

## Konsentrasi Radon-222 dalam Gas Tanah untuk Deteksi Distribusi Permeabilitas di Daerah Panas Bumi Tampomas, Jawa Barat

### *Radon-222 Concentration in Soil Gas to Delineate Permeability Distribution in Tampomas Geothermal Field, West Java*

Rasi Prasetyo\*, Neneng Laksminingpuri, Evarista Ristin Pujiindiyati

Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi - BATAN

Jl. Lebak Bulus Raya No. 49, Pasar Jumat, Jakarta, Indonesia, 12440

\*E-mail: rasi\_p@batan.go.id

Naskah diterima: 30 Oktober 2019, direvisi: 22 November 2019, disetujui: 16 Maret 2020

DOI: 10.17146/eksplorium.2020.41.1.5642

#### ABSTRAK

Daerah *upflow* dalam sistem panas bumi merupakan daerah dengan permeabilitas yang tinggi sebagai lintasan naiknya fluida panas bumi ke permukaan, yang umumnya ditandai dengan adanya fumarol di permukaan. Gunung Tampomas, Jawa Barat, merupakan salah satu lokasi potensi panas bumi yang memiliki manifestasi berupa mata air panas, namun tidak memiliki fumarol atau *steam vent*. Zona permeabel atau *upflow* sulit untuk diidentifikasi. Isotop  $^{222}\text{Rn}$  merupakan isotop geogenik yang konsentrasinya di dalam gas tanah dapat menunjukkan permeabilitas, baik permeabilitas primer maupun sekunder (struktur). Serangkaian pengukuran  $^{222}\text{Rn}$  dalam gas tanah telah dilakukan pada 56 titik di sekitar Gunung Tampomas untuk melihat anomali kandungan  $^{222}\text{Rn}$  dengan menggunakan metode statistik, serta relasinya antara daerah dengan permeabilitas tinggi dengan struktur geologi dan manifestasi panas bumi. Hasil pengukuran dan evaluasi statistik menunjukkan bahwa konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  terbagi menjadi konsentrasi rendah (latar), konsentrasi tinggi, dan anomali. Nilai latar berada di 16 lokasi berada di bawah  $825 \text{ Bq/m}^3$ , sementara konsentrasi tinggi di 32 lokasi antara  $825\text{--}7688 \text{ Bq/m}^3$  dan anomali di 8 lokasi di atas  $7688 \text{ Bq/m}^3$ . Sebagian besar lokasi dengan konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  tinggi dan anomali letaknya tidak berdekatan dengan kelurusan struktur. Seluruh pengukuran yang berdekatan dengan mata air panas memiliki konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  tinggi dan anomali. Mata air panas Ciseupan merupakan pengecualian yang mengindikasikan air panas tersebut keluar secara lateral (*outflow*). Selain itu, tidak ada indikasi korelasi antara konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  dengan elevasi lokasi pengukuran. Proses perpindahan  $^{222}\text{Rn}$  dari reservoir ke permukaan diperkirakan melalui mekanisme gas pembawa yang berasal dari reservoir panas bumi melalui zona permeabel.

**Kata kunci:** radon, Gunung Tampomas, permeabilitas, panas bumi

#### ABSTRACT

*Upflow zone in the geothermal system is a zone with high permeability that serves as a path for geothermal fluid to ascend to the surface, which usually marked with fumarole at the surface. Mount Tampomas, West Java, is a potential geothermal site with some thermal manifestation in the form of hot springs, but no fumarole or steam vent exists. The up-flow or the permeable zone is difficult to identify.  $^{222}\text{Rn}$  isotope is a radiogenic isotope that its concentration in soil gas can infer primary permeability as well as secondary permeability (structure). Series of  $^{222}\text{Rn}$  measurement in soil gas has been performed from 56 sampling positions around Mount Tampomas to evaluate  $^{222}\text{Rn}$  anomaly by a statistical method and its relation with high permeability area, geological structure, and geothermal manifestation. The measurement and statistical evaluation results show that  $^{222}\text{Rn}$  concentration clustered into low (background), high, and anomaly concentration. The background values in 16 places are below  $825 \text{ Bq/m}^3$ , while a high level in 32 areas between  $825\text{--}7688 \text{ Bq/m}^3$  and anomaly in 8 places above  $7688 \text{ Bq/m}^3$ . Most of the locations with high and anomaly  $^{222}\text{Rn}$  concentrations did not locate near a structure lineament. All measurements near hot springs have a high  $^{222}\text{Rn}$  and anomaly. Ciseupan hot spring is an exception which may indicate that the hot spring is discharged laterally (*outflow*). Furthermore, there is no indication of a correlation between  $^{222}\text{Rn}$  with the elevation of the measurement location. The process of  $^{222}\text{Rn}$  transfer from the reservoir to the surface is considered by the geothermal reservoir's gas carrier mechanism through permeable zones.*

**Keywords:** radon, Mount Tampomas, permeability, geothermal

## PENDAHULUAN

Radon merupakan gas mulia yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak mudah bersenyawa secara kimia dengan nuklida alam lainnya. Di alam terdapat tiga isotop radon yaitu  $^{219}\text{Rn}$  (*actinon*) dengan waktu paruh 4 detik yang berasal dari deret peluruhan *actinium*,  $^{220}\text{Rn}$  (*thoron*) dengan waktu paruh 55,6 detik yang berasal dari deret peluruhan  $^{232}\text{Th}$  (*thorium*) dan  $^{222}\text{Rn}$  dengan waktu paruh 3,824 hari. Isotop  $^{222}\text{Rn}$  adalah produk peluruhan  $^{226}\text{Rn}$  dalam deret peluruhan  $^{238}\text{U}$ , meluruh dengan memancarkan partikel  $\alpha$ . Karena partikel  $\alpha$  memiliki bahaya bagi kesehatan,  $^{222}\text{Rn}$  sering disurvei secara rutin untuk mitigasi paparannya baik di tempat umum seperti sekolah [1], pemandian air panas [2], maupun rumah pribadi [3]. Selain itu, deteksi  $^{222}\text{Rn}$  juga digunakan sebagai perunut alami untuk beberapa aplikasi dalam studi hidrologi seperti kuantifikasi arus masuk air tanah ke dalam danau [4] dan kolam penampungan (*pond*) [6], sejarah dan dinamika aliran air tanah (kombinasi dengan isotop radium) [5], kuantifikasi infiltrasi air sungai ke dalam air tanah dalam saat debit tinggi maupun rendah [7]. Dalam bidang geologi,  $^{222}\text{Rn}$  digunakan dalam studi zona patahan [8, 9], studi sebagai prekursor gempa bumi [10, 11] dan studi zona patahan dalam sistem panas bumi [12, 13].

Penelitian terpadu di Gunung Tampomas menggunakan metode hidrogeokimia, isotop stabil serta  $^{222}\text{Rn}$  pernah dilakukan untuk membuat model hidrogeologi konseptual daerah panas bumi Gunung Tampomas, khususnya menjelaskan mekanisme imbuh dan pencampuran air meteorik dengan fluida reservoir. Dalam penelitian tersebut,  $^{222}\text{Rn}$  dari gas tanah berkaitan dengan zona permeabel daerah panas bumi Gunung Tampomas [14]. Namun demikian, dari 29

sampel yang diambil dalam penelitian tersebut, hanya 2 sampel diambil dari sisi selatan Gunung Tampomas, sisanya didominasi sampel dari sisi utara Gunung Tampomas. Selain itu, penentuan nilai anomali konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  belum didasarkan pada perhitungan statistik.

Dalam penelitian ini, survei kandungan  $^{222}\text{Rn}$  gas tanah dilakukan di daerah panas bumi Gunung Tampomas, di sisi utara–timur dari Gunung Tampomas dimana terdapat banyak manifestasi mata air panas, serta di beberapa lokasi di sebelah selatan Gunung Tampomas, dengan wilayah cakupan yang lebih luas dari penelitian sebelumnya. Pengukuran aktivitas  $^{222}\text{Rn}$  ini dilakukan bertujuan untuk melihat anomali kandungan  $^{222}\text{Rn}$  dengan menggunakan metode statistik, serta relasinya antara daerah dengan permeabilitas tinggi dengan struktur geologi dan manifestasi panas bumi.

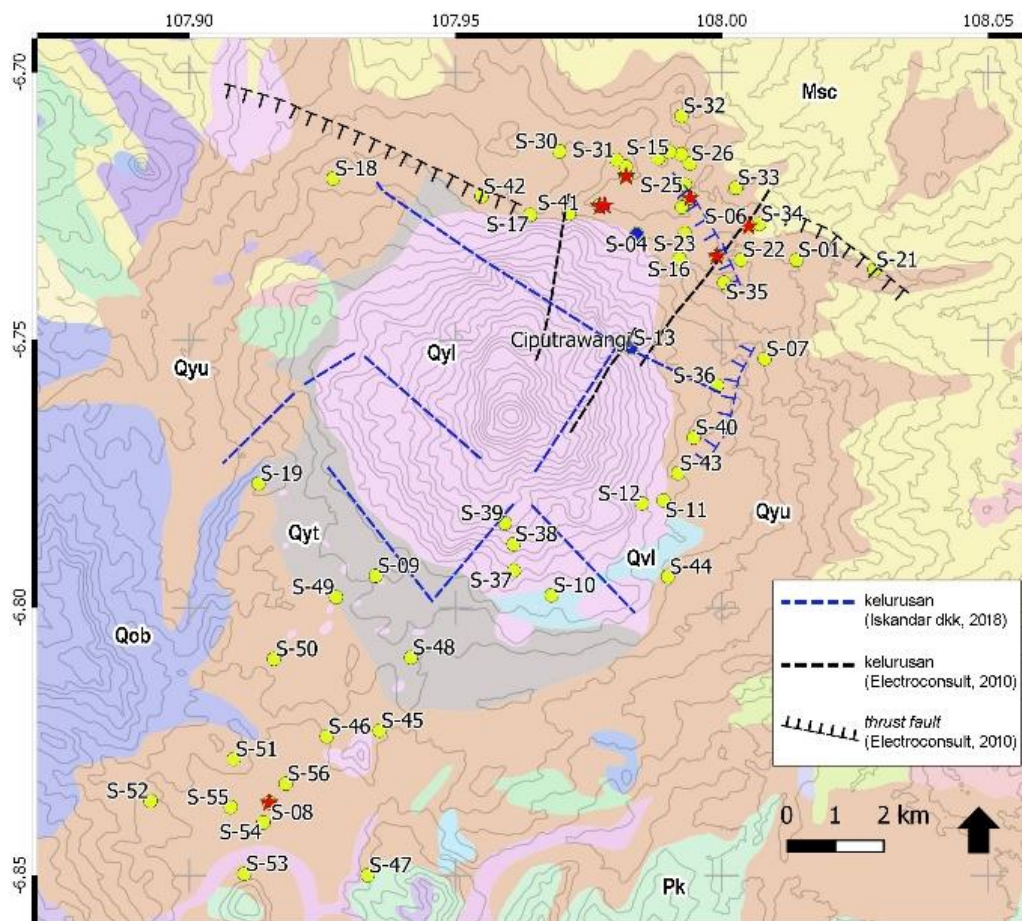
## Geologi Gunung Tampomas

Lokasi penelitian yaitu Gunung Tampomas merupakan gunung api tidak aktif berumur kuartar [15] yang terletak pada perbatasan zona antiklinorium Bogor yang bagian timurnya terdapat puncak gunung api muda seperti Bukit Tunggul dan Ciremai. Morfologi dominan di daerah penelitian Gunung Tampomas terdiri dari [16]: (1) dataran laharik, dengan kemiringan landai berarah selatan–tenggara pada ketinggian 350–800 mdpl; (2) piroklastik *recent*, berupa perbukitan rendah dan dataran pada ketinggian 250–950 mdpl terletak di sisi barat, utara, dan timur dari Gunung Tampomas yang berasosiasi dengan produk aliran dan jatuhnya piroklastik dari Gunung Tampomas; (3) dataran breksi piroklastik, dimana lapisan breksi tertutupi oleh deposit eluvium/koluvium yang tipis, terletak di sisi

utara dan timur laut dari Gunung Tampomas pada ketinggian sekitar 300 mdpl; (4) kerucut vulkanik, di bagian bawah berupa aliran lava tua, sedangkan bagian atas berupa aliran lava yang lebih muda.

Beberapa satuan batuan yang terdapat di wilayah penelitian dan sekitarnya berdasarkan peta geologi regional, dari yang tertua hingga termuda antara lain (Gambar 1): Formasi Subang Batupasir (Mss, hijau), Formasi Subang Batulempung (Msc, kuning), Formasi Kaliwangu (Pk, hijau) dan Formasi Citalang (Pt, kuning); produk gunung api tua yang terdiri dari batuan gunung api tak teruraikan berupa lava dan lahar berselang-seling (Qvu, hijau) dan lava (Qvl, biru muda); produk

gunung api muda yang terdiri dari lava yang sebagian telah terpropilitisasi (Qyl, ungu) dan batuan gunung api tak teruraikan berupa pasir tufaan, lapilli, breksi, lava, aglomerat (Qyu, coklat), serta sedimen aluvial berupa lempung, pasir, dan kerikil (Qa, hijau) [17]. Adanya alterasi propilitik menandakan terdapat aktivitas ubahan oleh fluida hidrotermal, walaupun tampak tidak terlalu intensif, dengan sumber panas diperkirakan berasal dari intrusi plutonik dan reservoir berada pada lapisan vulkanik kuarter [16]. Sistem panas bumi Gunung Tampomas sendiri diperkirakan merupakan sistem panas bumi entalpi medium dengan perkiraan letak reservoir yang cukup dalam [19].



Gambar 1. Geologi Gunung Tampomas, Jawa Barat [17, 18]. Titik merah = mata air panas; titik biru = mata air dingin/air permukaan; titik kuning = lokasi pengambilan sampel  $^{222}\text{Rn}$  tanah. Struktur berupa kelurusan (garis putus-putus) dan *thrust fault* [16, 14].

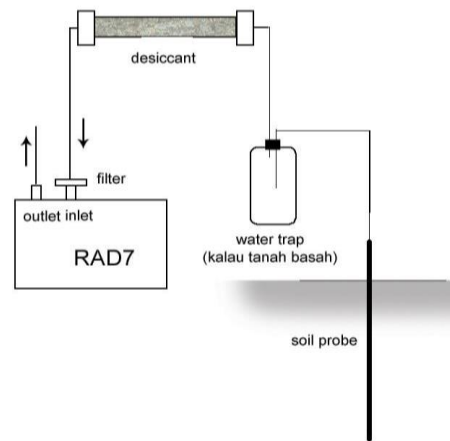
## METODOLOGI

Sampel gas  $^{222}\text{Rn}$  tanah diambil pada kedalaman sekitar 0,5–0,8 m dari permukaan dengan menggunakan *soil probe* terbuat dari *stainless steel* berdiameter 1 cm yang terhubung ke alat pencacah melalui pengering berupa *drierite* ( $\text{CaSO}_4$ ) yang berfungsi sebagai pengontrol kelembaban udara (Gambar 2).

Alat pencacah yang digunakan adalah DurrIDGE RAD7 dengan protokol pencacahan metode *Grab*. Pada metode ini pompa di dalam alat akan mengalirkan gas tanah masuk ke dalam ruang pencacah selama 5 menit. Setelah itu, alat akan mulai mencacah dalam 4 siklus dengan masing-masing siklus selama 5 menit. Selama dilakukan pencacahan, kelembaban ruang detektor dimonitor dan dijaga agar tidak melebihi 10% supaya kinerja detektor tetap baik. Satuan pencacahan  $^{222}\text{Rn}$  dinyatakan dalam  $\text{Bq}/\text{m}^3$ . Untuk meminimalisir kontaminasi dari pencacahan sebelumnya, sebelum pencacahan berikutnya dilakukan *flushing* (pembilasan) dengan cara mengalirkan udara luar ( $\pm 1$  m dari permukaan tanah) selama  $2 \times 5$  menit menggunakan pompa internal RAD7.

Pengambilan sampel dilakukan pada 56 titik di sekitar Gunung Tampomas, terutama di sekitar lokasi mata air panas (Gambar 1) di utara Gunung Tampomas, kemudian sisi timur, selatan dan menerus ke arah barat daya dimana terdapat mata air panas Ciseupan. Keseluruhan pengambilan sampel dilakukan dalam kondisi cuaca yang sama, yaitu cuaca cerah tanpa hujan untuk meminimalisir pengaruh meteorologis seperti kandungan air dan kelembaban tanah, temperatur dan kecepatan angin [20, 21] terhadap kandungan  $^{222}\text{Rn}$ , yaitu semakin tinggi kandungan air akan menurunkan kandungan  $^{222}\text{Rn}$ . Selain itu, sebagian besar lokasi pengukuran berada

dalam formasi geologi yang relatif sama (Gambar 1) sehingga diharapkan jenis batuan dan mineral juga sama. Penempatan *soil probe* saat pengukuran juga dijauhkan dari bangunan dan tanah bekas timbunan untuk menghindari emisi radon dari bahan bangunan [22]. Dengan demikian adanya anomali  $^{222}\text{Rn}$  hanya akan disebabkan oleh perbedaan permeabilitas.



Gambar 2. Susunan alat pengukuran  $^{222}\text{Rn}$  dari gas tanah.

Pengolahan data pencacahan dilakukan secara statistik untuk menentukan adanya anomali  $^{222}\text{Rn}$ . Metode statistik yang umum digunakan dalam eksplorasi geokimia adalah menggunakan diagram frekuensi kumulatif [23–26] untuk menentukan pola cacahan rendah atau *background* (latar belakang) serta anomalnya.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

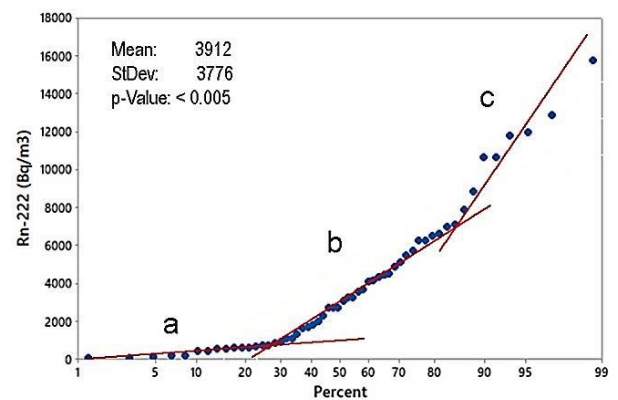
Dari hasil pengukuran  $^{222}\text{Rn}$  di 56 lokasi terlihat bahwa konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  terbesar terdapat di selatan Gunung Tampomas pada titik S-48 (Cimalaka) sebesar  $15775 \text{ Bq}/\text{m}^3$  dan terendah di timur laut Gunung Tampomas pada titik S-03 (Cibubuan) yaitu sebesar  $70 \text{ Bq}/\text{m}^3$  (Tabel 1). Rata-rata konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  tanah dari seluruh pengukuran sebesar  $3912 \text{ Bq}/\text{m}^3$  dengan simpangan ( $1\alpha$ ) sebesar  $3776 \text{ Bq}/\text{m}^3$ .

Tabel 1. Hasil rata-rata pencacahan <sup>222</sup>Rn gas tanah dari 4 siklus pencacahan

No.	Kode	Cacah (Bq/m <sup>3</sup> )	Elevasi (m)	X (derajat)	Y (derajat)
1	S-01	3223	323	108,014	-6,7351
2	S-02	1975	329	107,999	-6,7344
3	S-03	70	296	107,994	-6,7235
4	S-04	713	359	107,984	-6,7302
5	S-05	8855	298	107,977	-6,7249
6	S-06	196	310	108,005	-6,7288
7	S-07	4320	449	108,008	-6,7535
8	S-08	79	470	107,915	-6,8364
9	S-09	751	613	107,935	-6,7941
10	S-10	1798	675	107,968	-6,7977
11	S-11	607	618	107,989	-6,7800
12	S-12	1099	659	107,985	-6,7805
13	S-13	1615	657	107,983	-6,7515
14	S-14	2703	298	107,982	-6,7194
15	S-15	5485	306	107,988	-6,7161
16	S-16	3068	367	107,992	-6,7349
17	S-17	193	347	107,964	-6,7267
18	S-18	3560	426	107,927	-6,7198
19	S-19	4863	550	107,913	-6,7768
20	S-21	440	278	108,029	-6,7369
21	S-22	6500	361	108,004	-6,7350
22	S-23	621	334	107,993	-6,7301
23	S-24	392	302	107,992	-6,7252
24	S-25	12900	297	107,993	-6,7211
25	S-26	1060	295	107,994	-6,7170
26	S-27	6620	302	107,992	-6,7153
27	S-28	2720	305	107,990	-6,7149
28	S-29	557	308	107,982	-6,7176
29	S-30	4110	346	107,969	-6,7148
30	S-31	4170	339	107,980	-6,7164
31	S-32	2680	312	107,992	-6,7082
32	S-33	620	312	108,003	-6,7216
33	S-34	6270	330	108,007	-6,7284
34	S-35	12010	367	108,000	-6,7393
35	S-36	4540	525	107,999	-6,7585
36	S-37	4430	799	107,961	-6,7931
37	S-38	670	894	107,961	-6,7881
38	S-39	904	997	107,959	-6,7842
39	S-40	3250	566	107,995	-6,7682
40	S-41	5690	353	107,971	-6,7264
41	S-42	1350	386	107,955	-6,7232
42	S-43	7880	575	107,992	-6,7749
43	S-44	7075	551	107,990	-6,7942
44	S-45	3688	525	107,936	-6,8229

45	S-46	5123	513	107,926	-6,8240
46	S-08	134	470	107,915	-6,8364
47	S-47	6233	466	107,933	-6,8500
48	S-48	15775	564	107,942	-6,8093
49	S-49	10650	589	107,928	-6,7981
50	S-50	565	579	107,916	-6,8096
51	S-51	10650	540	107,908	-6,8283
52	S-52	11825	516	107,893	-6,8361
53	S-53	6988	490	107,910	-6,8497
54	S-54	2270	489	107,914	-6,8401
55	S-55	1688	484	107,908	-6,8372
56	S-56	823	497	107,918	-6,8329

Hasil pengolahan statistik menggunakan metode frekuensi kumulatif dapat dilihat pada Gambar 3. Nilai *p-value* di bawah 0,05 mengindikasikan bahwa sebaran <sup>222</sup>Rn tidak mengikuti distribusi normal. Dari grafik tersebut terlihat bahwa terdapat tiga segmen pola konsentrasi <sup>222</sup>Rn yaitu: (a) konsentrasi rendah atau *background*, dengan konsentrasi <sup>222</sup>Rn di bawah 825 Bq/m<sup>3</sup> sebanyak 16 titik; (b) konsentrasi tinggi, antara 825–7075 Bq/m<sup>3</sup> sebanyak 32 titik; (c) anomali atau di atas ambang (*threshold*), yaitu lebih dari 7600 Bq/m<sup>3</sup>, sebanyak 8 titik. Nilai *threshold* ini juga dapat diperoleh melalui perhitungan yaitu nilai rata-rata (3912 Bq/m<sup>3</sup>) ditambah simpangan baku (3776 Bq/m<sup>3</sup>) [25] sebesar 7688 Bq/m<sup>3</sup>, tidak berbeda jauh dengan cara ekstrapolasi grafik pada Gambar 3.



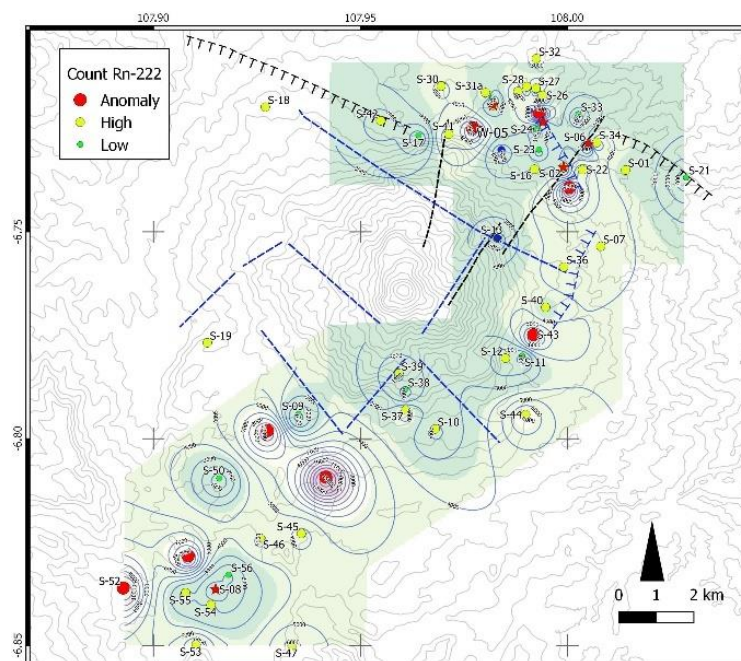
Gambar 3. Diagram frekuensi kumulatif dari <sup>222</sup>Rn. Terdapat tiga populasi: (a) rendah, (b) tinggi, dan (c) anomali.

Konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  anomali tersebut terdistribusi baik di utara Gunung Tampomas, maupun di selatannya. Demikian pula dengan konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  tinggi dan rendah terdapat di sisi utara dan selatan gunung (Gambar 4). Dari struktur kelurusan patahan yang telah terpetakan berdasarkan penginderaan jauh [14, 16] terlihat bahwa di lokasi pengukuran dengan jarak sekitar 100 m atau kurang dari patahan terdapat: 1 lokasi dengan anomali  $^{222}\text{Rn}$  (12,5% dari keseluruhan anomali), 7 lokasi dengan konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  tinggi (21,88%) dan 3 lokasi dengan konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  rendah (18,75%). Selain itu, pada semua lokasi pengukuran yang berada di dekat mata air panas, konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  terukur tinggi dan anomali, kecuali di mata air panas Ciseupan.

Dari pengamatan tersebut, hanya sebagian segmen struktur yang berasosiasi dengan konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  yang tinggi, namun sebagian besar titik pengukuran dengan  $^{222}\text{Rn}$  tinggi dan anomali tidak berasosiasi (berlokasi jauh) dengan struktur. Rendahnya asosiasi ini dapat disebabkan oleh beberapa

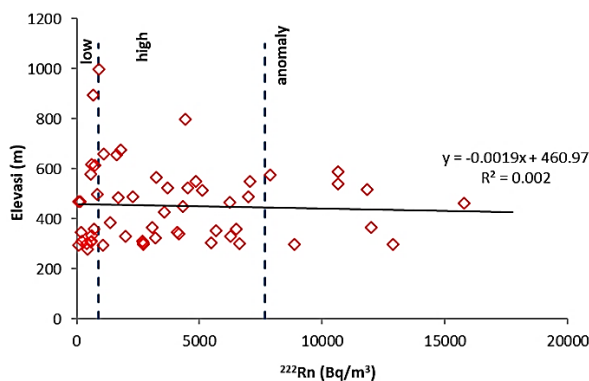
hal: (1) kelurusan merupakan hasil analisis dari penginderaan jauh, belum dikonfirmasi dengan *ground check* maupun pemeriksaan geofisika; (2) struktur zona patahan dapat menjadi penghantar (*conduit*) atau penghalang (*barrier*) maupun kombinasi keduanya bagi aliran fluida [27] sehingga kelurusan/patahan tidak selalu menunjukkan permeabilitas; (3) adanya struktur yang belum terpetakan, terutama di daerah selatan Gunung Tampomas.

Mekanisme  $^{222}\text{Rn}$  mencapai permukaan tanah melalui zona patahan terjadi dengan cara [28]: (1) difusi dari runutan (*trace*) peluruhan  $^{238}\text{U}$  yang terdispersi dan terakumulasi di lapisan tanah; (2) transport oleh gas pembawa seperti  $\text{N}_2$  dan  $\text{CO}_2$  dari batuan yang lebih dalam. Jika mekanisme pertama terjadi, maka konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  akan mengikuti distribusi normal [28]. Hasil pengukuran di sekitar Gunung Tampomas tidak mengikuti distribusi normal, mengindikasikan bahwa mekanisme difusi tidak dominan, tetapi lebih mengikuti mekanisme transport oleh gas pembawa [29].



Gambar 4. Distribusi cacahan  $^{222}\text{Rn}$  di lokasi penelitian. Cacahan pada lokasi S-18 dan S-19 tidak disertakan dalam kontur karena letaknya yang relatif jauh dari titik lain. Simbol bintang = mata air panas.

Hubungan antara  $^{222}\text{Rn}$  dan elevasi dapat dilihat pada Gambar 5. Secara umum, semakin tinggi elevasi akan semakin jauh jarak aliran  $^{222}\text{Rn}$  ke permukaan, dengan asumsi kedalaman sumber yang sama dan permeabilitas yang homogen, sehingga pada elevasi yang lebih tinggi diharapkan konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  akan lebih rendah dibanding konsentrasi pada elevasi yang lebih rendah (berbanding terbalik). Namun dari grafik pada Gambar 5 terlihat bahwa tidak ada korelasi yang signifikan antara  $^{222}\text{Rn}$  dengan elevasi. Dengan demikian, aliran  $^{222}\text{Rn}$  ke permukaan cenderung dipengaruhi oleh permeabilitas dan struktur patahan.



Gambar 5. Hubungan antara konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  dengan elevasi lokasi pengukuran.

## KESIMPULAN

Hasil pemetaan konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  dari gas tanah di sekitar Gunung Tampomas menunjukkan pola sebaran yang tidak mengikuti distribusi normal dan terbagi atas konsentrasi rendah, tinggi, dan anomali, dimana sebagian besar konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  tinggi dan anomali tidak terkait langsung dengan kelurusan atau struktur yang ada, namun menunjukkan permeabilitas yang tinggi dan kemungkinan daerah *up flow* sistem panas bumi Tampomas. Konsentrasi  $^{222}\text{Rn}$  dalam gas tanah tersebut lebih dominan disebabkan oleh mekanisme transport oleh gas pembawa dari kedalaman dibandingkan

proses difusi. Metoda anomali  $^{222}\text{Rn}$  yang digunakan dalam penelitian ini merupakan metoda yang relatif sederhana dan cepat untuk identifikasi daerah *up flow* maupun *out flow* berdasarkan permeabilitasnya, terutama bermanfaat untuk aplikasi di daerah panas bumi yang tidak memiliki manifestasi berupa fumarol (*steam vent*) atau *steaming ground*.

Disarankan adanya studi geologi lanjutan yang lebih detail (*ground check*), khususnya mengenai arsitektur zona patahan untuk investigasi peran struktur apakah sebagai *conduit* atau *barrier* aliran fluida.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PAIR-BATAN yang telah membiayai penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan di kelompok Hidrologi dan Panas Bumi PAIR-BATAN yang telah membantu pekerjaan lapangan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Damla dan K. Aldemir, "Radon survey and soil gamma doses in primary schools of Batman, Turkey," *Isotopes Environ. Health Stud.*, Vol. 50 No. 2, pp. 226–234, 2014.
- [2] V. Moreno, J. Bach, M. Zarroca, L. Font, C. Roqué, dan R. Linares, "Characterization of radon levels in soil and groundwater in the North Maladeta Fault area (Central Pyrenees) and their effects on indoor radon concentration in a thermal spa," *J. Environ. Radioact.*, vol. 189, pp. 1–13, 2018.
- [3] M. Karpińska, S. Wołkiewicz, Z. Mnich, M. Zalewski, K. Mamont-Cieśla, dan J. Kapała, "Comparative studies of health hazard from radon ( $\text{Rn-222}$ ) in two selected lithologic formations in the Suwalki region (in Poland)," *J. Environ. Radioact.*, vol. 61, no. 2, pp. 149–158, 2002.
- [4] N. T. Dimova, W. C. Burnett, J. P. Chanton, dan J. E. Corbett, "Application of radon-222 to investigate groundwater discharge into small shallow lakes," *J. Hydrol.*, vol. 486, pp. 112–122, 2013.
- [5] Y. Kiro, Y. Weinstein, A. Starinsky, dan Y. Yechieli, "Application of radon and radium isotopes to groundwater flow dynamics: An example from the Dead Sea," *Chem. Geol.*, vol.

- 411, pp. 155–171, 2015.
- [6] D. R. Corbett, W. C. Burnett, P. H. Cable, dan S. B. Clark, “Radon tracing of groundwater input into Par Pond, Savannah River Site,” *J. Hydrol.*, vol. 203, no. 1–4, pp. 209–227, 1997.
- [7] L. Stellato, F. Terrasi, F. Marzaioli, M. Belli, U. Sansone, dan F. Celico, “Is  $^{222}\text{Rn}$  a suitable tracer of stream-groundwater interactions? A case study in central Italy,” *Appl. Geochemistry*, vol. 32, pp. 108–117, 2013.
- [8] S. de la Cruz *et al.*, “Radon emanation related to geothermal faults,” *Int. J. Radiat. Appl. Instrumentation. Part D. Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, vol. 12, no. 1–6, pp. 875–878, 1986.
- [9] M. H. Al-Tamimi dan K. M. Abumurad, “Radon anomalies along faults in North of Jordan,” *Radiat. Meas.*, vol. 34, no. 1–6, pp. 397–400, 2001.
- [10] L. L. Chyi, T. J. Quick, T. F. Yang, dan C. H. Chen, “The experimental investigation of soil gas radon migration mechanisms and its implication in earthquake forecast,” *Geofluids*, vol. 10, no. 4, pp. 556–563, 2010.
- [11] K. Koike, T. Yoshinaga, dan H. Asaue, “Characterizing long-term radon concentration changes in a geothermal area for correlation with volcanic earthquakes and reservoir temperatures: A case study from Mt. Aso, southwestern Japan,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 275, pp. 85–102, 2014.
- [12] N. E. Whitehead, “Radon measurements at three New Zealand geothermal areas,” *Geothermics*, vol. 9, no. 3–4, pp. 279–286, 1980.
- [13] J. R. J. Davidson, J. Fairley, A. Nicol, D. Gravelly, dan U. Ring, “The origin of radon anomalies along normal faults in an active rift and geothermal area,” *Geosphere*, vol. 12, no. 5, pp. 1656–1669, 2016.
- [14] I. Iskandar, F. A. Dermawan, dan J. Y. Sianipar, “Characteristic and Mixing Mechanisms of Thermal Fluid at the Tampomas Volcano, West Java, Using Hydrogeochemistry, Stable Isotope and  $^{222}\text{Rn}$  Analyses,” *Geosciences*, vol. 8, 2018.
- [15] S. Bronto, “Fasies gunung api dan aplikasinya,” *J. Geol. Indones.*, vol. 1, no. 2, pp. 59–71, 2006.
- [16] Electroconsult, “Geoscientific survey of the Tampomas geothermal field, West Java Indonesia,” Baranzate - Italy, 2010.
- [17] P. H. Silitonga, “Peta Geologi Lembar Bandung, Jawa Barat, skala 1:1000.000.” Direktorat Geologi Bandung, 1973.
- [18] Djuri, “Peta Geologi Lembar Arjawinangun, Jawa, Skala 1:100.000.” Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung, 1995.
- [19] R. Prasetio, N. Laksminingpuri, dan S. Satrio, “Karakteristik Kimia Dan Isotop Fluida Panas Bumi Daerah Gunung Tampomas, Jawa Barat,” *Ris. Geol. dan Pertamb.*, vol. 28, no. 1, p. 1, 2018.
- [20] H. Kojima dan K. Nagano, “The influence of meteorological and soil parameters on radon exhalation,” in *Proceedings of Radon in the Living Environment*, Athens, Greece, pp. 627–642, 1999.
- [21] F. Kulali, I. Akkurt, dan N. Özgür, “The effect of meteorological parameters on radon concentration in soil gas,” *Acta Phys. Pol. A*, vol. 132, no. 3, pp. 999–1001, 2017.
- [22] C. Cosma, A. Cucuș-Dinu, B. Papp, R. Begy, dan C. Sainz, “Soil and building material as main sources of indoor radon in Bâița-ștei radon prone area (Romania),” *J. Environ. Radioact.*, vol. 116, pp. 174–179, 2013.
- [23] A. J. Sinclair, “Selection of threshold values in geochemical data,” vol. 3, pp. 129–149, 1974.
- [24] D. Risdianto dan D. Kusnadi, “The Application of a Probability Graph in Geothermal Exploration,” *Proc. World Geotherm. Congr. 2010 Bali, Indones.*, pp. 25–29, 2010.
- [25] N. K. Phuong, A. Harijoko, R. Itoi, dan Y. Unoki, “Water geochemistry and soil gas survey at Ungaran geothermal field, central Java, Indonesia,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 229–230, pp. 23–33, 2012.
- [26] Suryantini, “Statistical Analysis of Mercury Data from Soil Survey in Non-volcanic Geothermal System: A Case Study in Sulawesi,” *Procedia Earth Planet. Sci.*, vol. 6, pp. 212–218, 2013.
- [27] J. S. Caine, J. P. Evans, and C. B. Forster, “Fault zone architecture and permeability structure,” *Geology*, vol. 24, no. 11, pp. 1025–1028, 1996.
- [28] Z. Chen, Y. Li, Z. Liu, J. Wang, X. Zhou, dan J. Du, “Radon emission from soil gases in the active fault zones in the Capital of China and its environmental effects,” *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–12, 2018.
- [29] L. Malmqvist, M. Isaksson, dan K. Kristiansson, “Radon migration through soil and bedrock,” *Geoexploration*, vol. 26, no. 2, pp. 135–144, 1989.