

ANALISIS PERUBAHAN NILAI PARAMETER FISIS DAN KIMIAWI SEBAGAI STUDI PREKURSOR GEMPA BUMI PADA PERIODE 2018 DI WILAYAH YOGYAKARTA

VALUE CHANGE ANALYSIS OF PHYSICAL AND CHEMICAL PARAMETER AS AN EARTHQUAKE PRECURSOR STUDY IN PERIOD OF 2018 IN THE YOGYAKARTA REGION

Divyana Meidita^{1*}, Agustya Adi Martha², Yosi Setiawan³, Supriyanto Rohadi²

¹Jurusan Geofisika, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jl. Perhubungan I No.5, Tangerang Selatan, 15221

²Pusat Penelitian dan Pengembangan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jl. Angkasa I No.2, Jakarta Pusat, 10610

³Stasiun Geofisika Kelas I Deli Serdang – Sumatera Utara

*E-mail: divyana.meidita@stmkg.ac.id

Naskah masuk: 13 Juni 2021

Naskah diperbaiki: 14 Agustus 2021

Naskah diterima: 21 Agustus 2021

ABSTRAK

Gempa bumi merusak pernah terjadi di sekitar Sesar Opak, Yogyakarta pada 27 Mei 2006 dengan kekuatan Mw 6.3. Sebagai upaya mitigasi, BMKG melakukan pengamatan parameter fisis dan kimiawi dengan memasang sensor parameter prekursor gempa bumi di Stasiun Pundong dan Piyungan, Yogyakarta. Data parameter prekursor (radon, suhu udara, geotemperatur, dan ketinggian air tanah) diperoleh dari Pusat Penelitian dan Pengembangan (Puslitbang) BMKG dan data suhu udara tambahan dari *NCEP/NCAR Reanalysis*, sedangkan data parameter gempa bumi diperoleh dari katalog BMKG dengan kriteria magnitudo ≥ 2 dan jarak episenter dalam radius < 100 km pada tahun 2018. Penelitian ini menganalisis variasi nilai parameter prekursor yang diduga berasosiasi dengan aktivitas gempa bumi di wilayah Yogyakarta. Pengolahan data radon menggunakan metode autokorelasi yaitu menetapkan rasio simpangan korelasi dengan standar deviasi lebih kecil dari -1 sebagai batas anomali, data suhu udara dengan menetapkan jumlah rata-rata dan standar deviasi lebih besar dari nilai suhu udara harian, dan data geotemperatur dan ketinggian air tanah dengan metode rata-rata bergerak. Validasi dilakukan secara kuantitatif menggunakan data curah hujan dan secara kualitatif menggunakan data kondisi geologi dari studi literatur. Hasil penelitian menunjukkan adanya indikasi perubahan nilai parameter prekursor sebelum gempa bumi dengan variasi nilai yang dipengaruhi oleh besarnya parameter gempa bumi, tetapi masih sulit dibedakan apakah anomali terjadi akibat aktivitas tektonik atau kondisi hujan.

Kata kunci: anomali, prekursor, gempa bumi, korelasi, curah hujan

ABSTRACT

A destructive earthquake occurred around the Opak Fault, Yogyakarta on May 27th, 2006 with a magnitude of Mw 6.3. As a mitigation effort, BMKG observes physical and chemical parameters by installing earthquake precursor parameter sensors at Pundong and Piyungan Stations, Yogyakarta. Precursor parameter data (radon, air temperature, geotemperature, and groundwater level) were obtained from the BMKG Research and Development Center and additional air temperature data from the NCEP/NCAR Reanalysis, while the earthquake parameter data was obtained from the BMKG catalog with the criteria of magnitude ≥ 2 and the distance of the epicenter within a radius of < 100 km in 2018. This study analyzes the variation of the precursor parameter values that are thought to be associated with earthquake activities in the Yogyakarta region. Radon data processing uses the autocorrelation method, which to determine the correlation deviation ratio with a standard deviation of less than -1 as the anomaly limit, air temperature data by setting the average number and standard deviation greater than the daily air temperature value, and geotemperature and groundwater level data using the moving average method. Validation was carried out quantitatively using rainfall data and qualitatively using geological condition data from literature studies. The results of the study indicate that there is an indication of changes in the value of precursor parameters before the earthquake with variations in values that are influenced by the magnitude of the earthquake parameters, but it is still difficult to decide whether the anomaly occurs due to tectonic activity or rainy conditions.

Keywords: anomaly, precursor, earthquake, correlation, rainfall

1. Pendahuluan

Gempa bumi merusak pernah terjadi di Yogyakarta akibat aktivitas Sesar Opak pada 27 Mei 2006 dengan kekuatan Mw 6,3. Gempa bumi yang relatif dangkal tersebut menimbulkan kerusakan yang parah di daerah Bantul, Yogyakarta, dan Klaten [1]. Melihat potensi bencana gempa bumi yang cukup besar di wilayah ini, maka diperlukan studi lebih lanjut terkait risiko yang akan dihadapi ketika terjadi gempa bumi. Studi mengenai tanda-tanda awal gempa bumi menjadi salah satu hal penting sebagai langkah awal untuk upaya mitigasi.

Sebelum terjadi gempa bumi, akan ada tanda-tanda perubahan kondisi. Penelitian mengenai perubahan nilai TEC [2-3], magnet bumi [4-5], dan parameter geotemperatur [6] telah berkembang untuk studi prekursor gempa bumi. Perubahan kondisi berupa perubahan fisis dan kimiawi pada zona persiapan gempa bumi yang diamati oleh para peneliti sebagai dasar fisis untuk memperkirakan parameter kejadian gempa bumi [7]. Hubungan antara kejadian gempa bumi dengan variasi konsentrasi gas radon dijelaskan melalui model dilatansi yang dikemukakan oleh Scholz dkk. [8-9]. Penelitian pertama yang menunjukkan adanya hubungan antara anomali nilai konsentrasi gas radon dengan kejadian gempa bumi adalah pengamatan radon sebelum gempa bumi Tashkent yang dilakukan oleh Ulomov dan Mavashev tahun 1967 [10]. Kemudian, anomali geotemperatur juga diamati di China. Hasilnya, terjadi anomali sebesar $1,5^{\circ}\text{C}$ [11]. Untuk parameter suhu udara, Tronin dkk. menganalisis anomali suhu untuk penelitian gempa bumi di Jepang dan China. Hasil menunjukkan adanya anomali suhu positif yang berhubungan dengan struktur dan sistem sesar di kerak bumi [12]. Sementara itu, terkait dengan parameter ketinggian air tanah, penelitian Sunardi dkk. menunjukkan terjadi fluktuasi nilai *water level*, tetapi nilainya dipengaruhi oleh curah hujan [13].

Radon (^{222}Rn) merupakan gas radioaktif hasil peluruhan deret uranium dengan waktu paruh sekitar 3,8 hari sehingga termasuk gas yang mudah dideteksi [14]. Retakan yang timbul sebelum gempa bumi akan meningkatkan difusi fluida. Kekuatan tekanan pada pori akan menyebabkan variasi karakteristik kimia dan fisika batuan. Teori *degassing* bumi yang diusulkan oleh Qiang dkk. (1991) juga selaras dengan model dilatansi oleh Scholz dkk. (1973) bahwa pada permulaan retakan kecil, pelepasan gas melalui pori-pori batuan ke atmosfer akan memperkuat kondisi stres di area sekitar lokasi gempa bumi [15]. Struktur geologi seperti retakan, sesar, dan lainnya dapat berfungsi sebagai saluran air dan/ atau gas untuk menjalar sehingga memengaruhi proses degasifikasi [12]. Selain itu, pengaruh stres yang terjadi pada batuan di zona persiapan gempa bumi akan memengaruhi

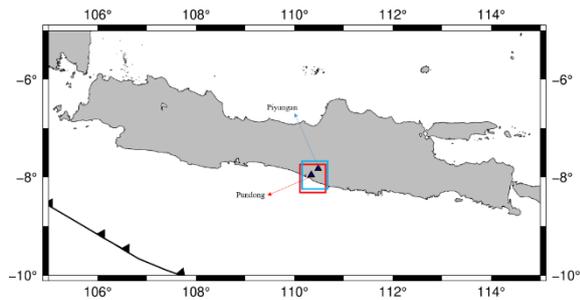
kondisi panas dalam bumi yang mengakibatkan perubahan suhu bawah permukaan. Semakin dalam lapisan tanah, anomali geotemperatur semakin tinggi, tetapi juga semakin sulit diamati [11]. Sedangkan untuk parameter ketinggian air tanah, sebelum gempa bumi, terjadi kenaikan muka air tanah. Saat gempa bumi terjadi, air tanah sempat turun. Hal ini menunjukkan bahwa ada gaya tekan ke dalam (subsiden) saat sebelum gempa bumi sehingga mengangkat level muka air tanah. Berlaku sebaliknya, setelah gempa bumi terjadi, timbul gaya reaksi kembali ke keadaan semula (ekspansi) [16].

Penelitian ini menggunakan data *real-time* dari Puslitbang BMKG yang merupakan hasil rekaman parameter prekursor (radon, geotemperatur, *water level*, dan suhu udara) di Stasiun Pundong dan Piyungan. Selanjutnya, akan dianalisis hubungan antara gempa bumi dengan perubahan nilai parameter prekursor dan faktor yang memengaruhinya dengan masing-masing metode pengolahan data. Pada tahap akhir, variasi nilai parameter prekursor akan divalidasi secara kuantitatif dengan data curah hujan dan secara kualitatif dengan data informasi kondisi geologi lokal.

BMKG tengah berupaya untuk mengembangkan *Earthquake Early Warning Systems*. Walaupun gempa bumi belum dapat diprediksi secara akurat di mana, kapan terjadinya, dan besar kekuatannya, pemantauan perubahan karakteristik fisis dan kimiawi saat sebelum terjadi gempa bumi harus tetap dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat berpengaruh pada ilmu studi prekursor gempa bumi sehingga dapat mendukung perkembangan sistem peringatan dini gempa bumi di Indonesia.

2. Metode Penelitian

Waktu dan Wilayah Penelitian. Waktu penelitian sepanjang tahun 2018 dalam radius 100 km dari stasiun parameter prekursor, sedangkan daerah yang menjadi fokus penelitian secara umum adalah Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Radius 100 km adalah jarak maksimal gempa bumi dari titik pengamatan dan dianggap sebagai zona prekursor [17]. Batas koordinat penelitian di sekitar Stasiun Pundong adalah 109.643° – 111.043° BT dan 7.256° – 8.656° LS, sementara di sekitar Stasiun Piyungan adalah 109.783° – 111.183° BT dan 7.128° – 8.528° LS.



Gambar 1. Peta Pulau Jawa dengan wilayah penelitian (simbol kotak) dan stasiun prekursor (simbol segitiga).

Kriteria Data. Data parameter gempa bumi diperoleh dari katalog BMKG [18] dengan kriteria magnitudo ≥ 2 , jarak episenter ke sensor parameter prekursor dalam radius < 100 km, dan kedalaman < 100 km. Radius 100 km dianggap sebagai zona prekursor, walau tidak semua gempa yang berada pada zona tersebut didahului anomali karena

bergantung pada magnitudo dan jarak seperti pada persamaan Hauksson dan Goddard [19]:

$$M \geq 2,4 \log 10D - 0,43 \quad (1)$$

M didefinisikan sebagai besar magnitudo dan D adalah jarak episenter ke sensor radon. Pada penelitian ini, terdapat 17 dan 13 kejadian gempa bumi yang terekam dalam radius 100 km dari Stasiun Pundong dan Piyungan selama periode 2018 yang dapat dilihat pada Tabel 1. Sementara itu, data radon, suhu udara, geotemperatur, ketinggian air tanah, dan curah hujan diperoleh dari Puslitbang BMKG. Data tersebut memiliki resolusi 60 menit dan digunakan rata-rata hariannya (*daily average*) dalam pengolahan masing-masing parameter prekursor. Sebagai data tambahan, digunakan data suhu udara dalam rentang waktu 1985 – 2014 yang diperoleh dari *NCEP/NCAR Reanalysis* sebagai batas anomali, yaitu data suhu pada ketinggian 2 meter di atas permukaan tanah [20].

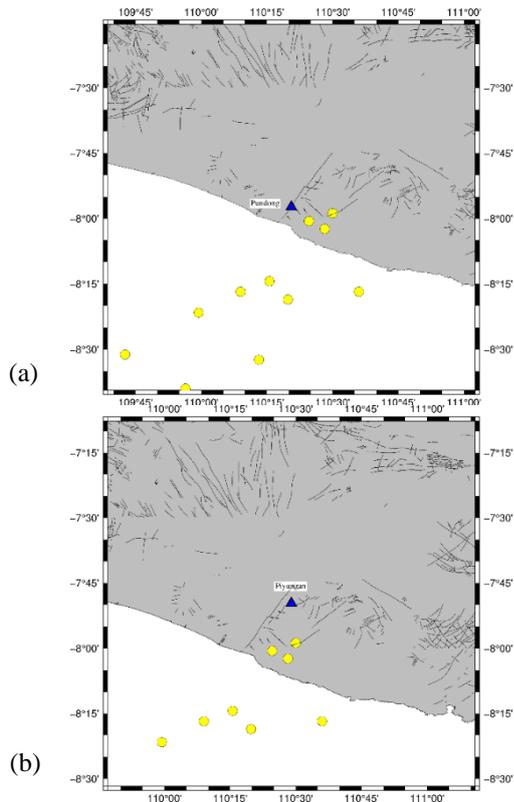
Tabel 1. Data parameter gempa bumi yang dijadikan studi kasus penelitian.

No	Tanggal	Origin Time (UTC)	Lintang	Bujur	Mag (Mw)	Ked (km)	Jarak (km) dari	
							Pundong	Piyungan
1	03/01/2018	03.52.39	-8.28	110.6	3.3	24.9	45.9	51.8
2	04/02/2018	15.30.31	-8.66	109.94	3.1	12.7	90.0	Tidak terekam
3	08/02/2018	11.41.46	-8.31	110.33	3.4	75.3	39.3	56.1
4	25/03/2018	10.39.24	-8.01	110.41	2.7	10	9.6	21.8
5	10/04/2018	23.10.25	-8.36	109.99	3.8	70.7	59.6	80.5
6	13/04/2018	21.51.00	-8.28	110.15	2.6	11.1	41.9	62.3
7	15/04/2018	08.36.02	-8.31	110.33	3.5	83.5	39.3	56.1
8	19/04/2018	07.17.26	-8.24	110.26	2.8	54.4	32.8	52.0
9	23/04/2018	05.50.38	-8.04	110.47	2.9	10	16.9	23.6
10	23/04/2018	04.55.12	-8.54	110.22	3.1	88.4	66.2	Tidak terekam
11	27/04/2018	19.22.23	-7.98	110.5	2.7	10	17.6	17.0
12	22/05/2018	04.35.30	-8.52	109.71	2.9	22	94.1	Tidak terekam
13	28/08/2018	03.56.26	-8.19	109.91	2.8	10	54.6	75.2
14	12/10/2018	23.23.35	-7.29	109.92	2.6	10	87.6	86.4
15	28/10/2018	18.38.39	-8.45	110.99	4.4	10	90.4	89.1
16	02/11/2018	15.13.51	-8.62	110.01	2.9	10	82.5	Tidak terekam
17	06/11/2018	13.03.46	-8.33	110.54	2.9	16.7	46.9	56.1

Pengolahan Data. Data radon diolah dengan menerapkan teknik autokorelasi pada nilai radon harian dengan variasi diurnal radon untuk mengidentifikasi anomali nilai konsentrasi gas radon yang terjadi. Variasi radon dapat dianggap anomali apabila rasio nilai simpangan koefisien korelasi dengan standar deviasi koefisien korelasi kurang dari -1 ($skk/dskk < -1$) [21]. Pengolahan data suhu udara melibatkan analisis deret waktu (*time series*). Variasi suhu udara dapat dianggap anomali apabila nilai suhu udara harian diatas nilai rata-rata ditambah standar deviasi ($\mu + \sigma$) dari data *NCEP/NCAR Reanalysis* 30 tahun sebelum data penelitian [22]. Sementara itu, pengolahan data

geotemperatur menggunakan variasi rata-rata bergerak (*statistical moving average*) dari jangkauan data geotemperatur setiap harinya [8]. Pengolahan data ketinggian air tanah juga menggunakan rata-rata bergerak pada nilai harian rata-rata data (μ). Analisis data dilakukan dengan melihat perubahan pola dari parameter geotemperatur pada setiap jangka waktu [13]. Sebagai validasi, digunakan perhitungan koefisien korelasi Pearson dari setiap data parameter prekursor terhadap data curah hujan. Jika nilai koefisien $> 0,5$ atau koefisien $< -0,5$, variabel dikatakan memiliki tingkat korelasi yang kuat [23].

3. Hasil dan Pembahasan



Gambar 2. Kejadian gempa bumi (lingkaran kuning) di sekitar Stasiun (a) Pundong dan (b) Piyungan pada periode Januari – Juni 2018.

Analisis Perubahan Nilai Parameter Prekursor dan Kejadian Gempa Bumi Periode Januari – Juni 2018. Dalam rentang waktu Januari – Juni 2018, tercatat 12 dan 9 kejadian gempa bumi dalam radius 100 km dari Stasiun Pundong dan Piyungan.

Variabilitas gas radon di Stasiun Pundong menunjukkan nilai yang relatif lebih tinggi dibanding Stasiun Piyungan. Konsentrasi gas radon di Stasiun Pundong memiliki rentang nilai 0,2483 – 3,0440 Bq/L, sedangkan di Stasiun Piyungan dalam rentang 0,0050 – 1,3761 Bq/L. Pada Gambar 3 (b), nilai skk/dskk di Stasiun Pundong mengalami penurunan di bawah -1 yang diikuti kejadian gempa bumi (mengindikasikan anomali) pada tanggal 21 dan 30 Januari, 6 dan 8 Februari, 3, 11, dan 17 April, dan 8 Mei. Sementara di Stasiun Piyungan, pada Gambar 4 (b) nilai skk/dskk yang mengindikasikan anomali pada tanggal 4 dan 6 Februari serta 15 dan 17 April. Jika dilihat dari nilai radon harian (Gambar 3 (a) dan 4 (a)), di Stasiun Pundong tidak terlihat anomali hingga akhir Februari sehingga tiga gempa bumi pada bulan tersebut dianggap *missed*. Lalu, serangkaian gempa bumi pada bulan April didahului anomali yang terlihat signifikan. Fluktuasi nilai radon harian mengalami kenaikan perlahan dari

bulan Maret hingga Juni. Di Stasiun Piyungan fluktuasi nilai radon harian tidak terlihat, walaupun nilai skk/dskk di beberapa waktu menunjukkan nilai di bawah ambang batas anomali.

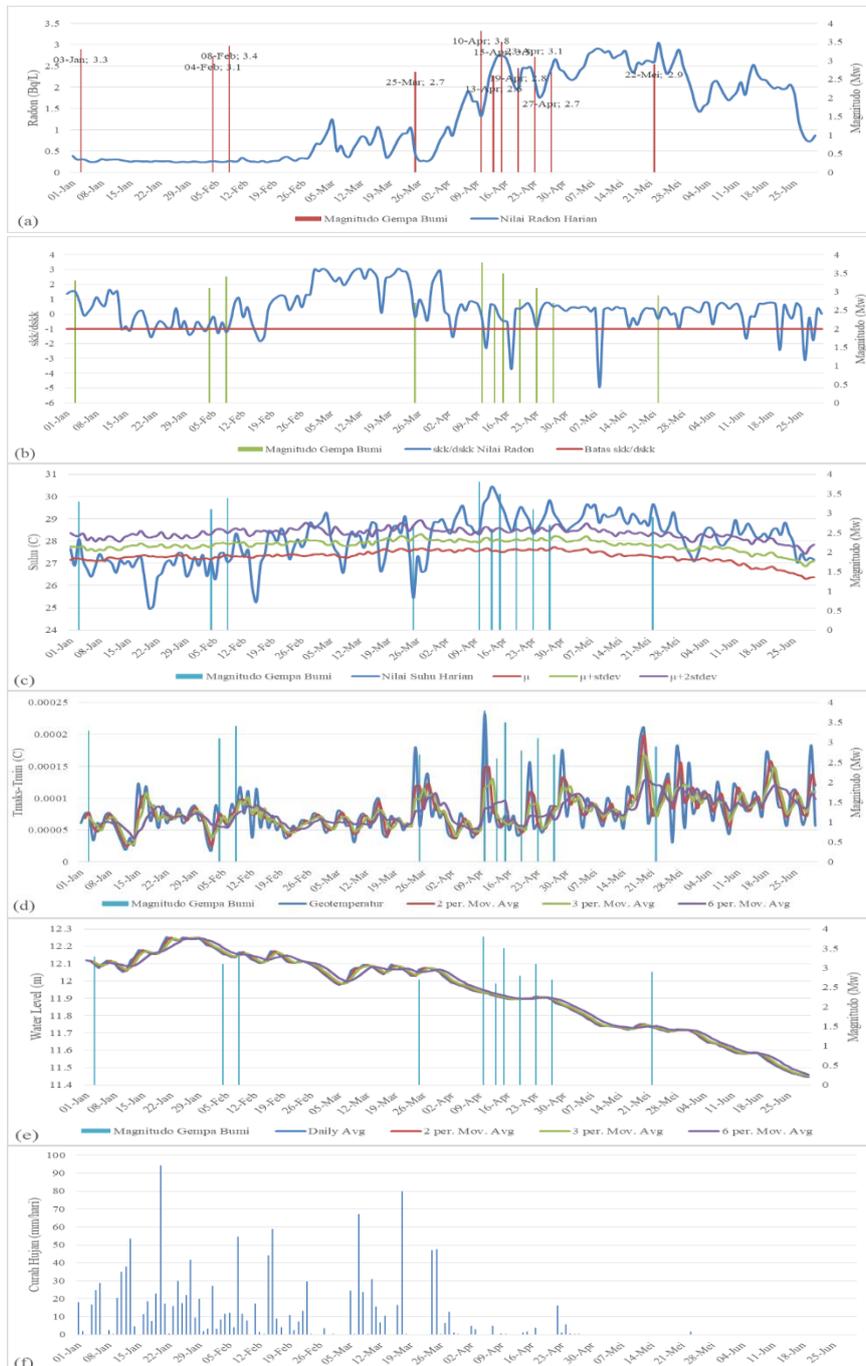
Untuk parameter suhu udara, Gambar 3 (c) yang merupakan hasil rekaman di Stasiun Pundong sebagian besar menunjukkan nilai suhu udara harian berada di bawah nilai ambang batas anomali. Pada Tabel 2, hasil perhitungan koefisien korelasi Pearson untuk parameter suhu udara di Stasiun Pundong terhadap nilai curah hujan memiliki hubungan yang kuat. Ini menimbulkan dugaan bahwa nilai suhu harian dalam rentang waktu tersebut lebih banyak dipengaruhi aktivitas cuaca lokal, bukan karena aktivitas gempa bumi. Grafik curah hujan pada Gambar 3 (f) juga menunjukkan akumulasi curah hujan dengan intensitas lebat hingga sangat lebat pada Januari – Maret sehingga anomali yang terjadi untuk gempa bumi pada periode ini tidak dapat diindikasikan sebagai prekursor gempa bumi. Namun, dalam rentang waktu April – Juni, kondisi cuaca lokal mendukung untuk mengidentifikasi anomali prekursor sebab tidak terjadi hujan dengan intensitas lebat atau sangat lebat (kondisi kering). Hal ini dapat dilihat pada gempa bumi 10 April (M 3,8), 13 April (M 2,6), 15 April (M 3,5), 19 April (M 2,8), 23 April (M 3,1), 27 April (M 2,7), dan 22 Mei (M 2,9). Gempa bumi yang terjadi relatif dalam jangka waktu dekat (beruntun) dan mengindikasikan anomali prekursor dengan nilai suhu udara di atas ambang batas selama periode tersebut. Sementara itu, di Stasiun Piyungan, tidak ditemukan nilai suhu udara harian yang melebihi batas anomali.

Dilatansi batuan menyebabkan efek signifikan pada kejadian sebelum gempa bumi. Pelebaran pori-pori batuan memungkinkan air tanah dan gas yang terperangkap akan bergerak lebih dalam sehingga batuan menjadi lebih hangat. Oleh karena itu, anomali geotemperatur dapat teramati walau dengan nilai yang relatif kecil [13] [24].

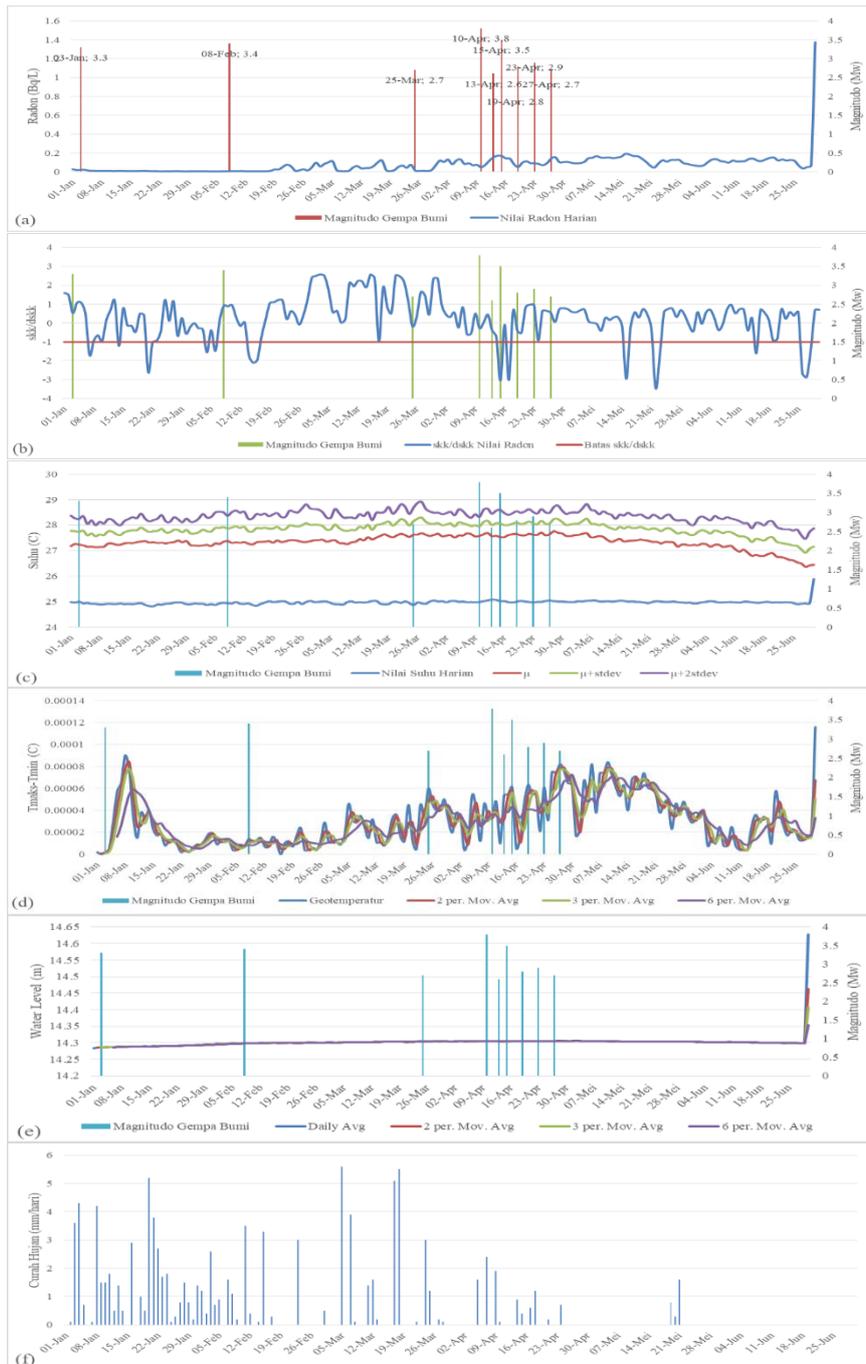
Nilai jangkauan suhu bawah permukaan ($T_{maks} - T_{min}$) pada periode Juli – Desember 2016 baik di Stasiun Pundong maupun Piyungan menunjukkan variasi yang sangat kecil, yaitu mencapai $1/1.000.000$ °C. Variasi nilai jangkauan suhu di Stasiun Pundong dalam rentang 0,000019 – 0,00023 °C dan di Stasiun Piyungan 0,000001 – 0,00011 °C. Pada Gambar 3 (d) dan 4 (d), hasil rekaman nilai jangkauan suhu bawah permukaan menunjukkan pola yang sama, yaitu berupa kenaikan beberapa hari sebelum gempa bumi yang diikuti penurunan hingga hari kejadian. Hal ini lebih terlihat ketika ada serangkaian gempa bumi yang terjadi dalam waktu yang berdekatan.

Gambar 3 (e) merupakan hasil rekaman ketinggian air tanah di Stasiun Pundong. Secara umum, pola grafik ketinggian air tanah selama Januari – Maret menunjukkan variasi nilai di atas 11,8 meter. Kemudian, terus menurun selama tiga bulan selanjutnya hingga mencapai 11,4 meter pada akhir Juni. Anomali yang terjadi sebelum gempa bumi diduga dipengaruhi oleh kondisi cuaca. Hal ini karena selama Januari – Maret wilayah pengamatan

dalam kondisi basah dengan intensitas curah hujan lebat hingga sangat lebat sehingga ketinggian air tanah relatif tinggi. Sementara pada rentang waktu April – Juni wilayah pengamatan dalam kondisi kering (tidak ada hujan). Di Stasiun Piyungan, hasil rekaman ketinggian air tanah tidak menunjukkan anomali pada kejadian gempa bumi. Ketinggian air tanah relatif stabil dalam rentang ± 14 meter, hingga melonjak naik pada akhir Juni setinggi 14,62 meter.



Gambar 3. Grafik analisis deret waktu (a) Variasi nilai harian radon, (b) Variasi perbandingan skk/dskk nilai radon, (c) Variasi suhu udara harian, (d) Variasi Tmaks-Tmin geotemperatur, (e) Variasi ketinggian air tanah, dan (f) Curah hujan di Stasiun Pundong periode Januari – Juni 2018.



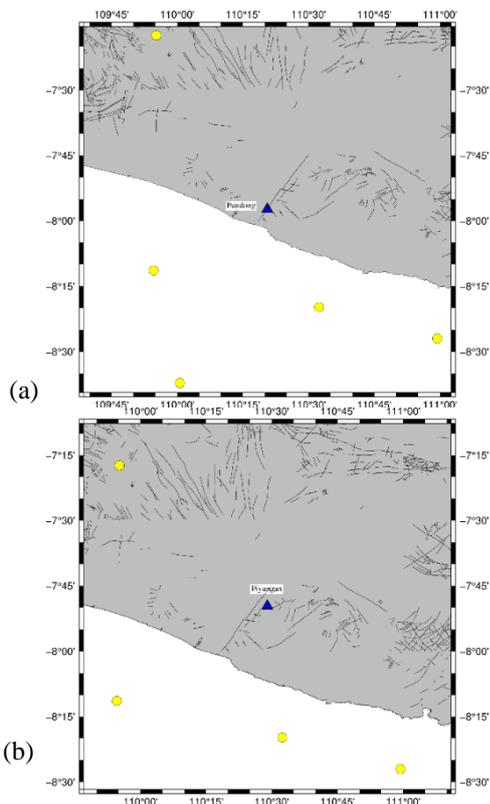
Gambar 4. Grafik analisis deret waktu (a) Variasi nilai harian radon, (b) Variasi perbandingan skk/dskk nilai radon, (c) Variasi suhu udara harian, (d) Variasi Tmaks-Tmin geotemperatur, (e) Variasi ketinggian air tanah, dan (f) Curah hujan di Stasiun Piyungan periode Januari – Juni 2018.

Dari hasil perhitungan koefisien korelasi Pearson, sebagian besar nilai korelasi menunjukkan hubungan yang berlawanan arah dan relatif lemah sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai anomali yang terjadi tidak diikuti oleh kejadian hujan sebagaimana kondisi normalnya. Berlainan dengan parameter suhu udara di Stasiun Pundong, nilai korelasinya $< -0,5$ yang mengindikasikan bahwa kondisi suhu udara di Stasiun Pundong memiliki hubungan kuat dengan kejadian hujan. Korelasi ketinggian air tanah terhadap curah hujan juga dapat dikatakan sedikit le-

mah karena mendekati nilai 0,5. Hal ini didukung dengan hasil analisis grafik pada Gambar 3 (e) bahwa variasi nilai ketinggian air tanah dipengaruhi oleh curah hujan.

Tabel 2. Hasil perhitungan koefisien korelasi Pearson antara parameter prekursor terhadap curah hujan pada periode Januari – Juni 2018.

	Pundong	Korelasi Pearson	Piyungan	Korelasi Pearson
Radon	-0,4164	lemah	-0,1788	lemah
Suhu Udara	-0,5706	kuat	-0,3142	lemah
Geo-temperatur	-0,3745	lemah	-0,0389	lemah
Water Level	0,4206	sedikit lemah	-0,1067	lemah



Gambar 5. Kejadian gempa bumi (lingkaran kuning) di sekitar Stasiun (a) Pundong dan (b) Piyungan pada periode Juli – Desember 2018.

Analisis Perubahan Nilai Parameter Prekursor dan Kejadian Gempa Bumi Periode Juli – Desember 2018. Dalam rentang waktu Juli – Desember 2018, tercatat 5 dan 4 kejadian gempa bumi dalam radius 100 km dari Stasiun Pundong dan Piyungan.

Variabilitas gas radon di Stasiun Pundong menunjukkan nilai yang relatif lebih rendah dibanding Stasiun Piyungan. Konsentrasi gas radon di Stasiun Pundong memiliki rentang nilai 0,2160 – 3,6683 Bq/L, sedangkan di Stasiun Piyungan dalam rentang 0,2085 – 5,2290 Bq/L. Pada Gambar 6 (b), nilai skk/dskk di Stasiun Pundong mengalami penurunan di bawah -1 yang diikuti kejadian gempa bumi pada tanggal 3 Agustus, 2, 12 dan 15 Oktober,

serta 1 dan 6 November. Sementara di Stasiun Piyungan, pada Gambar 7 (b) nilai skk/dskk yang mengindikasikan anomali pada tanggal 6 dan 13 Agustus, 27 September, dan 26 Oktober. Jika dilihat dari Gambar 6 (a) dan 7 (a), nilai harian radon baik di Stasiun Pundong maupun Piyungan relatif berfluktuasi selama enam bulan terutama menjelang kejadian gempa bumi. Grafik tertinggi dalam rentang waktu tersebut terjadi sekitar bulan September hingga awal November, yang mana pada bulan tersebut beberapa rangkaian gempa bumi terjadi. Memasuki pertengahan November, nilai radon harian cenderung menurun (kembali seperti bulan Juli hingga Agustus).

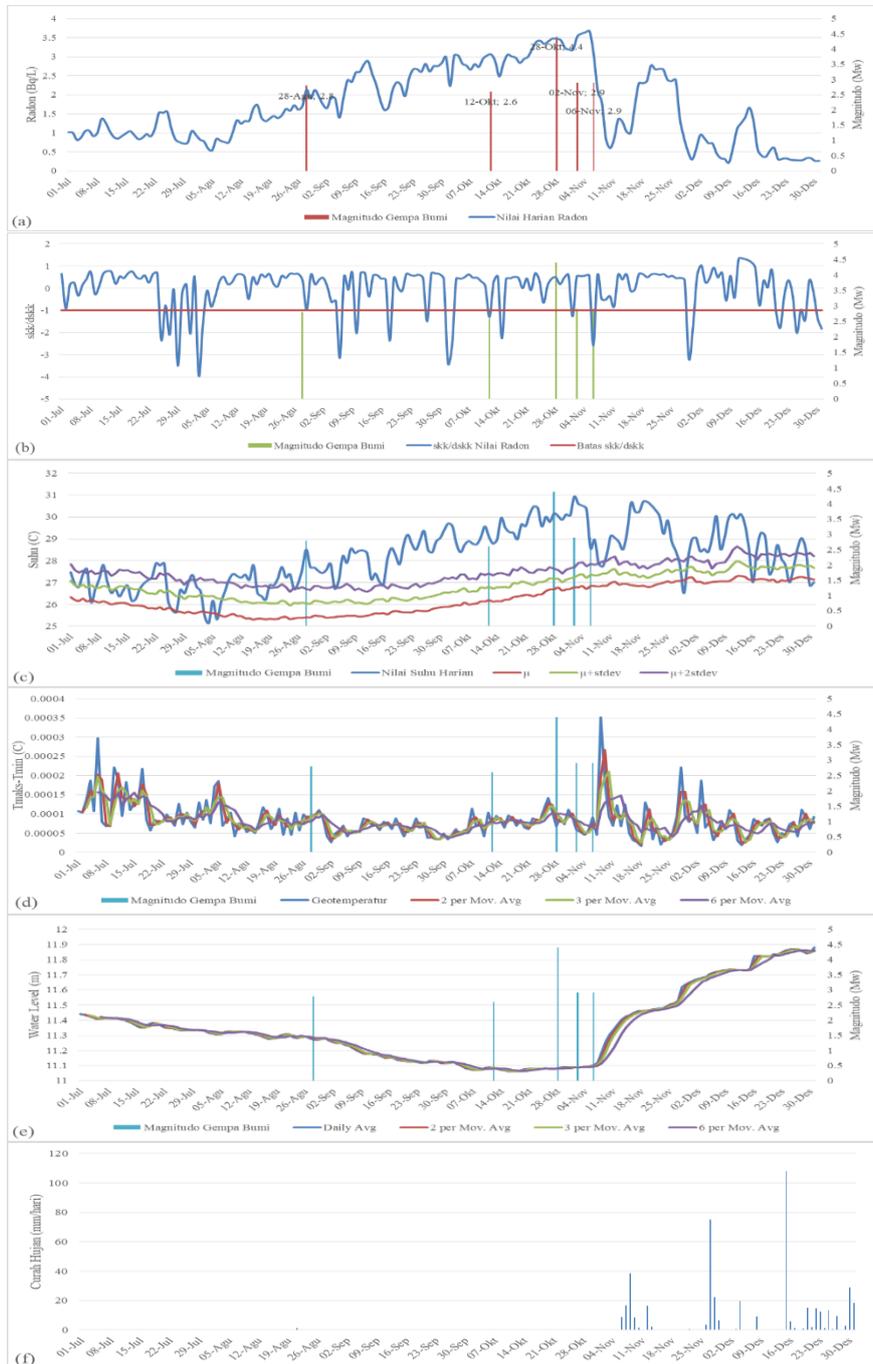
Untuk parameter suhu udara, Gambar 6 (c) yang merupakan hasil rekaman di Stasiun Pundong menunjukkan nilai suhu udara harian di atas ambang batas anomali pada kejadian gempa bumi 28 Agustus (M 2,8), 12 Oktober (M 2,6), 28 Oktober (M 4,4), 2 November (M 2,9), dan 6 November (M,9). Kelima gempa bumi memiliki kedalaman dangkal, berkisar 10 – 17 km. Nilai suhu udara harian berada di atas ambang batas anomali dalam rentang waktu 29 Agustus – 6 November. Hal ini berkaitan dengan kejadian gempa bumi 28 Oktober yang memiliki magnitudo cukup besar dengan kedalaman 10 km. Sementara itu, pada Gambar 7 (c) di Stasiun Piyungan, terdapat beberapa kejadian gempa bumi yang didahului anomali suhu udara, yaitu pada gempa bumi 28 Agustus, 12 Oktober, 28 Oktober, dan 6 November. Anomali yang terekam terlihat beberapa minggu hingga saat kejadian gempa bumi.

Nilai jangkauan suhu bawah permukaan baik di Stasiun Pundong maupun Piyungan menunjukkan variasi yang sangat kecil, yaitu mencapai 1/100.000 °C. Variasi nilai jangkauan suhu di Stasiun Pundong dalam rentang 0,000024 – 0,00035 °C dan di Stasiun Piyungan 0,000057 – 0,00087 °C. Gambar 6 (d) dan 7 (d) menunjukkan hasil nilai jangkauan suhu bawah permukaan di Stasiun Pundong dan Piyungan. Dari grafik, perubahan nilai terlihat relatif sangat kecil. Secara umum, terjadi beberapa puncak nilai Tmaks-Tmin sebelum kejadian gempa bumi. Pola dari anomali ini terlihat meningkat kemudian menurun hingga hari gempa bumi.

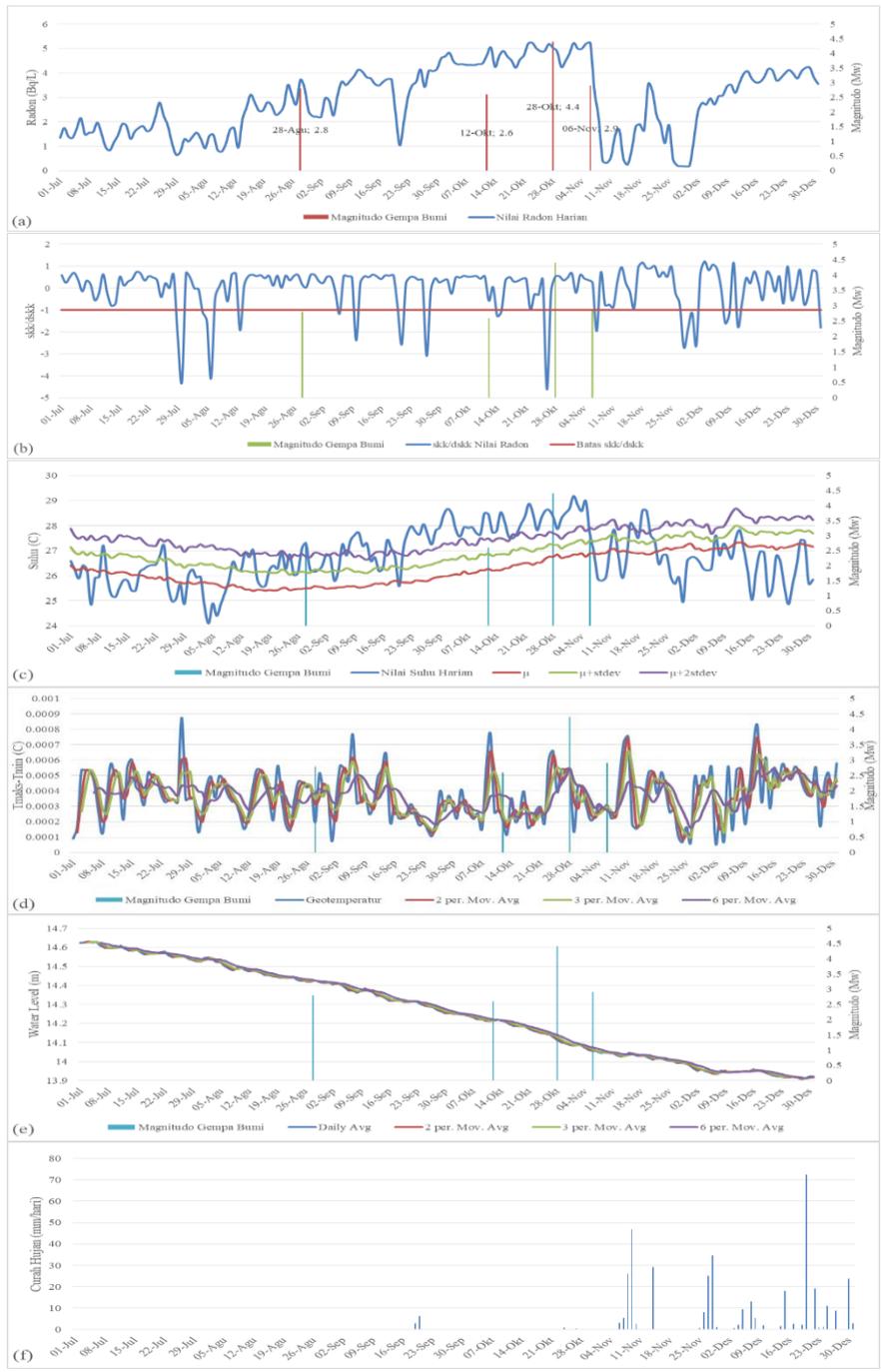
Pada hasil rekaman ketinggian air tanah, Gambar 6 (e) di Stasiun Pundong menunjukkan pola anomali yang sesuai dengan teori pada kejadian gempa bumi 28 Agustus, 12 dan 28 Oktober, serta 2 dan 6 November. Selama 1 Juli – 6 November, ketinggian air tanah konstan mengalami penurunan. Sebelum gempa bumi 28 Oktober (M 4,4), penurunan air tanah sebesar 0,4 meter sejak 1 Juli hingga hari kejadian. Kemudian, dalam rentang waktu 8 November hingga 31 Desember, terjadi kenaikan ketinggian air tanah yang diikuti yang diikuti

penaikan intensitas curah hujan. Gambar 7 (e) merupakan hasil rekaman ketinggian air tanah di Stasiun Piyungan. Selama rentang waktu enam bulan, ketinggian air tanah mengalami penurunan secara konstan. Sebelum gempa bumi 28 Oktober

(M 4,4), terjadi penurunan air tanah sebesar 0,5 meter sejak 1 Juli hingga hari kejadian. Kemudian, setelah gempa bumi 6 November tidak ada kejadian gempa bumi hingga akhir Desember yang ditandai dengan ketinggian air tanah relatif stabil.



Gambar 6. Grafik analisis deret waktu (a) Variasi nilai harian radon, (b) Variasi perbandingan ssk/dskk nilai radon, (c) Variasi suhu udara harian, (d) Variasi Tmaks-Tmin geotemperatur, (e) Variasi ketinggian air tanah, dan (f) Curah hujan di Stasiun Pundong periode Juli – Desember 2018.



Gambar 7. Grafik analisis deret waktu (a) Variasi nilai harian radon, (b) Variasi perbandingan skk/dskk nilai radon, (c) Variasi suhu udara harian, (d) Variasi Tmaks-Tmin geotemperatur, (e) Variasi ketinggian air tanah, dan (f) Curah hujan di Stasiun Piyungan periode Juli – Desember 2018.

Dari hasil perhitungan koefisien korelasi Pearson, nilai korelasi yang dihasilkan menunjukkan hubungan yang berlawanan arah dan relatif lemah sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai anomali yang terjadi pada keempat parameter tersebut tidak diikuti oleh kejadian hujan sebagaimana kondisi normalnya. Dengan kata lain, kejadian anomali tidak berkaitan dengan kondisi cuaca lokal.

Tabel 3. Hasil perhitungan koefisien korelasi Pearson antara parameter prekursor terhadap curah hujan pada periode Juli – Desember 2018.

	Pundong	Korelasi Pearson	Piyungan	Korelasi Pearson
Radon	-0,1496	lemah	-0,0966	lemah
Suhu Udara	-0,0121	lemah	-0,2212	lemah
Geotemperatur	0,2120	lemah	0,0228	lemah
Water Level	0,2684	lemah	-0,3124	lemah

Analisis Parameter Fisis dan Kimiawi. Hari anomali terjadi bervariasi di setiap gempa bumi, bergantung pada jarak episenter, kedalaman, dan terutama besar magnitudo. Oleh karena dalam analisis per-enam bulan studi kasus gempa bumi yang terjadi relatif berdekatan, maka sulit untuk menentukan anomali untuk satu kejadian gempa bumi. Secara umum, nilai skk/dskk radon kurang dari -1 dapat terlihat beberapa bulan hingga minggu sebelum kejadian gempa bumi [21] dan terjadi fluktuasi kenaikan nilai harian radon sesuai dengan teori model dilatansi [8]. Peningkatan suhu udara beberapa hari yang diikuti penurunan signifikan dan penurunan ketinggian air tanah sebelum gempa bumi tidak dapat diamati pada kondisi hujan. Sementara itu, anomali geotemperatur yang terlihat relatif sangat kecil akibat konduktivitas termal batuan yang relatif rendah sehingga perubahan nilai geotemperatur yang berkaitan dengan proses dilatansi batuan di kedalaman bumi akan membutuhkan waktu yang lama untuk sampai di permukaan [11]. Dari keempat parameter prekursor yang dianalisis, anomali dari salah satu parameter prekursor belum cukup kuat untuk meyakinkan bahwa anomali tersebut terjadi akibat persiapan gempa bumi. Diperlukan analisis parameter lain sebagai pendukung dan validasi dari data curah hujan yang secara langsung memengaruhi kondisi fisis dan kimiawi batuan.

Analisis Kondisi Geologi. Sensor parameter prekursor diletakkan berdekatan dengan Sesar Opak agar dapat memantau kejadian gempa bumi yang sebagian besar disebabkan oleh aktivitas Sesar Opak. Sensor pada Stasiun Pundong relatif lebih dekat dengan lautan di bagian selatan Jawa sehingga memungkinkan untuk melakukan penelitian prekursor gempa bumi yang memiliki episenter di laut.

Bagian utara Kota Yogyakarta yang berbatasan langsung dengan Sleman memiliki jenis tanah keras sebab berdekatan dengan lereng sisi selatan Gunung Merapi. Kota Yogyakarta dan sebagian daerah Bantul memiliki kriteria jenis tanah sedang dan merupakan peralihan dari daerah jenis tanah keras dan lunak. Sementara itu, jenis tanah lunak dengan batuan vulkanik dan sedimen mendominasi di bagian selatan Kota Yogyakarta [25]. Porositas dan permeabilitas suatu batuan memengaruhi tingkat laju suatu zat untuk melewatinya. Semakin ke arah selatan (hingga Kabupaten Bantul), jenis batuan endapan Merapi Muda mengalami ukuran perubahan butir menjadi lebih halus sehingga memungkinkan bahwa jenis batuan ini memiliki porositas yang besar [26].

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil olah dan analisis data, nilai konsentrasi gas radon, suhu udara, geotemperatur, dan ketinggian air tanah memiliki hubungan dengan kejadian gempa bumi dan dapat dipengaruhi oleh faktor curah hujan. Suhu udara dan ketinggian air tanah merupakan parameter yang paling dipengaruhi oleh faktor tersebut. Anomali parameter radon dan geotemperatur dapat terdeteksi dalam kondisi kering (tidak ada hujan) saat sebelum gempa bumi. Sementara itu, kondisi geologi di beberapa daerah di Yogyakarta didominasi oleh batuan lunak yang memiliki porositas besar sehingga memungkinkan terjadi degasifikasi radon akibat gempa bumi.

Besar magnitudo, jarak episenter terhadap stasiun, dan kedalaman gempa bumi berpengaruh terhadap perubahan nilai parameter prekursor menjelang kejadian gempa bumi. Anomali parameter prekursor pada kejadian gempa bumi dengan magnitudo yang lebih besar (dalam penelitian ini $M > 3$) dan jarak episenter yang dekat dapat terdeteksi beberapa bulan sebelum hari kejadian walau bukan secara mutlak. Pola anomali dari setiap parameter prekursor yang terdeteksi sebelum kejadian gempa bumi adalah berbeda-beda, secara garis besar mengalami peningkatan atau penurunan nilai yang signifikan dalam jangka waktu beberapa bulan sebelum hingga hari kejadian gempa bumi sehingga anomali parameter fisis dan kimiawi dikategorikan sebagai prekursor jangka pendek (*short term precursor*).

Saran. Terjadi indikasi perubahan parameter fisis dan kimiawi sebelum gempa bumi, tetapi masih sulit dibedakan dengan anomali yang dipengaruhi faktor lain, misalnya faktor curah hujan. Diperlukan penelitian yang konsisten untuk melihat pola anomali seperti melibatkan *time series data* dengan periode yang lebih panjang sehingga dapat diketahui kecenderungan perubahan parameter prekursor pada waktu tertentu.

Ucapan Terima Kasih. Ucapan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengembangan BMKG, terutama kepada Kepala Puslitbang BMKG, Dr. Nelly Florida, M.Si. yang telah memberikan izin akses data.

Daftar Pustaka

- [1] Wibowo, N. B. dan Sembri, J. N., "Analisis Seismisitas dan Energi Gempa Bumi di Kawasan Jalur Sesar Opak-Oyo Yogyakarta." *Jurnal Sains Dasar*, 2017, Vol. 6, no. 2, pp. 109–115.
- [2] Syafda, R. A., Pujiastuti, D., dan Afrizal, A. "Anomali Total Electron Content (TEC) di Ionosfer Sebagai Prekursor Gempa Bumi di Sumatra." *Jurnal Fisika Unand*, 2021, Vol. 10, no. 1, pp. 96-103.
- [3] Simanjuntak, A. G., Muslim, B., dan Hartantyo, E., "Identifikasi Prekursor Beberapa Gempa di Sumatera Melalui Analisis Total Electron Content (TEC) di Ionosfer Menggunakan Teknik Korelasi." *Seminar Nasional Teknofisika Nuklir*, 2017.
- [4] Ahyar, A. S., dan Sunardi, B. "Korelasi Polarisasi Magnet Z/H Untuk Identifikasi Prekursor Gempa di Sekitar Pelabuhan Ratu." *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 2017, Vol. 2, no. 3, pp. 179-186.
- [5] Sulastri, S., Rohadi, S., Sunardi, B., Vita, A. N., dan Prayogo, A. S., "Aplikasi Metode Mean dan Median Absolute Deviation pada Data Elektromagnet Sebagai Prekursor Gempa Bumi di Pelabuhan Ratu." *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal)*, 2017, Vol. 6, pp. SNF2017-EPA.
- [6] Pakpahan, S., Nurdiyanto, B., dan Ngadmanto, D. "Analisis Parametergeo-Atmosferik dan Geokimia Sebagai Prekursor Gempabumi di Pelabuhan Ratu, Sukabumi." *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 2014, Vol. 15, no.2.
- [7] Rikitake, T., "Earthquake Prediction." *Elseiver*, 1976.
- [8] Scholz, C. H., Sykes, L. R. dan Aggarwal, Y. P., "Earthquake Prediction: A Physical Basis." *International Sci.*, 1973, Vol. 181, pp. 803–810.
- [9] Saraf, A. K., Rawat, V., Choudhury, S., Dasgupta, S. dan Das, J., "Advances in Understanding of the Mechanism for Generation of Earthquake Thermal Precursors Detected by Satellites." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2009, Vol. 11, no. 6, pp. 373–379.
- [10] Ulomov, V. I. dan Mavashev, B. Z., "On Forerunners of Strong Tectonic Earthquakes." *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1967, Vol. 176, pp. 319–322.
- [11] Wang, Q. L., Wang, W. P., Liang, W. F. dan Chen, B., "Stress-dissipative Heat Geotemperature Precursor Mechanism of Earthquakes." *Acta Seismologica Sinica English Edition*, 1998, Vol. 11, no. 5, pp. 615–621.
- [12] Tronin, A. A., Hayakawa, M. dan Molchanov, O. A., "Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China." *Journal of Geodynamics*, 2002, Vol. 33, pp. 519–534.
- [13] Sunardi, B., Sakya, A. E., Masturyono, Rohadi, S., Ngadmanto, D., Sulastri, Susilanto, P. dan Pakpahan, S., "Real Time Observation System for Earthquake Precursors Study in Yogyakarta." *Proceeding of The 7th Annual Basic Science International Conference*, 2016a, Vol. 1, no. June, pp. 2013–2206.
- [14] Sunardi, B., Sakya, A. E., Masturyono, Rohadi, S., Ngadmanto, D., Sulastri, Susilanto, P. dan Pakpahan, S., "The Utilization Potential of Radon as Earthquake Precursor in Indonesia." *Proceeding of The 7th Annual Basic Science International Conference*, 2016b, Vol. 1, pp. 203–207.
- [15] Qiang, Z. J., Xu, X. D. dan Dian, C. G., "Case 27: Thermal Infrared Anomaly Precursor of Impending Earthquakes." *Pure and Applied Geophysics*, 1997, Vol. 149, no. 1, pp. 159–171.
- [16] Sunarjo, Gunawan, M. T. dan Pribadi, S., "Gempabumi Edisi Populer." (diterjemahkan oleh: Masturyono, J. Murjaya, dan D. Ngadmanto, Ed.) Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2012, Jakarta.
- [17] Sulastri, S., Nursarifa, S., Sunardi, B., Rohadi, S., Nugroho, C., dan Perdana, Y. H., "Anomali Gas Radon Sebagai Prekursor Gempa bumi di Sekitar Sesar Palukoro." *Jurnal Widya Climago*, 2020, Vol. 2, no.2.
- [18] BMKG, "Katalog Gempa Bumi." <https://geof.bmkg.go.id/webdc3/>, diakses 6 Desember 2020.
- [19] Hauksson, E., dan Goddard, J. G. "Radon Earthquake Precursor Studies in Iceland." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1981, Vol. 86, pp. 7037-7054.
- [20] NOAA, "Reanalysis Datasests (Surface Temperature)." <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>, diakses Maret 2021
- [21] Sunardi, B., Rohadi, S., Muslim, B., Ngadmanto, D., Susilanto, P., Sulastri, Pakpahan, S., Kurniawan, T. dan Prayogo, A. S., "Variasi Gas Radon dan Aktivitas Kegempaan di Sekitar Patahan Opak." *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 2018, Vol. 9, no. 1, pp. 11.
- [22] Wu, L. X., Qin, K. dan Liu, S. J., "GEOSS-Based Thermal Parameters Analysis for Earthquake Anomaly Recognition." *Proceedings of the IEEE*, 2012, Vol. 100, no. 10, pp. 2891–2907.

- [23] Budiwati, T., Budiyono, A., Setyawati, W. dan Indrawati, A., "Unsur-Unsur Kimia Air Hujan di Bandung." *Jurnal Sains Dirgantara*, 2010, Vol. 7, no. 2, pp. 100–112.
- [24] Robert, Ebel, J. E. dan Britton, J., "Asystematic Compilation of Earthquake Prekursors." *Tectonophysics*, 2009, Vol. 476, pp. 371–396.
- [25] Rahman, A. S., "Studi Potensi Likuefaksi di Daerah Istimewa Yogyakarta Berdasarkan Kecepatan Gelombang Geser (V_{s30}).” Skripsi, Program Studi Geofisika: Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2020.
- [26] Trisnaning, P. T., "Penentuan Tingkat Kerentanan Lereng Dengan Metode Wilson & Keefer di Kecamatan Pleret, Dlingo & Piyungan, Kabupaten Bantul, D.I. Yogyakarta." 2015, pp. 541–554.