSD) atau metode *Wavelet* dari data geomagnetik. Hasil perhitungan tersebut kemudian dianalisis dengan membandingkan nilai polarisasi rasio komponen vertikal (S_z), komponen horizontal (S_H), komponen utara (S_X) dan komponen timur (S_Y) dari komponen geomagnetiknya^{[19][20][21]}. Anomali emisi ULF dari data geomagnetik ditentukan nilai polarisasi rasio S_z dan S_H yang melebihi nilai standar deviasi data geomagnetiknya, sedangkan anomali TEC dapat ditentukan menggunakan teknik korelasi antara variasi diurnal TEC hari tertentu terhadap variasi diurnal rata – rata bulanan. Nilai TEC dihitung dengan membandingkan nilai simpangan koefisien korelasi harian dibagi dengan standar deviasinya ($skk/dskk$), dengan anomali TEC ditandai dengan nilai $skk/dskk < -1$ ^{[22][23]}. Untuk menganalisis emisi ULF dan anomali TEC sebagai prekursor gempa bumi digunakan indeks *Disturbance storm time* (DST) sebagai validasi untuk memastikan penyebab anomali terjadi bukan disebabkan oleh faktor eksternal seperti aktivitas badai matahari. Indeks DST digunakan untuk mengamati aktivitas geomagnetik yang terekam di daerah ekuator dan daerah lintang rendah^{[20][24]}.

Penelitian mengenai prekursor gempa bumi dengan pengamatan emisi ULF untuk gempa kuat Sumatera tahun 2007 – 2012 dengan magnitudo ≥ 6 telah dilakukan menggunakan metode *Power Spectral Density* (PSD)^[21]. Metoda PSD digunakan untuk menganalisis polarisasi rasio S_z dan S_H komponen magnetik dari

stasiun Kototabang sebagai stasiun utama, stasiun Davao dan stasiun Darwin sebagai stasiun pembanding. Hasil penelitian menunjukkan terdapat emisi ULF selama 26 hingga 1 hari sebelum terjadinya gempa (*lead time*) yang bergantung pada besar magnitudo dan kedalaman sumber gempa bumi (*hypocenter*). Hasil penelitian menunjukkan korelativitas antara *lead time* anomali ULF sebanding dengan magnitudo gempa dan berbanding terbalik dengan jarak hiposenter gempa. Penelitian lainnya juga dilakukan dengan pengamatan anomali TEC sebagai prekursor gempa kuat Sumatera tahun 2007 – 2012 dengan magnitudo ≥ 6 ^[25]. Penelitian ini menggunakan data dari GPS Sumatran Array dengan rentang waktu pengamatan 27 hari. Metode yang digunakan adalah metode auto korelasi antara nilai harian TEC dan variasi diurnal TEC selama 27 hari dari stasiun pengamatan. Hasil dari penelitian menunjukkan terjadi perubahan TEC pada 24 hingga 11 DoA (*Day of Anomaly*) sebelum terjadinya gempa bumi. Anomali TEC terjadi untuk 10 gempa dari 12 data gempa bumi yang diteliti. Penelitian emisi ULF untuk gempa kuat Sumatera tahun 2007 – 2012 menggunakan 11 data gempa Sumatera, sedangkan pengamatan anomali TEC sebagai prekursor gempa kuat Sumatera tahun 2007 – 2012 menggunakan 12 data gempa. Dari kedua penelitian ini terdapat lima gempa yang sama dari data gempa yang diteliti. Hal ini menunjukkan emisi ULF dan anomali TEC muncul sebelum terjadinya gempa bumi, dan kemungkinan memiliki karakteristik tertentu yang bisa dijadikan sebagai acuan untuk digunakan secara bersamaan dalam meneliti prekursor sebuah gempa bumi di Sumatera terkait parameter geofisika.

Penelitian tentang prekursor gempa bumi sedang ($3,5 \leq M \leq 5,5$) juga telah dilakukan dengan pengamatan emisi gelombang elektromagnetik dan anomali TEC secara bersamaan di Pelabuhan Ratu, Jawa Barat^[23]. Penelitian ini menggunakan metode polarisasi rasio komponen vertikal (H_z) dan horizontal (H_h), komponen horizontal (H_h) terhadap rata – rata tahunan (H_{ht}), dan impedansi rasio medan listrik (E) terhadap medan magnet (H), serta menganalisis korelasi harian dan variasi diurnal TEC selama 31 hari. Hasil dari penelitian menunjukkan terdapat emisi elektromagnetik dengan *lead time* 1 – 3 hari sebelum terjadinya gempa bumi. Emisi gelombang elektromagnetik terjadi untuk 5 gempa dari 8 data gempa yang

diteliti. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa terjadi anomali TEC selama 1 – 2 hari sebelum terjadinya gempa bumi. Anomali terjadi untuk 3 gempa dari 8 gempa bumi yang diteliti dan didapatkan juga bahwa emisi gelombang elektromagnetik bisa digunakan sebagai prekursor gempa bumi kecil dengan jarak episenter dekat dengan stasiun pengamatan. Selain itu, penelitian ini juga mendapatkan bahwa anomali TEC dapat digunakan sebagai prekursor untuk gempa bumi kuat dengan jarak episenter jauh dari stasiun pengamatan. Penelitian lainnya dengan mengamati emisi ULF dan anomali TEC juga telah dilakukan untuk gempa bumi dengan magnitudo ≥ 5 di Laut Maluku^[26]. Metode yang digunakan adalah metode polarisasi rasio komponen vertikal terhadap komponen horizontal (Z/H) magnetik untuk menganalisis anomali ULF dan analisis teknik korelasi harian dan variasi diurnal TEC selama 31 hari dari data *Global Ionospheric Maps* (GIM). Selain itu, digunakan metode *Single Station Transfer Function* (SSTF) untuk mendapatkan nilai arah anomali ULF yang dikategorikan sebagai prekursor gempa bumi. Hasil dari penelitian ini menunjukkan terjadi emisi ULF dan anomali TEC sebelum gempa bumi, dengan *onset time* dan *lead time* ULF adalah 2 hingga 26 hari sebelum gempa, sedangkan *onset time* TEC adalah 10 hingga 19 hari dan *lead time* 1 hingga 3 hari sebelum gempa bumi terjadi.

Penelitian lainnya mengenai emisi ULF maupun TEC memang telah banyak dilakukan di Indonesia khususnya di Sumatera. Penelitian emisi ULF di Sumatera telah dilakukan untuk gempa kecil^[27] hingga gempa kuat^{[20][21][28][29][30][31]} yang menunjukkan terjadi emisi ULF sebelum terjadinya gempa bumi. Hal yang sama juga dilakukan terhadap anomali TEC untuk gempa - gempa kuat^{[5][24]} yang terjadi di Sumatera. Namun, dari penelitian yang telah dilakukan, penelitian emisi ULF dan anomali TEC dilakukan secara terpisah sehingga tidak didapatkan bagaimana kaitan antara kedua parameter ini sebagai prekursor gempa bumi seperti yang dijelaskan mekanisme fisis *seismo – electromagnetic* dan *mekanisme seismo – ionospheric coupling* tentang perubahan gelombang elektromagnetik yang mempengaruhi variasi ionosfer di daerah persiapan gempa bumi^[32]. Oleh karena akan dilakukan penelitian terhadap hubungan anomali ULF dan TEC terkait prekursor gempa bumi Sumatera dengan magnitudo ≥ 5 menggunakan data gempa

periode 2019 – 2020. Pemilihan data periode 2019 – 2020 dikarenakan dalam rentang waktu tersebut telah terjadi 177 kejadian gempa bumi dengan magnitudo $\geq 4,5$ ^[33] di sekitar zona subduksi dan Sesar Sumatera. Selain itu, Sumatera memiliki potensi untuk mengeluarkan gempa kuat ($5,5 \leq M \leq 7$) yang merusak di daerah Sesar Sumatera dan gempa sangat kuat ($M \geq 8$) di zona Subduksi Sumatera^[34].

I.2 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis keterkaitan hubungan anomali ULF dan TEC sebagai prekursor gempa bumi di Sumatera. Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan informasi keterkaitan hubungan anomali ULF dan TEC sebagai prekursor gempa bumi dengan magnitudo ≥ 5 di Sumatera yang akan menjadi informasi tambahan bagi pihak – pihak yang melakukan penelitian terkait prekursor gempa.

I.3 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi oleh radius persiapan gempa berdasarkan persamaan *preparation zone* dengan *azimuth* toleransi $22,5^\circ$ ke atas dan $22,5^\circ$ ke bawah dari *azimuth* hasil penelitian. Penelitian ini juga dibatasi oleh kejadian gempa bumi dengan magnitudo ≥ 5 Mw dan kedalaman hiposenter < 60 km di Sumatera yang terjadi pada Januari 2019 – Desember 2020.

I.4 Hipotesis

Hipotesis pada penelitian ini adanya hubungan antara anomali emisi ULF dan anomali TEC sebagai prekursor gempa di Sumatera berupa munculnya emisi ULF yang diikuti oleh anomali TEC di ionosfer akibat dari fenomena *Litosphere – Atmosphere – Ionosphere Coupling*. Selain itu, ada beberapa gempa di Sumatera yang telah diteliti terjadi anomali emisi ULF^[21] dan anomali TEC^[25] sebelum terjadinya gempa bumi.