Variasi Gas Radon dan Aktivitas Kegempaan di Sekitar Patahan Opak

Radon Gas Variation and Seismic Activities around Opak Fault

Bambang Sunardi¹, Supriyanto Rohadi¹, Buldan Muslim², Drajat Ngadmanto¹, Pupung Susilanto¹,
Sulastri¹, Sulyanti Pakpahan¹, Telly Kurniawan¹, Angga Setiyo Prayogo¹

¹Pusat Penelitian dan Pengembangan, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG)
Jalan Angkasa 1 No. 2 Kemayoran, Jakarta Pusat 10720

²Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan Nasional (LAPAN)
Jl. Dr. Junjunan 133, Bandung 40173
e-mail: b.sunardi@gmail.com

ABSTRAK

Monitoring gas radon di dalam tanah telah dilakukan secara sinambung selama dua tahun terakhir di sekitar Patahan Opak, Yogyakarta, sebagai salah satu upaya mitigasi bencana gempa. Penelitian ini bertujuan menganalisis variasi gas radon dan aktivitas kegempaan serta munculnya prekursor gempa lokal yang terjadi di lajur Patahan Opak. Monitoring gas radon dilakukan pada dua lokasi, yaitu di daerah Pundong dan Piyungan. Sementara catatan aktivitas gempa di sekitar Patahan Opak diperoleh dari BMKG. Kajian anomali radon untuk melihat adanya prekursor gempa dilakukan dengan menerapkan metode korelasi. Anomali gas radon ditetapkan apabila rasio simpangan koefisien korelasi (S_k) dengan deviasi standar (D_s) lebih kecil dari -1. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan emisi gas radon berkorelasi dengan kenaikan frekuensi kejadian gempa. Penerapan metode korelasi memperlihatkan adanya anomali gas radon sebagai prekursor gempa di sekitar Patahan Opak. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk melihat korelasi dan konsistensi hasil monitoring anomali gas radon dengan kejadian gempa di sekitar Patahan Opak.

Kata kunci: kegempaan, prekursor, radon, korelasi, Patahan Opak

ABSTRACT

Monitoring of soil radon gas has been continuously carried out during the last two years around Opak Fault, Yogyakarta, as one of earthquake disaster mitigation efforts. This study aimed to analyze the variations of radon gas and seismic activity, and to explore the emergence of local earthquake precursors that occurred around the Opak Fault. Radon gas monitoring conducted at two locations: in Pundong and Piyungan areas. While the earthquake activities around Opak Fault were obtained from BMKG. This radon gas anomaly is studied to see earthquake precursors by applying the correlation method. Radon gas anomaly is determined if the ratio of correlation coefficient deviation (S_k) with standard deviation (D_s) is smaller than -1. The results showed an increase in emissions of radon gas correlated with the increase in the frequency of seismic events. The application of correlation method showed the presence of radon gas anomalies as earthquake precursors around Opak Fault. Further researches are needed to see the correlation and consistency of the results of monitoring radon gas anomalies with earthquakes around Opak Fault.

Keywords: Seismicity, precursor, radon, correlation, Opak Fault

PENDAHULUAN

Radon (^{222}Rn) merupakan gas radioaktif yang tidak berbau dan tidak berwarna sebagai hasil peluruhan uranium yang tersimpan di dalam batuan dengan waktu paruh sekitar 3,8 hari. Radon dapat ditemukan di dalam tanah maupun batuan, dan dapat dijumpai dalam berbagai konsentrasi, baik di dalam tanah, udara, maupun air (Kuo drr., 2010; Yasuoka drr., 2009). Pengukuran gas radon memiliki beberapa manfaat, antara lain sebagai penunjuk adanya endapan uranium yang terkubur, sebagai pelacak adanya massa udara dan air tanah yang bergerak sebagai akibat dinamika patahan-patahan geologi, dan juga dapat dipakai sebagai alat untuk memprediksi gempa (Duenas dan Fernandez, 1988).

Beberapa dekade terakhir telah berkembang upaya untuk mempelajari kaitan gas radon dengan proses geodinamika. Radon dianggap yang paling cocok untuk mempelajari gejala-gejala awal (prekursor) gempa dibanding gas-gas lainnya karena mudah terdeteksi. Upaya-upaya untuk memperbaiki monitoring dan analisis data radon terus dilakukan, demikian juga dengan metodologi serta pemodelan matematis terus berkembang untuk memperkuat kaitan anomali gas radon dengan proses geodinamika (Imme dan Morelli, 2012). Di Indonesia, monitoring konsentrasi gas radon telah dilakukan di sekitar Patahan Opak, Yogyakarta, sejak tahun 2015 bersamaan dengan pengamatan parameter suhu bawah permukaan tanah, *water level*, suhu udara, tekanan udara, dan curah hujan. Monitoring konsentrasi gas radon telah dilakukan dengan menempatkan sensor radon pada lubang bor di dalam tanah pada dua lokasi, yaitu Pundong dan Piyungan (Sunardi drr., 2016a).

Pengukuran gas radon di dalam tanah maupun air tanah banyak dilakukan di seluruh dunia. Hasil-hasil pengamatan menyimpulkan bahwa radon dapat dimanfaatkan sebagai indikator aktivitas kerak bumi. Banyak penelitian yang menunjukkan adanya anomali gas radon yang berkaitan dengan aktivitas seismik. Bukti pertama yang memperlihatkan kaitan antara radon dan kejadian gempa adalah pengamatan konsentrasi radon sebelum gempa Tashkent (Ulomov dan Mavashev, 1967). Temuan tersebut memicu peneliti lain untuk mempelajari kaitan anomali gas radon di dalam tanah maupun air tanah dengan kejadian gempa (King, 1978, 1980, 1986; Mogro drr., 1980; Ramola drr., 1988, 1990; Singh drr., 1988a, b; Virk dan

Singh, 1992; Yang drr., 2005). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa anomali gas radon dengan periode yang lebih lama berkorelasi positif dengan kejadian gempa yang akan datang dengan kekuatan yang lebih besar (Fu drr., 2017). Analisis statistik juga menunjukkan hubungan antara variasi gas radon terhadap pelepasan energi gempa (Piersanti drr., 2016). Konsentrasi gas radon di dalam tanah juga memiliki korelasi kuat dengan lokasi patahan (Lopez drr., 2016). Pengamatan gas radon di daerah aktif tektonik di sebelah barat Turki menunjukkan adanya korelasi linier antara tingkat emisi radon dan aktivitas seismik di wilayah yang diteliti (Murat drr., 2011). Di Nepal, data monitoring gas radon selama empat bulan menunjukkan adanya anomali sebelum gempa 25 April 2015 dengan magnitudo M 7,8 (Deb, Gazi, dan Barman, 2016).

Kaitan antara kejadian gempa dengan variasi gas radon dapat dijelaskan melalui model *dilatancy* yang dikemukakan oleh Scholz drr. (1973). Munculnya retakan-retakan (*cracks*) sebelum gempa akan meningkatkan difusi fluida. Kekuatan dan tekanan pori akan menyebabkan variasi karakteristik kimia dan fisika batuan. Di daerah berpotensi gempa, saat batuan yang kompak mulai mengalami retakan (*crack*), radon akan terlepas hingga mengalami proses peluruhan. Hal tersebut menyebabkan adanya kenaikan konsentrasi gas radon. Sensor radon akan menangkap adanya perubahan komposisi ini, sehingga gas radon bisa menjadi indikator aktivitas kegempaan. Energi hasil peluruhan radon dapat juga mengionisasi atom di atmosfer dan menyebabkan perubahan komposisi ion di ionosfer. Pada tahap akhir model *dilatancy*, emisi gas radon dapat kembali stabil atau menurun sebelum gempa terjadi. Kelemahan penggunaan radon sebagai prekursor gempa adalah waktu peluruhan radon yang singkat, sehingga tidak memungkinkan radon menempuh jarak yang jauh di dalam kerak bumi. Namun, pada kenyataannya, *stress* di bawah permukaan bumi dapat mengalami penjarangan, sehingga memungkinkan munculnya anomali gas radon yang bersifat lokal bahkan hingga ratusan km (Tomer, 2016).

Berbagai prosedur mulai diaplikasikan untuk mengamati anomali gas radon yang berkaitan dengan kejadian gempa. Silva drr. (2013) menerapkan metode statistik sederhana (analisis korelasi Pearson) untuk menganalisis anomali-anomali gas radon yang berkaitan dengan aktivitas kegempaan. Hasil penelitian menunjukkan adanya

korelasi antara aktivitas kegempaan dan durasi anomali gas radon pada skala lokal. Penggunaan metode *Empirical Mode Decomposition* (EMD) terhadap data radon tahun 2008 di Northampton, Inggris, menunjukkan anomali berdurasi singkat yang berkaitan dengan kejadian gempa (Crockett dan Gillmore, 2010). Penerapan metode *Multi Fractal Detrended Fluctuation Analysis* (MFDFA) juga telah dilakukan terhadap data radon di Tattapani, India. Hasil penelitian menunjukkan *time series* radon terdiri atas beberapa fitur nonlinier, seperti struktur fraktal yang mungkin berasal dari berbagai gangguan yang disebabkan oleh gangguan fisika-kimia akibat proses persiapan gempa (Barman drr., 2014).

Hasil penelitian pada beberapa kasus menunjukkan perubahan konsentrasi gas radon sebelum kejadian gempa besar, namun demikian mekanisme yang berkaitan dengan aktivitas gempa belum dapat dipahami dengan baik. Dengan demikian, meskipun beberapa hasil penelitian menunjukkan adanya keterkaitan proses geodinamika dengan konsentrasi gas radon, namun karena kompleksitas mekanisme transportasinya, keterkaitan tersebut memerlukan lebih banyak penyelidikan agar dapat diterangkan secara lebih jelas (Imme dan Morelli, 2012).

Penelitian ini bertujuan menganalisis variasi gas radon dan aktivitas kegempaan yang terjadi di sekitar Patahan Opak, Yogyakarta, serta mengkaji munculnya prekursor aktivitas gempa lokal. Gempa merusak pernah terjadi di sekitar Patahan Opak pada 27 Mei 2006 dengan kekuatan 6,3 (Mw). Gempa yang relatif dangkal tersebut telah menimbulkan kerusakan yang parah antara lain di Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta, dan Klaten (Jawa Tengah). Gempa ini juga menyebabkan 4.680 korban meninggal dunia dan lebih dari 19.897 orang luka-luka di Yogyakarta (Sunardi drr., 2016a). Penelitian prekursor gempa di sekitar Patahan Opak diharapkan bermanfaat dalam meningkatkan kewaspadaan berkaitan dengan mitigasi bencana gempa di wilayah tersebut.

METODE PENELITIAN

Monitoring konsentrasi gas radon dilakukan pada dua lokasi di sekitar Patahan Opak, tepatnya di daerah Pundong (110.343° BT, 7.956° LS) dan Piyungan (110.483° BT, 7.828° LS). Selama tahun 2015 - 2016 terdapat aktivitas kegempaan di sekitar

Patahan Opak. Aktivitas gempa di sekitar Patahan Opak diperoleh dari data repositori gempa bumi BMKG (<http://repogempa.bmkg.go.id/>). Gambar 1 memperlihatkan distribusi gempa di sekitar Patahan Opak tahun 2015 - 2016 dan stasiun monitoring radon di Pundong dan Piyungan, Yogyakarta.

Prinsip dasar dalam akuisisi data radon adalah sensor untuk mengukur konsentrasi gas radon yang dipasang di lubang bor di dalam tanah yang akan mengirimkan data analog langsung ke bagian *digitizer*. Selanjutnya, bagian *digitizer* akan menyimpan data tersebut di dalam memori dan mengirimkannya ke komputer, atau dapat juga di kirim ke *remote centre* secara *real time* (resolusi temporal 1 menit) menggunakan komunikasi internet. Data inilah yang selanjutnya dimonitor dan dianalisis. Gambar 2 memperlihatkan sistem monitoring gas radon dan parameter lain (suhu bawah permukaan bumi, *water level*, suhu udara, tekanan, curah hujan) di stasiun Pundong dan Piyungan, Yogyakarta.

Gambar 1. Lokasi monitoring radon di sekitar Patahan Opak, Yogyakarta (warna biru) dan data gempa di sekitar Patahan Opak tahun 2015 - 2016 (warna merah) dari repository gempa BMKG (<http://repogempa.bmkg.go.id/>).

Gambar 2. Sistem monitoring gas radon di sekitar Patahan Opak, dipasang simultan dengan pengamatan suhu di bawah permukaan bumi, water level, suhu udara, tekanan dan curah hujan (Taide, 2014).

Data emisi gas radon dari stasiun observasi di Pundong dan Piyungan memiliki resolusi temporal 1 menit. Untuk melihat kaitan variasi gas radon dengan aktivitas kegempaan di sekitar Patahan Opak dipergunakan data radon dengan resolusi harian. Pada rentang periode waktu yang sama, data harian radon dari kedua stasiun tersebut selanjutnya diplot bersama kejadian gempa di sekitar Patahan Opak.

Kajian kemunculan prekursor gempa dilakukan terhadap data gempa di sekitar Patahan Opak selama periode 2015 - 2016 dengan batasan gempa darat dengan kedalaman dangkal (diasumsikan gempa tersebut berasal dari Patahan Opak). Dalam penelitian kali ini, kemunculan prekursor gempa juga dibatasi untuk kasus gempa dengan kekuatan (magnitudo) $> 3,5$. Tabel 1 menunjukkan data gempa di sekitar Patahan Opak periode 2015 - 2016 dengan magnitudo $> 3,5$ yang dipergunakan untuk studi kasus dalam penelitian ini (<http://repogempa.bmkg.go.id/>).

Tabel 1. Data Gempa di Sekitar Patahan Opak Periode 2015 - 2016, Magnitudo $> 3,5$

Tanggal	Bujur	Lintang	Kedalaman	Magnitudo
28 Mei 2015	110,5	-8,07	10	3,7
1 Agustus 2015	110,69	-7,74	22	3,8
25 September 2015	110,5	-8	10	4,6
19 Oktober 2015	110,52	-8	10	3,8
17 Januari 2016	110,49	-8	12	3,6

(<http://repogempa.bmkg.go.id/>)

Untuk mengkaji kemunculan anomali gas radon yang berkaitan dengan kejadian gempa, diperlukan data radon dengan resolusi temporal 1 jam. Kajian anomali gas radon dilakukan dengan menerapkan metode korelasi untuk menentukan rasio Simpangan koefisien korelasi dengan deviasi standarnya (Sunardi dr., 2016b; Sunardi dr., 2015, Muslim, 2015). Data radon dari stasiun Pundong dan Piyungan dengan resolusi temporal 1 jam dipilih selama 31 hari sebelum kejadian

gempa yang ingin dipelajari. Dari data tersebut dapat ditentukan rata-rata radon pada jam tertentu selama 31 hari. Dengan demikian, diperoleh variasi rata-rata bulanan radon yang mewakili kondisi normal. Tahap berikutnya adalah mengkorelasikan variasi radon pada hari tertentu dengan variasi rata-rata bulanan radon, sehingga diperoleh 31 nilai koefisien korelasi. Selanjutnya, dihitung simpangan koefisien korelasi harian untuk 31 hari terhadap nilai rata-rata koefisien korelasi (S_k) dan Deviasi koefisien korelasi (D_s). Selama periode 2015 - 2016, di stasiun Piyungan terdapat kekosongan data radon selama beberapa hari karena listrik mati. Hal tersebut mengakibatkan analisis korelasi radon tidak dapat dilakukan dengan data penuh (31 hari). Indikator anomali gas radon dilihat dari nilai S_k/D_s . Batas ambang anomali gas radon adalah $S_k/D_s = -1$. Jika nilai S_k/D_s lebih kecil dari -1, maka dapat dikatakan pada hari tersebut nilai radon mengalami anomali. Anomali gas radon yang terjadi tersebut kemungkinan berkaitan dengan proses persiapan gempa.

Anomali gas radon yang tercatat akan bergantung juga pada kondisi cuaca lokal, antara lain curah hujan (Singh drr., 1988a, b; Chen dan Thomas, 1994). Curah hujan akan memengaruhi permeabilitas tanah yang mengakibatkan laju pelepasan gas radon menjadi berkurang. Untuk itulah, perlu dianalisis keterkaitan antara parameter meteorologi, khususnya curah hujan dengan data

radon. Pada penelitian ini, keterkaitan antara data curah hujan dengan data radon di stasiun Pundong dan Piyungan selama periode 2015 - 2016 dianalisis dengan menggunakan metode korelasi sederhana Pearson (Wessa, 2015). Metode statistik tersebut dipergunakan untuk mengukur kekuatan hubungan antara dua variabel, dan juga untuk mengetahui bentuk hubungan keduanya dengan hasil kuantitatif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil monitoring konsentrasi gas radon, curah hujan di stasiun Pundong dan Piyungan, serta aktivitas kegempaan di sekitar Patahan Opak pada rentang waktu tahun 2015 - 2016, masing-masing diperlihatkan pada Gambar 3 (a) dan (b). Selama tahun 2015 - 2016, variabilitas gas radon di stasiun Piyungan menunjukkan nilai yang relatif lebih tinggi dibanding stasiun Pundong. Konsentrasi gas radon di stasiun Piyungan memiliki rentang nilai 0,001 - 8,836 Bq/L, sedangkan di stasiun Pundong berkisar antara 0,035 - 3.893 Bq/L. Secara umum, peningkatan konsentrasi gas radon memiliki kaitan dengan kejadian gempa. Data radon di dua stasiun tampak mengalami kenaikan secara bersamaan mulai akhir Mei 2015 hingga Januari 2016. Kenaikan konsentrasi gas radon pada kedua stasiun berkorelasi dengan peningkatan frekuensi kejadian gempa di sekitar Patahan Opak. Data radon di stasiun Piyungan juga mengalami beberapa kali

Gambar 3. Monitoring konsentrasi gas radon dan curah hujan serta aktivitas kegempaan di sekitar Patahan Opak pada rentang waktu tahun 2015 - 2016, (a) di stasiun Pundong dan (b) di stasiun Piyungan.

Gambar 4. Diagram tebar (*scatter plot*) antara data curah hujan dan gas radon di stasiun Pundong (a), dan stasiun Piyungan (b).

kenaikan pada awal Januari hingga Maret 2015, sementara di stasiun Pundong, variasi data radon relatif stabil. Kenaikan data radon di stasiun Piyungan tersebut diikuti dengan kejadian gempa di sekitar Patahan Opak pada tanggal 26 Maret 2016 dengan kekuatan 2,5 (mL). Hasil pengamatan gas radon ini selaras dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang menyebutkan adanya kenaikan konsentrasi gas radon sebelum gempa besar (Sadovsky dr., 1972; Igarasi dr., 1995; Fleischer, 1988; Virk dr., 2001).

Hasil analisis korelasi Pearson untuk mengetahui hubungan antara curah hujan dan variabilitas gas radon serta arah hubungan yang terjadi menunjukkan nilai korelasi -0,16 dan -0,15 untuk data di stasiun Pundong dan Piyungan. Ini menunjukkan hubungan yang berlawanan arah dan relatif kurang kuat antara curah hujan dengan variabilitas gas radon di kedua stasiun. Gambar 4 memperlihatkan diagram tebar (*scatter plot*) di kedua stasiun yang memperlihatkan kecenderungan hubungan antara kedua parameter tersebut. Kenaikan konsentrasi gas radon tidak selalu terjadi pada kondisi kering (tidak ada hujan), namun terjadi juga pada kondisi basah (curah hujan meningkat). Se jauh ini studi gas radon sebagai prekursor gempa mempunyai kelemahan karena masih sebagian kecil dari anomali yang berkaitan dengan proses tektonik (gempa), sementara anomali lainnya akibat

pengaruh non-gempa. Terkadang anomali nya masih sukar dibedakan antara keduanya. Dengan demikian, kemungkinan perubahan dari kondisi basah ke kering yang memicu kenaikan anomali gas radon tidak dapat sepenuhnya diabaikan.

Metode korelasi dengan menghitung variasi rasio simpangan koefisien korelasi harian terhadap nilai rata-rata koefisien korelasi dengan deviasi standarnya (Sk/Ds) dilakukan untuk melihat adanya anomali gas radon sebelum kejadian gempa. Analisis Sk/Ds dilakukan terhadap beberapa kasus kejadian gempa di sekitar Patahan Opak sebagaimana tercantum pada Tabel 1. Gambar 5 menunjukkan variasi Sk/Ds data radon di stasiun Pundong dan Piyungan 31 hari sebelum gempa 28 Mei 2015. Nilai Sk/Ds di stasiun Pundong mengalami penurunan di bawah -1 (anomali) pada tanggal 30 April dan 5 Mei 2015. Data meteorologi (curah hujan) di stasiun Pundong pada 5 Mei 2015 menunjukkan adanya hujan dengan intensitas sekitar 17 mm. Di stasiun Piyungan data radon mengalami anomali pada tanggal 5, 6, 8, 26, dan 27 Mei 2017. Di stasiun Piyungan, pada tanggal anomali gas radon tersebut tidak tercatat ada hujan. Anomali gas radon pada kedua stasiun tersebut diikuti dengan kejadian gempa pada tanggal 28 Mei 2015 dengan magnitudo 3,7 (mL), kedalaman 10 km, dan jarak episentrum 21,5 km dari stasiun Pundong dan 26,9 km dari stasiun Piyungan.

Gambar 6 memperlihatkan variasi Sk/Ds data radon di stasiun Pundong dan Piyungan 31 hari sebelum gempa 1 Agustus 2015 dengan magnitudo 3,8 (mL), kedalaman 22 km, serta jarak episentrum sekitar 45,3 km dari stasiun Pundong dan 25 km dari stasiun Piyungan. Anomali gas radon di stasiun Pundong muncul pada tanggal 3, 6, 7, dan 11 Juli 2015, sedangkan anomali gas radon di stasiun Piyungan terlihat sangat signifikan pada tanggal 13 dan 14 Juli 2015. Dalam rentang waktu 2 Juli hingga 1 Agustus 2015, pengamatan meteorologi pada kedua stasiun tidak mencatat adanya hujan. Dengan demikian, faktor curah hujan dapat diabaikan. Anomali gas radon yang muncul pada dua stasiun tersebut dapat dipertimbangkan sebagai prekursor gempa 1 Agustus 2015.

Gambar 5. Rasio simpangan koefisien korelasi dengan deviasi standar (Sk/Ds) data radon dan curah hujan sebelum gempa 28 Mei 2015 (mL 3.7).

Gambar 6. Rasio simpangan koefisien korelasi dengan deviasi standar (Sk/Ds) data radon sebelum gempa 1 Agustus 2015 (mL 3.8).

Terlihat beberapa perbedaan variasi Sk/Ds radon di stasiun Pundong dan Piyungan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5 dan 6. Hal ini kemungkinan menunjukkan adanya perbedaan karakter patahan pada kedua lokasi tersebut. Patahan Opak terdiri atas segmen I di sebelah selatan dan segmen II di sebelah utara, sebagaimana terlihat pada Gambar 1.

Gambar 7 menunjukkan variasi Sk/Ds data radon sebelum gempa 25 September 2015. Anomali gas radon yang cukup signifikan di stasiun Pundong muncul pada tanggal 10, 11, dan 16 September 2015, sedangkan di stasiun Piyungan muncul pada tanggal 15 - 17 September 2015. Stasiun Piyungan mulai tanggal 18 hingga akhir September 2015 tidak merekam data radon karena listrik mati. Pengamatan curah hujan selama rentang waktu 26 Agustus - 25 September 2015 menunjukkan tidak adanya hujan yang turun pada kedua stasiun. Dengan demikian, faktor curah hujan diasumsikan tidak memberikan pengaruh terhadap kemunculan anomali gas radon pada kedua stasiun. Anomali gas radon yang muncul pada kedua stasiun kemungkinan merupakan prekursor gempa 25 September 2015, dengan magnitudo 4,6, kedalaman 10 km, serta jarak episentrum sekitar 18 km dari stasiun Pundong dan 19 km dari stasiun Piyungan.

Gambar 7. Rasio simpangan koefisien korelasi dengan deviasi standar (Sk/Ds) data radon sebelum gempa 25 September 2015 (M 4.6).

Gambar 8. Rasio simpangan koefisien korelasi (Sk) dengan deviasi standar (Ds) data radon sebelum gempa 19 Oktober 2015 (M 3.8).

Gambar 9. Rasio simpangan koefisien korelasi dengan deviasi standar (Sk/Ds) data radon dan curah hujan sebelum gempa 17 Januari 2016 (mL 3.6).

Data radon stasiun Pundong menunjukkan anomali pada tanggal 21, 24 September, serta 1 Oktober 2015. Sementara di stasiun Piyungan pada rentang waktu 19 - 29 September 2015 tidak ada rekaman data radon (Gambar 8), sehingga tidak dapat dianalisis ada tidaknya anomali gas radon yang muncul. Di stasiun Pundong maupun piyungan pada 19 September - 19 Oktober 2015 tidak terekam adanya hujan. Dengan demikian, anomali gas radon yang muncul di stasiun Pundong pada tanggal 21 dan 24 September serta 1 Oktober 2015 dapat dipertimbangkan sebagai prekursor gempa 19 Oktober 2015, dengan magnitudo 3,8 (mL), kedalaman 10 km, serta jarak episentrum sekitar 20 km dari stasiun Pundong dan 19,5 km dari stasiun Piyungan.

Variasi Sk/Ds sebulan sebelum gempa 17 Januari 2016 ditunjukkan pada Gambar 9. Di stasiun Pundong, anomali gas radon yang cukup signifikan terlihat pada tanggal 14 - 17 Januari 2017, dan anomali kecil muncul pada 24 Desember 2016. Di stasiun Piyungan terlihat anomali gas radon relatif signifikan pada 14 Januari 2016 dan anomali kecil muncul pada 22 Desember 2016. Tanggal 10 - 14 Januari 2016 pada kedua stasiun terjadi hujan dengan intensitas rata-rata 1 - 41 mm. Anomali gas radon yang muncul pada minggu ketiga Desember 2015 dan 15 - 16 Januari 2016 kemungkinan merupakan prekursor gempa 17 Januari 2016, dengan magnitudo 3,6 (mL), kedalaman 12 km, serta jarak episentrum sekitar 17 km dari stasiun Pundong dan 19 km dari stasiun Piyungan.

Kajian anomali gas radon sebelum gempa di sekitar Patahan Opak masih terbatas dengan lima kasus gempa dalam rentang waktu tahun 2015 - 2016. Dalam rentang waktu tersebut, seismisitas yang terekam memiliki kekuatan (magnitudo) yang relatif kecil. Dengan demikian, proses *dilatancy* yang terjadi relatif tidak besar, dan cakupan areanya juga relatif kecil. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mendapatkan data yang lebih banyak guna mengetahui karakteristik anomali akibat proses sebelum gempa, anomali non-gempa, serta konsistensi anomali gas radon yang muncul dengan kejadian gempa di sekitar Patahan Opak, Yogyakarta. Juga untuk mengetahui kaitan antara besarnya anomali yang muncul dengan kekuatan maupun jarak gempa serta mempelajari *onset time* (waktu awal terjadinya anomali) dan *lead time*, yaitu rentang waktu antara *onset time* dengan waktu gempa utama. Integrasi pengamatan dengan menganalisis parameter prekursor gempa lainnya, seperti halnya parameter seismik, *water level*, kandungan total elektron, suhu di bawah permukaan bumi, geomagnetik, dan parameter lainnya diperlukan untuk memperkuat kesimpulan adanya prekursor sebelum gempa utama terjadi.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan peningkatan emisi gas radon berkorelasi dengan kenaikan frekuensi kejadian gempa. Penerapan metode korelasi memperlihatkan adanya anomali gas radon yang

dapat diklasifikasikan sebagai prekursor gempa di sekitar Patahan Opak. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk melihat korelasi dan konsistensi hasil monitoring anomali gas radon dengan kejadian gempa di sekitar Patahan Opak.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih yang sebesar besarnya kepada semua peneliti di Litbang Geofisika BMKG atas segala diskusi dan sarannya. Selain itu, kami ingin menyampaikan apresiasi kepada Pusat Penelitian dan Pengembangan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Indonesia untuk segala fasilitas penelitian dan data yang dibutuhkan?

DAFTAR PUSTAKA

- Barman dr., 2014? Barman, C., Chaudhuri, H., Ghose, D., Deb, A., Sinha, B. 2014. Multifractal Detrended Fluctuation Analysis of Seismic Induced Radon-222 Time Series. *Journal of Earthquake Science and Engineering*, 1, h. 59 - 79.
- BMKG, 2017, <http://repogempa.bmkg.go.id/> [12 April 2017].
- Chen, C. dan Thomas, D.M., 1994. Soil processes and chemical transport, *J. Environ. Qual.*, 23, h.173 - 179.
- Crockett, R.G.M. dan Gillmore, G.K., 2010. Spectral-decomposition techniques for the identification of radon anomalies temporally associated with earthquakes occurring in the UK in 2002 and 2008. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, h.1079 - 1084. DOI: 10.5194/nhess-10-1079-2010.
- Deb, Gazi, dan Barman, 2016? H.2 Deb, A., Gazi, M., dan Barman, C. 2016. Anomalous soil radon fluctuations – signal of earthquakes in Nepal and eastern India regions. *J. Earth Syst. Sci.*, 125, 8, h. 1657–1665. DOI: 10.1007/s12040-016-0757-z.
- Duenas, C. dan Fernandez, M.C., 1988. Temporal variations in soil gas radon: any possible relation to earthquakes? *Tectonophysics*, 152, h.137 - 145.
- Fleischer, R.L., 1988. Radon in the environment opportunities and hazards. Nucl Tracks Radiat Meas. *Int J Radiat Appl. Instrum Part D*, 14, h.421 - 435.
- Fu, C.C., Yang, T.T., Tsai, M.C., Lee, L.C., Liu, T.K., Walia, V., Chen, C.H., Chang, W.Y., Kumar, A., dan Lai, T.H., 2017. Exploring the relationship between soil degassing and seismic activity by continuous radon monitoring in the Longitudinal Valley of eastern Taiwan. *Chemical Geology, in press*, dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.12.042.
- Igarashi, G., Saeki, S., Takahara, N., dr., 1995. Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan. *Nature*, 269, h.60 - 61.
- Imme, G. dan Morelli, D., 2012. *Radon as Earthquake Precursor*, Universita di Catania - INFN Sezione di Catania, Italy.
- King, C.Y., 1978. Radon emanation on San Andreas Fault. *Nature*, 271, h.516 – 519.
- King, C.Y., 1980. Episodic radon changes in subsurface soil-gas along active faults and possible relation to earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 85, h.3065 - 3078. DOI: 10.1029/JB085iB06p03065.
- King, C.Y., 1986. Gas geochemistry applied to earthquake prediction: an overview. *J. Geophys. Res.*, 91, h.12269 — 12281. DOI: 10.1029/JB091iB12p12269.
- Kuo, T., Lin, C., Chang, G., Fan, K., Cheng, W., dan Lewis, C., 2010. Estimation of aseismic crustal strain using radon repetitive radon precursors of the 2003 M 6.8, 2006 M 6.1, and 2008 M 5.0 earthquakes in eastern Taiwan. *Nat. Hazards*, 53, h. 219 - 228. DOI: 10.1007/s11069-009-9423-y.
- Lopez, J.A., Ornelas, O.D., Bohus, L.S., Rodriguez, G., dan Chavarria, I., 2016. Correlation Between Underground Radon Gas and Dormant Geological Faults. *Journal of Nuclear Physics, Material Sciences, Radiation and Applications*, 4, 1, h.265 - 275.
- Mogro, C.A., Fleischer, R.L., dan Likes, R.S., 1980. Changes in subsurface radon concentration associated with earthquake. *J. Geophys. Res.*, 85, h.3053 – 3057.
- Murat, M., Harmansah, C., Camgoz, B., dan Sozbilir, H., 2011. Radon Monitoring as the Earthquake Precursor in Fault Line in Western Turkey. *Ekoloji*, 20, 79, h.93 - 98.
- Muslim, B., 2015. Pengujian Teknik Korelasi Untuk Deteksi Pengaruh Aktivitas Gempa Bumi Dari Data TEC Ionosfer. *Jurnal Sains Dirgantara*, 12, 2, . h.87 - 102.

- Piersanti drr., 2016? H.2Piersanti, A., Cannelli, V., dan Galli, G. 2016. The Pollino 2012 seismic sequence: clues from continuous radon monitoring. *Solid Earth*, 7, h. 1303–1316. DOI: 10.5194/se-7-1303-2016, 2016.
- Ramola, R.C., Singh, S., dan Virk, H.S., 1988. A model for the correlation between radon anomalies and magnitudes of earthquakes. *Nucl. Track Radiat. Meas.*, 15, h.689 – 692.
- Ramola, R.C., Singh, M., Sandhu, A.S., Singh, S., dan Virk, H.S., 1990. The use of radon as an earthquake precursor. *Nucl. Geophys.*, 4, h.275 - 287.
- Sadovsky, M. A., Nersesov, I. L., Nigmatullaev, S. K., Latynina, L. A., Lukk, A. A., Semenov, A. N., Simbereva, I. G., dan Ulomov, V. I., 1972. The processes preceding strong earthquakes in some regions of middle Asia. *Tectonophysics*, 14, 295.
- Scholz, C.H., Sykes, L.R., dan Aggarwal, Y.P., 1973. Earthquake prediction: a physical basis. *International Sci.*, 181, h.803 - 810.
- Silva, H.G., Bezzeghoud, M., Oliveira, M.M., Reis, A.H., dan Rosa, R.N., 2013. A simple statistical procedure for the analysis of radon anomalies associated with seismic activity. *Annals of Geophysics*, 56, 1.
- Singh, M., Ramola, R.C., Singh, S., dan Virk, H.S., 1988a. The influence of meteorological parameters on soil-gas radon. *J. Assoc. Explor. Geophys.* 9, h.85 - 90.
- Singh, M., Ramola, R.C., Singh, N.P., Singh, S., dan Virk, H.S., 1988b. Measurement of soil gas radon at Amritsar. *Geophys. Res. Bull.*, 26, h.8 - 12.
- Sunardi, B., Muslim, B., dan Pakpahan, S., 2015. Anomali Total Electron Content (TEC) Sebelum Gempabumi Kuat di Indonesia Tahun 2014. *Prosiding Seminar Nasional Fisika 2015*, Surabaya.
- Sunardi, B., Sakya, A.E., Masturyono, Rohadi, S., Ngadmanto, D., Sulastri, Susilanto, P., dan Pakpahan, S., 2016a. Real Time Observation System for Earthquake Precursors Study in Yogyakarta. *Proceedings Jogja Earthquake in Reflection, 2016*, Yogyakarta. DOI: 10.1063/1.4987087.
- Sunardi, B. dan Sulastri, 2016b. Pemantauan Anomali Total Electron Content (TEC) Berkaitan Dengan Kejadian Gempabumi Di Sekitar Wilayah Jawa Tahun 2015. *Spektra, Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 1, 2, h.1 - 6. DOI:10.21009/SPEKTRA.0102.01.
- Taide, 2014. *ADP seismic premonition observation system*, TAIDE Enterprise Co., Ltd, China. DOI: 10.1016/S0264-3707(00)00022-3.
- Tomer, A., 2016. Radon as a Earthquake Precursor: A Review. *International Journal of Science, Engineering and Technology*, 4, 6, h.815 - 822.
- Ulomov, V.I. dan Mavashev, B.Z., 1967. On forerunners of strong tectonic earthquakes. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 176, 319 – 322.
- Virk, H.S. dan Singh, B., 1992. Correlation of radon anomalies with earthquake in Kangra valley. *Nucl. Geophys.*, 6, h.293 - 300.
- Virk, H.S., Walia, V., dan Kumar, N., 2001. Helium/ radon precursory anomalies of Chamoli earthquake Garhwal Himalaya, India. *J Geodyn*, 31, h.201 - 210.
- Wessa, P., 2015. Pearson Correlation (v1.0.10) in Free Statistics Software (v1.1.23-r7), Office for Research Development and Education, URL http://www.wessa.net/rwasp_correlation.wasp/.
- Yang, T.F., Walia, V., Chyi, L.L., Fu, C.C., Chen, C.H., Liu, T.K., Song, S.R., Lee, C.Y., dan Lee, M., 2005. Variation of soil radon and thoron concentrations in a fault zone and prospective earthquakes in S–W Taiwan. *Radiat. Meas.*, 40, h.496 - 502. DOI: 10.1016/j.radmeas.2005.05.017.
- Yasuoka, Y., Kawada, Y., Nagahama, H., Omori, Y., Ishikawa, T., Tokonami, S., dan Shinogi, M., 2009. Preseismic changes in atmospheric radon concentration and crustal strain. *Phys. Chem. Earth*, 34, h. 431 - 434. DOI: 10.1016/j.pce.2008.06.005.