

ANALISIS PARAMETER GEO-ATMOSFERIK DAN GEOKIMIA SEBAGAI PREKURSOR GEMPABUMI DI PELABUHAN RATU, SUKABUMI

EARTHQUAKE PRECURSORS ANALYSIS USING GEO-ATMOSPHERIC AND GEOCHEMICAL PARAMETERS IN GEOPHYSICAL OBSERVATORY STATION PELABUHAN RATU, SUKABUMI

Suliyanti Pakpahan^{1*}, Boko Nurdyanto², Drajat Ngadmanto¹

¹Puslitbang BMKG, Jl. Angkasa I/No.2 Kemayoran, Jakarta 10720

²Upstream Technology Center PT Pertamina, Jl. Medan Merdeka Timur No. 6, Jakarta 10110

*E-mail: suliyanti_p@yahoo.com

Naskah masuk: 25 Oktober 2013; Naskah diperbaiki: 25 Oktober 2014; Naskah diterima: 20 November 2014

ABSTRAK

Monitoring parameter geo-atmosferik dan geokimia sebagai perpaduan dari monitoring emisi gas radon, suhu udara permukaan, suhu dan kelembaban tanah dilakukan di Stasiun Observatori Geofisika Pelabuhan Ratu, Sukabumi, Jawa Barat untuk mengetahui hubungannya dengan aktivitas gempabumi. Penelitian di Indonesia mengenai hubungan parameter geo-atmosferik dan geokimia dengan prekursor gempabumi baru pertama kali dilakukan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (Puslitbang BMKG). Monitoring gas radon, suhu, dan kelembaban tanah dilakukan menggunakan sistem monitoring radonRAD7 dengan sensor soil gas probe yang ditanam pada kedalaman 1,2 meter. Data pengamatan suhu permukaan adalah suhu maksimum dan minimum yang tercatat menggunakan termometer air raksa. Anomali radon, suhu, dan kelembaban dikorelasikan dengan kejadian gempabumi yang memenuhi radius zona manifestasi prekursor berdasarkan penelitian Dobrovolsky. Hasil analisis parameter geo-atmosferik menunjukkan adanya penurunan sebesar $5,3^{\circ}$ - 13° yang diikuti kenaikan sebesar 6° - $8,2^{\circ}$ pada nilai Tmax-Tmin suhu permukaan. Sementara untuk analisis geokimia menunjukkan adanya kenaikan gas radon sebesar 1,5-60 kali dari nilai normalnya, kenaikan kelembaban sebesar 6%-21%, dan kenaikan suhu tanah $1,5^{\circ}$ - $3,2^{\circ}$ yang diikuti penurunan sebesar $1,5^{\circ}$ - 4° . Anomali geo-atmosferik dan geokimia yang diduga sebagai prekursor gempabumi terdeteksi 3-30 hari sebelum gempabumi sehingga parameter ini termasuk dalam prekursor jangka pendek yang berhubungan dengan proses deformasi di wilayah pengamatan sebelum gempabumi.

Kata kunci: radon, suhu, kelembaban, prekursor gempabumi, Sukabumi

ABSTRACT

Monitoring of geo-atmospheric and geochemical parameters, as a combination monitoring of radon emission, surface air temperature, and soil temperature and soil humidity, located in Geophysical Observatory Station Pelabuhan Ratu, Sukabumi, West Java, to determine its relation with earthquake. In Indonesia, it was first research of earthquake precursor using these method, conducted by Research and Development Center, Indonesian Agency of Meteorology Climatology and Geophysics. Monitoring of radon, soil temperature and humidity using RAD7 radon monitoring system where probes sensor are placed at 1.2 meters below land surface. The maximum and minimum air temperature recorded by a mercury thermometer. The anomalies of radon, temperature and humidity are correlated with the occurrence of earthquake within radius of precursor manifestation zone, refer to Dobrovolsky's research. The results of analysis show a decrease of 5.3° - 13° which followed by an increase of 6° - 8.2° on the surface temperature; an increase of radon gas at 1.5-60 times of the normal value, the increase of humidity ranged on 6% -21%, and the soil temperature rise of 1.5° - 3.2° followed by a decrease of 1.5° - 4° . Geo-atmospheric and geochemical anomalies which indicated as precursors, detected 3-30 days before earthquake and categorized as short-term precursors that associated with deformation process in the observation region before earthquake.

Keywords: radon, temperature, humidity, earthquake precursor, Sukabumi

1. Pendahuluan

Prediksi gempabumi merupakan salah satu isu yang menjadi perdebatan dalam forum ilmuwan kebumihan dan menjadi suatu hal yang sangat ditunggu keberhasilannya dalam memberikan peringatan akan bahaya gempabumi. Penelitian prediksi gempabumi telah memberikan pemahaman tentang mekanisme sumber gempabumi, kompleksitas zona sesar, interval kejadian gempabumi, dan penentuan lokasi bahaya gempabumi.

Akhir-akhir ini penelitian mengenai prediksi gempabumi telah beralih berkembang menjadi penelitian mengenai kemunculan tanda awal (prekursor) gempabumi. Penelitian dilakukan dengan melakukan monitoring berbagai parameter seperti parameter geofisika[1,2], geo-atmosferik[3-7], geokimia[8], geodesi, dan beberapa integrasi parameter[9,10]. Salah satu metoda yang tengah dikembangkan adalah monitoring parameter geo-atmosferik (suhu permukaan) dan geokimia (perubahan konsentrasi gas radon, suhu, dan kelembaban tanah) sebagai prekursor gempabumi.

Perubahan suhu udara dan kelembaban sebelum gempabumi bisa dijelaskan sebagai mekanisme fisika dalam hubungan kopling Litosfer-Atmosfer-Ionosfer. Gas radon yang berasal dari kerak bumi akan terlepas pada saat proses persiapan gempabumi. Ion yang diproduksi oleh ionisasi partikel- α dari gas radon (^{222}Rn) menjadi pusat kondensasi uap air. Bukan kondensasi murni, tetapi hidrasi dari ion yang terbentuk. Proses hidrasi tidak membutuhkan penjumlahan uap air seperti pada kondensasi murni, tetapi pada fase perubahan molekul air dari uap air yang melekat pada ion, panas laten evaporasi dikeluarkan. Hasil kondensasi menyebabkan kelembaban udara menurun sedangkan suhu meningkat seiring dengan pengeluaran panas laten dari kondensasi. Setelah mencapai konsentrasi radon maksimum, aliran radon akan berkurang, kondisi atmosfer kembali normal, kelembaban meningkat, dan suhu menurun sebelum terjadinya gempabumi[7].

Radon (^{222}Rn) merupakan gas radioaktif yang tidak berbau dan tidak berwarna hasil peluruhan Uranium yang tersimpan di dalam batuan, waktu paruh gas radon di udara bebas adalah 3,8 hari. Ketika terjadi deformasi di zona persiapan gempabumi, gas radon akan terlepas ke udara sebelum meluruh. Selanjutnya energi hasil peluruhan radon mengionisasi atom di atmosfer dan menyebabkan perubahan komposisi ion di ionosfer[11]. Sensor radon di permukaan akan menangkap adanya perubahan komposisi ini, sehingga gas radon bisa menjadi indikator aktivitas tektonik yang bagus.

Salah satu penelitian awal yang menunjukkan hubungan antara radon dan kemunculan gempabumi adalah pengamatan konsentrasi radon di sumur air dengan kejadian gempabumi Tashkent tahun 1966 yang dilakukan Ulomov dan Mavashev [12]. Hal ini kemudian diikuti puluhan penelitian radon lain di beberapa Negara [13].

Penelitian di beberapa negara seperti Amerika, Jepang, China, India, dan Rusia menunjukkan adanya indikasi yang kuat antara kenaikan emisi radon dengan waktu terjadinya gempabumi. Hal ini terjadi karena adanya perubahan tekanan akibat gerak tektonik kerak bumi. Perubahan tekanan ini dapat menyebabkan perubahan lepasan gas radon dari dalam tanah.

Beberapa penelitian tersebut diantaranya dilakukan oleh Sadosky yang melaporkan adanya kenaikan konsentrasi gas radon sebesar 2 (dua) hingga 5 (lima) kali sebelum terjadinya gempabumi berkekuatan 5,3 SR di Tashkent-USSR tahun 1966. Lalu Tim Peramalan gempabumi yang berkaitan dengan lepasan radon yang dipelopori Prof. Chi Yu King dan Prof. Fleischer di Amerika Serikat mengukur lepasan gas radon di daerah patahan San Andreas, Alaska, dan California. Hasil penelitian menunjukkan kenaikan lepasan gas radon dari tanah sebesar 4 (empat) hingga 40 (empat puluh) kali sebelum terjadinya gempabumi besar. Sementara Tim Universitas Hiroshima melakukan penelitian konsentrasi gas radon pada air tanah dalam (*under water*) sekitar 30 km dari Kobe-Jepang. Penelitian mereka menunjukkan adanya kenaikan konsentrasi gas radon sampai 12 kali pada satu minggu sebelum terjadinya gempabumi Kobe tanggal 16 Januari 1995 dengan magnitudo 6,8 SR[14].

Di Indonesia sendiri, penelitian mengenai hubungan parameter geo-atmosferik dan geokimia dengan prekursor gempabumi baru pertama kali dilakukan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (Puslitbang BMKG). Penelitian prekursor dengan kedua parameter tersebut dimulai sejak tahun 2012.

Penelitian prekursor gempabumi ini bertujuan untuk mengamati anomali konsentrasi geokimia dan geo-atmosferik yang muncul sebelum terjadinya gempabumi. Batasan masalah pada penelitian ini adalah menganalisa konsistensi pola anomali gas radon, suhu dan kelembaban dikorelasikan dengan kejadian gempabumi di sekitar Stasiun Observatory Pelabuhan Ratu yang memenuhi radius zona manifestasi prekursor berdasarkan penelitian Dobrovolsky[15].

2. Metode Penelitian

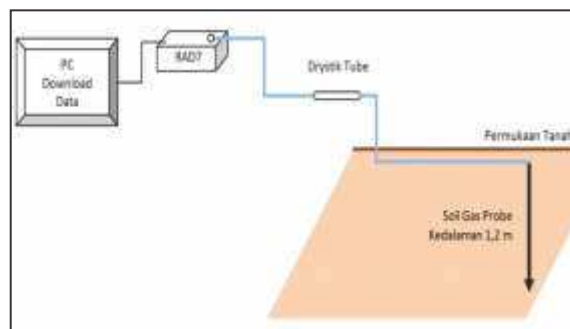
Data yang digunakan untuk pengamatan geo-atmosferik adalah suhu udara permukaan yaitu selisih suhu maksimum (T_{mak}) dan suhu minimum (T_{min}) yang tercatat termometer air raksa di taman alat Observatori Geofisika Pelabuhan Ratu sejak bulan Maret hingga November 2012.

Pengamatan geokimia menggunakan data emisi gas radon, suhu, dan kelembaban tanah sejak bulan Maret hingga November 2012. Pengamatan data geokimia sebagai prekursor gempabumi dimulai sejak awal tahun 2012 dengan pemasangan alat monitoring gas radon dalam tanah di Observatori Geofisika Pelabuhan Ratu menggunakan RAD7 dengan sensor *soil gas probe* yang ditanam di dalam tanah sedalam 1,2 meter. Pengambilan data dilakukan secara kontinyu dengan pencuplikan data selama satu jam. Instalasi peralatan seperti pada skema di Gambar 1.

Data gempabumi yang dijadikan kasus dalam analisa adanya prekursor gempabumi adalah data kejadian gempabumi yang dicatat BMKG dengan dengan perhitungan batasan jarak berdasarkan penelitian Dobrovolsky (1979) bahwa radius zona manifestasi prekursor yang efektif bergantung pada magnitudo gempabumi dan bisa dihitung menggunakan rumus empiris:

$$R_D = 10^{0.43 \times M} \quad (1)$$

Dimana R_D adalah radius strain dalam km dan M adalah magnitudo gempabumi. Berdasarkan kriteria tersebut, dalam rentang waktu Januari - Nopember 2012 tercatat empat kejadian gempabumi yang disebutkan pada tabel 1.



Gambar 1. Skema instalasi monitoring gas radon. [16]

Sebaran gempabumi yang dijadikan studi kasus dalam analisa ditunjukkan pada Gambar 2. Sebagai data pendukung digunakan data curah hujan yang berfungsi untuk mengkonfirmasi apakah anomali pada pengamatan disebabkan oleh faktor meteorologi atau karena merupakan prekursor gempabumi.

Metode pengolahan data gas radon, suhu, dan kelembaban udara dalam tanah menggunakan teknik statistik (*running average*) pada data rata-rata hariannya. Data suhu yang digunakan untuk pengolahan data adalah selisih antara suhu maksimum (T_{mak}) dengan suhu minimumnya (T_{min}).

Analisa hasil dilakukan secara terpisah untuk mengetahui karakteristik data dalam domain waktu sepanjang rentang waktu. Selanjutnya dilakukan identifikasi anomali yang diduga sebagai indikator prekursor, kemudian dengan informasi data gempabumi dihitung rentang waktu kemunculan anomali.

Tabel 1. Data gempabumi yang dijadikan studi kasus dalam analisa prekursor gempabumi

No.	Tanggal	Waktu	Lintang	Bujur	Kedalaman	Magnitudo	Jarak Episenter
1.	15/04/2012	02:26:41	-7,09	105,17	70	5,8	153,67
2.	04/06/2012	18:18:15	-7,81	106,29	70	5,7	96,54
3.	01/11/2012	21:12:00	-6,89	107,45	140	5,7	100,40
4.	09/09/2012	01:27:16	-6,75	106,58	10	4,6	25,75



Gambar 2. Sebaran gempabumi yang dijadikan studi kasus dalam analisa prekursor gempabumi

3. Hasil dan Pembahasan

Dalam menganalisa data yang berkaitan geo-atmosferik dan geokimia sangat penting untuk memperhatikan kondisi meteorologi di daerah pengamatan yang sangat berhubungan dengan parameter yang diamati. Kondisi meteorologi yang dimaksud adalah curah hujan yang digunakan sebagai konfirmasi apakah anomali radon, suhu, dan kelembaban tanah terkait dengan peningkatan curah hujan [16].

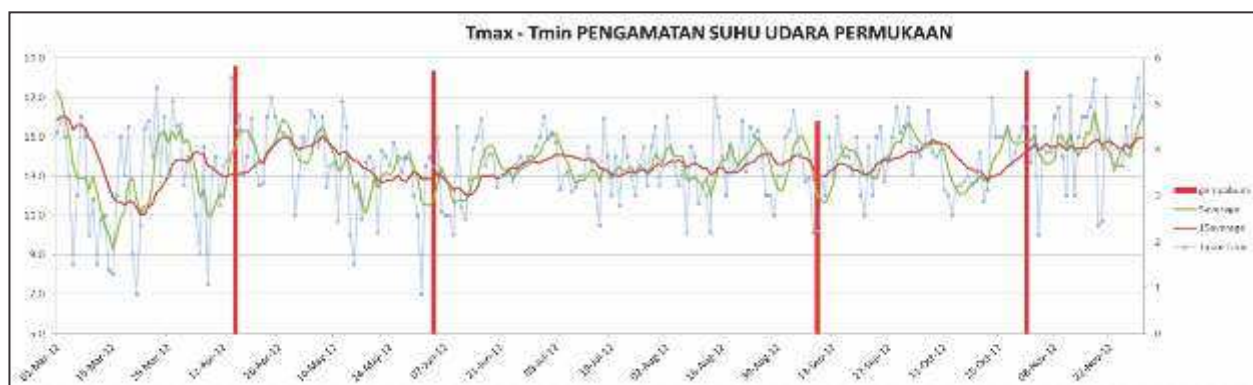
Berdasarkan grafik pada Gambar 3, hujan yang terjadi sepanjang tahun 2012 masih dalam batasan normal. Hujan terjadi sepanjang Januari – Mei 2012, dan pada bulan Juni – September 2012 tidak ada hujan. Curah hujan kembali meningkat mulai bulan Oktober 2012. Tidak adanya hujan pada bulan Juni-September memungkinkan adanya anomali yang terjadi pada rentang waktu tersebut tidak dipengaruhi oleh faktor meteorologi.

Analisa Parameter Geo-atmosferik (Suhu Udara Permukaan). Hasil penelitian Dunajeka dan Pulinets[7] menyatakan bahwa anomali suhu dan kelembaban ditunjukkan oleh perubahan yang tajam sekitar satu minggu sebelum gempabumi utama. Perubahan ini diikuti oleh kenaikan jangkauan suhu dan penurunan variasi kelembaban kemudian naik sebelum gempabumi terjadi [16].

Berdasarkan penelitian Pulinets dan Dunajeka[10], terdapat beberapa tipe indikator prekursor gempabumi berdasarkan data T_{max} - T_{min} yang pada umumnya berupa penurunan yang diikuti dengan kenaikan sebelum gempabumi terjadi. Dari grafik pengamatan suhu udara permukaan (Gambar 4) tampak beberapa karakter yang sesuai dengan indikator tersebut. Data kejadian gempabumi yang menjadi studi kasus diplot pada rentang waktu tersebut untuk mengetahui hubungan antara anomali dengan kejadian gempabumi.



Gambar 3. Grafik curah hujan di Observatori Geofisika Pelabuhan Ratu bulan Januari-November 2012



Gambar 4. Grafik hasil pengamatan suhu udara permukaan. Garis biru muda merupakan nilai Tmax-Tmin dari pengukuran suhu udara permukaan, garis hijau dan merah adalah rata-rata (*running average*). Blok kuning adalah anomali yang diduga sebagai prekursor gempa bumi. Anak panah menunjukkan indikator prekursor gempa bumi merujuk pada hasil Pulinets [7].

Pada gempa bumi 15 April 2012 (M5,8) dengan jarak 153 km ditemukan indikator prekursor dengan adanya penurunan kurva Tmax – Tmin sebesar 13° yang diikuti kenaikan kurva 10,5° mulai tanggal 16 Maret 2012 atau 30 hari sebelum gempa bumi terjadi. Pada gempa bumi tanggal 4 Juni 2012 (M5,7) indikator prekursor ditemukan dengan adanya penurunan sebesar 8,2° yang diikuti kenaikan 6,2° mulai tanggal 15 Mei 2012 atau 20 hari sebelum gempa bumi terjadi. Untuk gempa bumi tanggal 9 September 2012 (M4,6) tidak ditemukan indikator prekursor pada parameter geo-atmosferik. Pada kejadian gempa bumi tanggal 1 Nopember 2012 (M5,7) yang berjarak 100 km dari Observatorium Geofisika Pelabuhan Ratu, ditemukan indikator prekursor dimana terjadi penurunan sebesar 5,3° yang kemudian diikuti kenaikan kurva nilai Tmax-Tmin sebesar 6° sekitar 16 hari sebelum terjadinya gempa bumi yaitu pada tanggal 13 Oktober 2012.

Hasil yang ditunjukkan pada parameter geo-atmosferik ini bukan merupakan indikator langsung dari aktivitas tektonik namun menggambarkan reaksi atmosfer terhadap ionisasi udara yang disebabkan oleh gas radon. Berdasarkan teori kopling Litosfer-Atmosfer-Ionosfer membuktikan kemungkinan perubahan suhu udara permukaan melalui ionisasi udara yang dihasilkan oleh peningkatan emisi gas radon sebelum gempa bumi.

Anomali pada parameter ini mempunyai gangguan yang sangat besar seperti kemunculan partikel alpha dan gamma yang berasal dari penjararan kosmos galaksi. Namun demikian dalam skala lokal, variasi suhu udara terkait dengan ionisasi udara yang dihasilkan oleh gas radon bisa digunakan sebagai indikator adanya variasi gas radon di udara yang didukung oleh banyaknya penelitian tentang anomali suhu pada saat gempa bumi besar di dunia yang menunjukkan pola variasi anomali suhu yang sama. Tentu saja proses termodinamika di dalam atmosfer

bumi sangat kompleks dan banyak faktor meteorologis yang harus diperhatikan.

Keunggulan penelitian ini yaitu melakukan pengamatan parameter geo-atmosferik dan geokimia secara langsung di lokasi yang sama. Analisa hasil proses data didasarkan tidak hanya pada mekanisme fisis yang berkembang namun juga berdasarkan kemiripan variasi parameter atmosfer yang ditunjukkan gempa bumi lain di seluruh dunia.

Analisa Parameter Geokimia (Radon, Suhu dan Kelembaban Tanah). Grafik suhu dan kelembaban tanah (Gambar 5) menunjukkan adanya beberapa karakter sebagai indikator prekursor gempa bumi. Untuk gempa bumi 15 April 2012 (M5,8), dari grafik suhu ditemukan indikator prekursor berupa kenaikan suhu sebesar 3° kemudian suhu turun sebesar 3,2°. Anomali ditemukan mulai tanggal 20 Maret 2012 atau 26 hari sebelum terjadinya gempa bumi. Untuk nilai kelembaban terus meningkat sampai 71,3% (kenaikan sebesar 7%) dari tanggal 26 Maret 2012 sampai 5 Mei 2012.

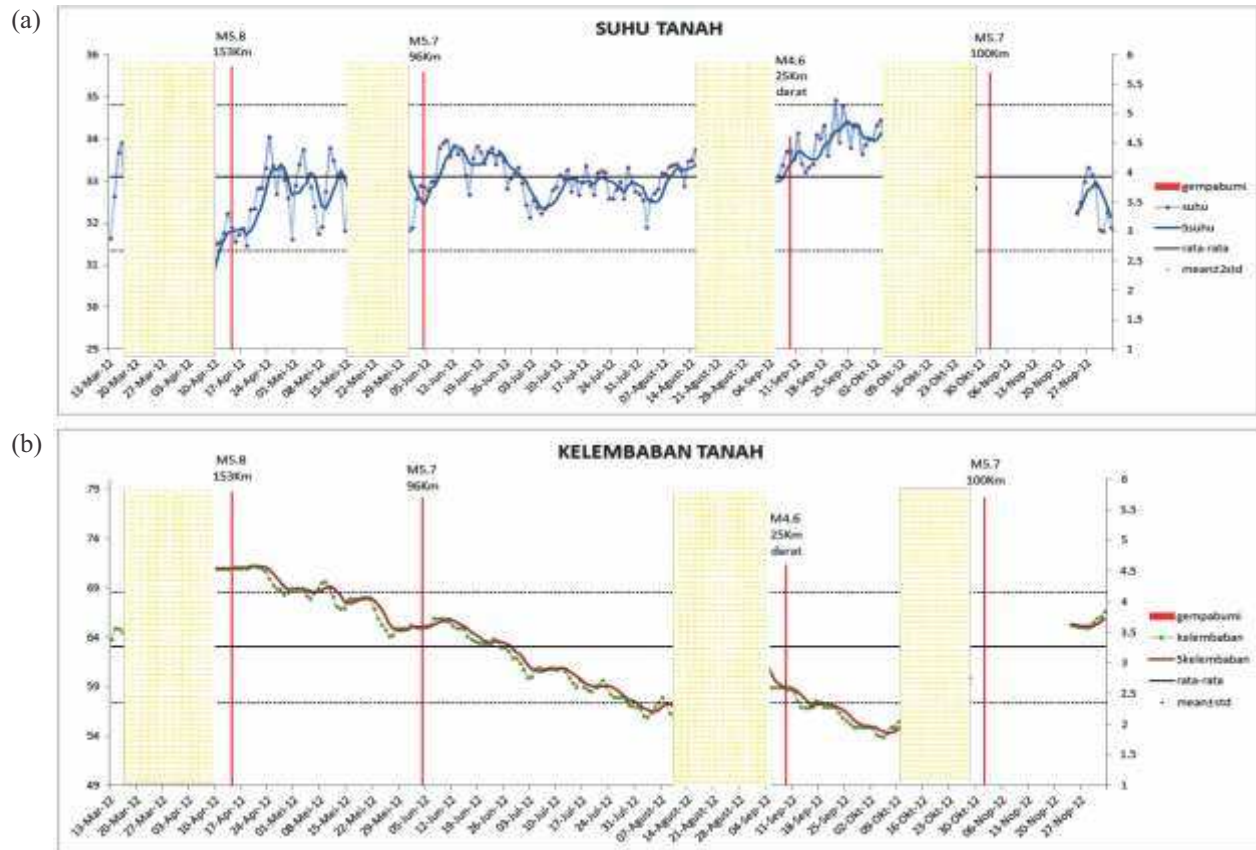
Pada gempa bumi 4 Juni 2012 (M5,7) yang berjarak 96 km dari Observatorium geofisika Pelabuhan Ratu, tampak ditemukan indikator prekursor pada grafik suhu mulai tanggal 14 Mei 2012 atau 21 hari sebelum kejadian gempa bumi, yaitu kenaikan suhu sebesar 2,6° yang diikuti penurunan suhu sebesar 2,6°. Namun pada grafik kelembaban, tidak ditemukan adanya anomali yang dicurigai sebagai prekursor gempa bumi.

Pada gempa bumi tanggal 9 September 2012 (M4,6) ditemukan indikator prekursor dari grafik suhu yang naik sebesar 1,5° kemudian turun sebesar 1,5°. Anomali ditemukan mulai tanggal 17 Agustus 2012 atau 23 hari sebelum kejadian gempa bumi. Pada grafik kelembaban terjadi penurunan yang diikuti oleh kenaikan sangat drastis yaitu sebesar 21% pada tanggal 14 Agustus hingga 6 September 2012.

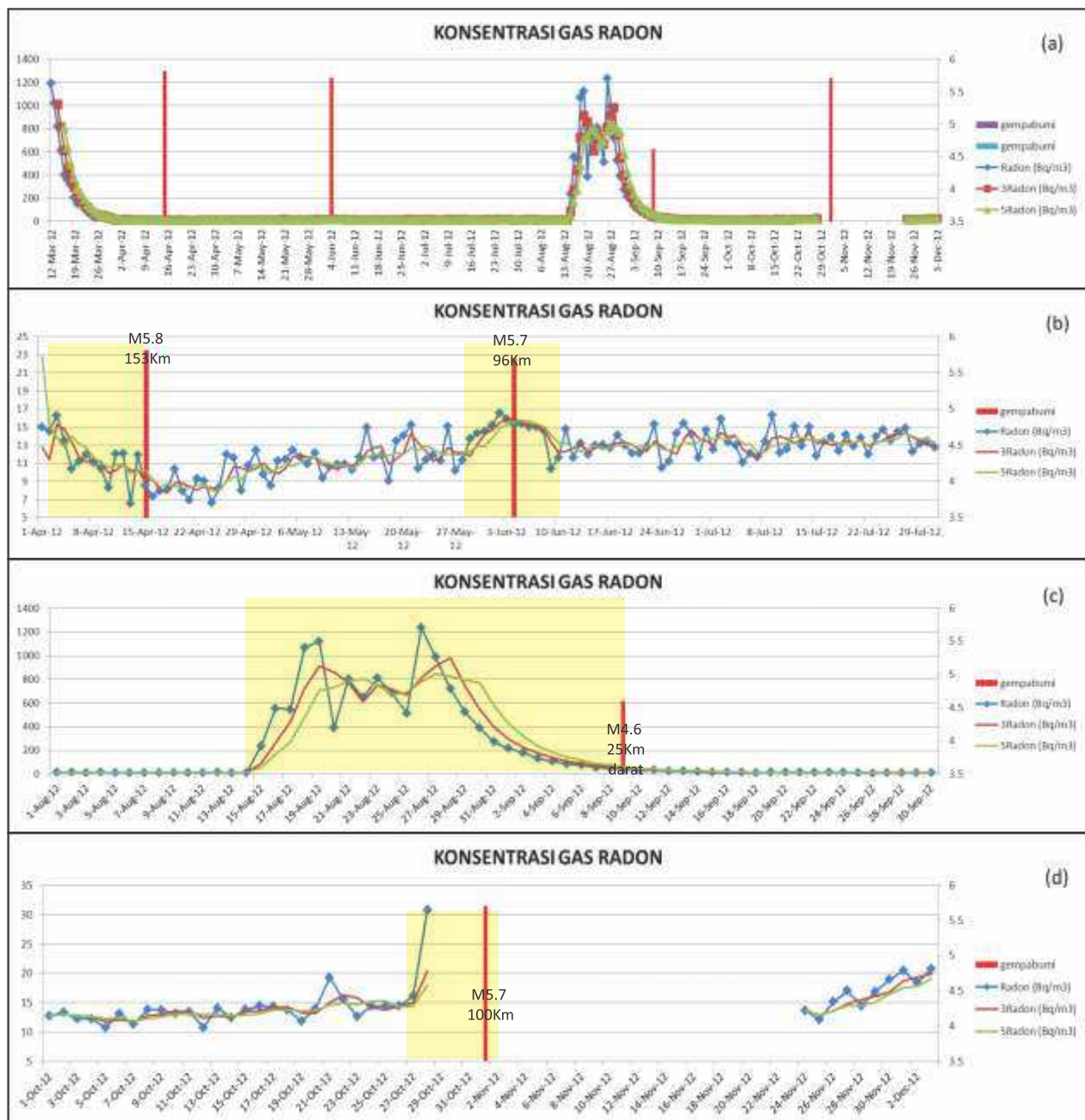
Sementara untuk gempabumi 1 Nopember 2012 (M5,7) tampak indikator prekursor berupa kenaikan suhu sebesar $1,6^{\circ}$ mulai tanggal 10 Oktober 2012 atau 22 hari sebelum kejadian gempabumi dan turun sebesar 4° yang kemudian naik kembali sebesar $3,2^{\circ}$ pada tanggal 20 Oktober 2012. Nilai kelembaban turun pada tanggal 21 September 2012 yang kemudian mulai naik pada 7 Oktober 2012 sampai 23 Oktober 2012 sebesar 6% dan tidak lama kemudian terjadi gempabumi.

Pada gempabumi pada tanggal 9 September 2014 tidak terdeteksi adanya anomali pada suhu

permukaan dan anomali pada suhu tanah dapat terlihat walaupun nilainya sangat kecil. Hal ini disebabkan oleh magnitudo gempabumi yang kecil (M4,6), sedangkan untuk menghasilkan anomali suhu permukaan diperlukan suatu mekanisme persiapan gempabumi yang lebih besar dan luas. Sedangkan pada parameter kelembaban tanah, anomali yang tercatat sangat besar, hal ini disebabkan oleh lokasi episenter gempabumi yang dekat ke stasiun pengamatan dengan jarak 25,75 km dan kemungkinan berkaitan dengan proses ionisasi yang besar karena kemunculan gas Radon yang besar pula.



Gambar 5. (a) Grafik suhu di dalam tanah, (b) Grafik jangkauan suhu di dalam tanah dan (c) Grafik kelembaban di dalam tanah. Plot garis biru merupakan rata-rata (*running average*) suhu dan jangkauan suhu, sedangkan plot garis merah menunjukkan rata-rata (*running average*) kelembaban



Gambar 6. Grafik konsentrasi gas radon. Garis hijau dan merah merupakan nilai rata-rata (*running average*), dan blok kuning menunjukan anomali yang diduga sebagai prekursor gempa bumi.

Hasil monitoring radon ditunjukkan pada Gambar 6. Gambar kurva dibagi dalam beberapa segmen karena tingginya kenaikan nilai radon pada bulan Agustus sehingga fluktuasi kenaikan gas pada bulan lain yang tidak begitu tinggi tidak terlihat jika dibuat dalam 1 gambar kurva. Data kejadian gempa bumi yang menjadi studi kasus diplot pada rentang waktu tersebut untuk mengetahui hubungan antara anomali yang muncul dengan kejadian gempa bumi.

Grafik dibagi menjadi tiga rentang waktu yaitu tanggal 1 April – 31 Juli 2012, tanggal 1 Agustus – 30 September 2012, dan tanggal 1 Oktober – 3 Desember

2012. Pada parameter ini terdapat adanya kekosongan data pada bulan Nopember.

Penelitian Pulinets dan Dunajevka[7] dan Murat, et. al.[8] menunjukkan bahwa anomali gas radon yang diduga sebagai prekursor gempa bumi adalah munculnya kenaikan konsentrasi gas. Pada gempa bumi tanggal 15 April 2012 (M5,8) belum bisa ditentukan kapan prekursor mulai terlihat karena data yang direkam baru dimulai awal April 2012, namun demikian tampak bahwa ada kenaikan gas radon sebesar 1,5 kali dari normalnya yang kemudian turun sebelum gempa bumi terjadi.

Kemunculan anomali gas radon muncul pada tanggal 27 Mei – 9 Juni 2012 yang mirip dengan pola anomali dari Murat. Pada rentang waktu tersebut terjadi gempabumi berkekuatan M5,7 tanggal 4 Juni 2012 yang menunjukkan kemunculan anomali kenaikan konsentrasi gas radon mencapai 1,5 kali harga normalnya yang terdeteksi 8 hari sebelum kejadian hingga kembali turun ke posisi normal 5 hari setelah gempabumi terjadi.

Anomali kenaikan konsentrasi gas radon yang sangat signifikan ditemukan mulai tanggal 15 Agustus hingga 11 September 2012 dimana pada rentang waktu tersebut terjadi gempabumi berkekuatan M4,6 pada tanggal 9 September 2012. Konsentrasi gas radon meningkat sangat drastis mencapai 60 kali nilai normalnya yang terdeteksi 25 hari sebelum kejadian gempabumi hingga 2 hari setelah gempabumi. Tingginya kenaikan radon kemungkinan disebabkan karena dekatnya episenter gempabumi ke stasiun pengamatan dengan jarak 25,75 km dan kedalaman gempabumi yang relatif dangkal, yaitu 10 km, sehingga memberikan tanda prekursor yang besar.

Pada tanggal 26 – 28 Oktober 2012 konsentrasi gas radon kembali mengalami peningkatan sebesar 2,5 kali harga normalnya. Namun tanggal 29 Oktober hingga 25 Nopember 2012 terdapat kekosongan data karena kerusakan pada sensor. Lalu pada tanggal 1 November 2012 terjadi gempabumi berkekuatan 5.7 SR sehingga dapat dikatakan bahwa prekursor berupa kenaikan nilai radon muncul 3 hari sebelum gempabumi terjadi.

Peningkatan konsentrasi radon terjadi pada saat pembentukan *microcracks*, merekah, dan retak karena *dilatancy* sebelum gempabumi terjadi. Menurut mekanisme *dilatancy* kejadian gempabumi

pada saat stres regional meningkat, pelebaran massa batuan dapat menyebabkan peningkatan luas permukaan batuan akibat retak[17]. Retakan yang sangat kecil pada batuan membebaskan radon yang terjebak sehingga dapat meningkatkan konsentrasi gas radon pada tanah dekat permukaan bumi. Penurunan anomali gas radon kemungkinan disebabkan oleh efek meremas stres kompresi pada batuan, yang merubah porositas batuan pada skala mikro[18,19].

Pada penelitian ini, anomali radon ditunjukkan dengan adanya peningkatan konsentrasi gas yang terkait dengan proses deformasi berupa pembentukan *microcracks* sebelum gempabumi terjadi. Kemunculan anomali yang mengindikasikan pembentukan *microcracks* ini terdeteksi sekitar 3 - 30 hari sebelum gempabumi terjadi sehingga parameter ini termasuk dalam prekursor jangka pendek.

Rekapitulasi rentang waktu kemunculan anomali dan besar anomali yang diduga sebagai prekursor gempabumi untuk masing-masing parameter dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian prekursor gempabumi di Pelabuhan Ratu sepanjang tahun 2012 diperoleh kesimpulan bahwa ditemukan adanya anomali geo-atmosferik dan geokimia sebelum terjadinya gempabumi. Anomali pada parameter geo-atmosferik yang dicurigai sebagai prekursor gempabumi ditunjukkan dengan adanya pola penurunan sebesar $5,3^{\circ}$ - 13° yang diikuti kenaikan sebesar 6° - $10,5^{\circ}$ pada nilai T_{max} - T_{min} . Pada parameter geokimia, tampak adanya pola kenaikan pada kurva emisi radon, suhu dan kelembaban tanah.

Tabel 2. Rekapitulasi rentang waktu kemunculan anomali yang diduga sebagai prekursor gempabumi

Parameter	Rentang Kemunculan Anomali Sebelum Gempabumi			
	15 April 2012 M5,8; 153km	4 Juni 2012 M5,7; 96km	9 Sept 2012 M4,6; 25km	1 Nov 2012 M5,7; 100km
Geo-atmosferik				
Suhu permukaan	30 hari	20 hari	-	18 hari
Geokimia				
Suhu tanah	26 hari	21 hari	23 hari	21 hari
Kelembaban tanah	20 hari	-	27 hari	40 hari
Radon	Data kurang	8 hari	25 hari	3 hari

Tabel 3. Rekapitulasi besar anomali yang diduga sebagai prekursor gempabumi

Parameter	Besar Anomali			
	15 April 2012 M5,8; 153km	4 Juni 2012 M5,7; 96km	9 Sept 2012 M4,6; 25km	1 Nov 2012 M5,7; 100km
Geo-atmosferik				
Suhu permukaan	- 13° & + $10,5^{\circ}$	- $8,2^{\circ}$ & + $6,2^{\circ}$	-	- $5,3^{\circ}$ & + 6°
Geokimia				
Suhu tanah	+ 3° & - $3,2^{\circ}$	+ $2,6^{\circ}$ & - $2,6^{\circ}$	+ $1,5^{\circ}$ & - $1,5^{\circ}$	+ $1,6^{\circ}$; - 4° ; + $3,2^{\circ}$
Kelembaban tanah	7%	-	21%	6%
Radon	1,5 kali	1,5 kali	60 kali	2,5 kali

Kenaikan konsentrasi radon terdeteksi sebesar 1,5 sampai 60 kali dari nilai normalnya. Peningkatan atau penurunan konsentrasi radon menyebabkan adanya penurunan atau peningkatan kelembaban udara relatif dan perubahan suhu. Kenaikan kelembaban terdeteksi sebesar 6%-21%, sementara perubahan suhu tanah ditunjukkan dengan peningkatan sebesar 1,5°-3,2° yang diikuti dengan penurunan sebesar 1,5°-4°.

Kemunculan anomali pada parameter geo-atmosferik dan geokimia tampak dalam rentang waktu 3 hingga 40 hari sebelum kejadian gempabumi. Dengan demikian menunjukkan bahwa parameter geo-atmosferik dan geokimia termasuk dalam prekursor jangka pendek yang berhubungan dengan proses deformasi di wilayah pengamatan sebelum gempabumi.

Saran. Saat ini, sensor radon yang terpasang untuk pengamatan prekursor gempabumi baru terdapat di Stasiun Observatori Geofisika Pelabuhan Ratu. Diperlukan penambahan alat sensor radon, di stasiun Observatori Pelabuhan Ratu maupun di stasiun pengamatan yang relatif jauh sebagai *remote station*, untuk mengetahui apakah anomali yang terjadi merupakan anomali lokal atau regional. Selain itu, diperlukan penelitian lebih lanjut dengan data yang lebih banyak untuk mengetahui konsistensi kemunculan anomali.

Daftar Pustaka

- [1]Scholz, C.H. (1968). The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 58, 399-415.
- [2]Nuannin P., Kulhanek, O. &Persson, L. (2006).Spatial and temporal b value anomalies preceding the devastating off coast of NW Sumatra earthquake of December 26, 2004.*Geophys. Res. Let.*, 32,L11307.
- [3]Prattes, G., (2011). Ultra low Frequency (ULF) European multi station magnetic field analysis before and during the 2009 earthquake at L'Aquila regarding regional geotechnical information. *Natural Hazards and Earth System Sciences*,11, 1959–1968.
- [4]Hattori, K.(2007). *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.
- [5]Yumoto, K., Ikemoto S., Cardinal, M.G, Hayakawa, H., Hattori, K., Liu J.Y., et.al. (2009). *A new ULF wave analysis for Seismo-Electromagnetics using CPMN/MAGDAS data* Physics dan Chemistry of the Earth, Parts A/B/CVolume 34, Issues 6-7, 2009, pp. 360-366 Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes dan Volcanoes.
- [6]Xuemin, Z.&Xuhui, S. (2011).Electromagnetic Anomalies around TheWenchuan Earthquake and Their Relationship with Earthquake Preparation.*International Journal of Geophysics*, Volume 2011, Article ID 904132, 8 pages. Hindawi Publishing Corporation, 1-8.
- [7]Pulinets, S.A. &Dunajevka, M.A. (2007).Specific variations of air temperature and relative humidity around the time of Michoacan earthquake M8.1 Sept. 19, 1985 as a possible indicator of interaction between tectonic plates, *Tectonophysics*, 431, 221–230.
- [8]Murat M. SAC, Coskun Harmansah, Berkay Camgoz, Hasan Sozbilir (2011).Radon Monitoring as the Earthquake Precursor in Fault Line in Western Turkey,*Ekoloji*,20(79),93-98.
- [9]Nurdiyanto, B., Sunardi, B., Ngadmanto, D., Susilanto, P., Harsa, H., Novianti, S., et. al. (2011). *Integration of Geophysical Parameter Observation in the Earthquake Predictability*, JCM2011-031, Proceedings of the 36th HAGI and 40th IAGI Anual Convention and Exhibition, Makasar.
- [10]Nurdiyanto, B., Sunardi, B., Harsa, H., Ngadmanto, D.,Susilanto, P., Rohadi, S., dkk.(2010). Integrasi Pengamatan Parameter Geofisika dalam usaha Prediktabilitas Gempabumi, *Laporan Akhir Program Intensif Kementrian Negara Riset dan Teknologi*.
- [11]Dunajevka, M.A. &Pulinets, S.A. (2005).Atmospheric and thermal anomalies observed around the time of strong earthquakes in Mexico,*Atmosfera*,18(4),235-244.
- [12]Ulomov, V. I.&B. Z. Mavashev, (1967). A Precursor of a strong tectonic earthquake. *Acad. Sci. USSR Earth Sci. Sect.*, 176, 9-11.
- [13]Sings, S., A. Kumar, B. S. Bajwa, S. Mahajan, V. Kumar, & S. Dhar (2010).Radon Monitoring in Soil Gas and Ground Water for Earthquake Prediction Studies in North West Himalayas, India.*Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*,21(4), 685-695.
- [14]Murjaya,J., Fachrizal, &Utomo, A.M., (2012).

- Studi Awal Prediksi Gempabumi Melalui Fenomena Rekaman Emisi Radon, *Prosiding Scientific Jurnal Club Tahun 2012*, 63-68.
- [15] Dobrovolsky, I.P., Zubkov, S.I., & Miachkin, V.I. (1979). Estimation of the size of earthquake preparation zones. *Pure and Applied Geophysics*, 117(5), 1025–1044.
- [16] Nurdyanto, B., Ngadmanto, D., Muhaimin, Harsa, H., Pakpahan, S., Noviati, S., et al. (2012). *Analysis of The Physical Parameters Variation of The Lithosphere and Ionosphere as Earthquake Precursors*. Proceedings PIT HAGI 2012. 37th HAGI Annual Convention & Exhibition. Palembang.
- [17] Scholz, C. H., L. R. Sykes, & Y. P. Aggarwal. (1973). Earthquake prediction: A physical basis. *Science*, 181, 803-810, doi: 10.1126/science.181.4102.803.
- [18] Ramola, R. C., Y. Prasad., G. Prasad., S. Kumar, & V. M. Choubey. (2008). Soil-gas radon as seismotectonic indicator in Garhwal Himalaya. *Appl. Radiat. Isot.*, 66, 1523-1530, doi: 10.1016/j.apradiso.2008.04.006.
- [19] Kumar, A., S. Singh, S. Mahajan, B. S. Bajwa, R. Kalia, and S. Dhar. (2009). Earthquake precursory studies in Kangra valley of North West Himalayas, India, with special emphasis on radon emission. *Appl. Radiat. Isot.*, 67, 1904-1911, doi: 10.1016/j.apradiso.2009.05.016.