



Seminar Nasional Ilmu Teknik dan Aplikasi Industri (SINTA)

Homepage: sinta.eng.unila.ac.id



Studi Komparatif Karakteristik Fluida Manifestasi Daerah *Upflow* dan *Outflow* pada Sistem Geotermal Tangkuban Perahu

N.H. Maulida ^{a,*}, Suharno ^b, M. Sarkowi ^a dan A. Hidayatika ^b

^aTeknik Geofisika Universitas Lampung

^aTeknik Geologi Universitas Lampung

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diterima 11/11/2024
Direvisi 13/01/2025
Dipublish 22/05/2025

Kata kunci:
geokimia
geotermal
zona upflow
zona outflow

ABSTRAK

Energi geotermal atau panas bumi merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai alternatif energi. Dalam tahap eksplorasi, pemahaman mengenai sistem panas bumi sangatlah penting agar pemanfaatan energi geotermal menjadi optimal. Penentuan zona *upflow* dan *outflow* yang tepat juga memiliki peran yang sangat penting dalam penentuan pengembangan sumur geotermal. Selain dapat dibedakan dengan melihat karakteristik geologi maupun morfologinya, zona *upflow* dan *outflow* juga dapat dibedakan dengan menganalisa komposisi kimia dari fluida manifestasi yang ada pada dua zona tersebut. Berdasarkan hasil analisis karakteristik fluida yang dilakukan pada zona *upflow* dan *outflow* pada Sistem Geotermal Tangkuban Perahu, dapat diidentifikasi perbedaan signifikan dalam komposisi kimia, pH dan temperatur. Pada zona *upflow*, temperatur fluida cenderung tinggi (mendekati titik didih), pH yang lebih asam, kandungan Cl serta SO₄ yang tinggi dan kandungan HCO₃ yang rendah. Sedangkan pada zona *outflow*, temperatur fluida lebih rendah, pH cenderung netral, kandungan Cl serta SO₄ yang rendah dan kandungan HCO₃ yang tinggi. Perbedaan ini menunjukkan adanya proses geokimia yang berbeda antara kedua zona. Zona *upflow* cenderung minim proses interaksi dengan air meteorik maupun dengan batuan sekitar, sementara pada zona *outflow* kemungkinan adanya pencampuran dengan air meteorik dan interaksi dengan batuan sebelum muncul di permukaan cenderung lebih besar.

1. Pendahuluan

Energi geotermal merupakan salah satu sumber energi terbarukan dengan potensi yang besar yang ada di Indonesia. Gugusan gunung api yang tersebar di sebagian besar kepulauan Indonesia menjadi lingkungan yang mendukung bagi terbentuknya sistem panas bumi. Potensi yang besar ini belum sepenuhnya bisa dimanfaatkan karena masih banyaknya keterbatasan pemahaman terkait sistem panas bumi. Untuk dapat memahami sistem panas bumi dengan lebih baik

dilakukanlah berbagai eksplorasi (geologi, geokimia, geofisika) yang saling mendukung dan melengkapi.

Survei geokimia merupakan salah satu survei yang wajib dilakukan pada setiap tahapan eksplorasi panas bumi. Survei ini dilaksanakan dengan pengambilan sampel fluida pada manifestasi permukaan dan menganalisis komposisi kimia masing-masing sampel. Dari hasil analisa ini akan didapatkan karakteristik fluida pada setiap manifestasi sehingga dapat diketahui bagaimana dinamika fluida di bawah permukaan, dari mana sumber fluida berasal, dan bagaimana interaksi

* Nanda Hanyfa Maulida
E-mail: nandahanyfa@eng.unila.ac.id

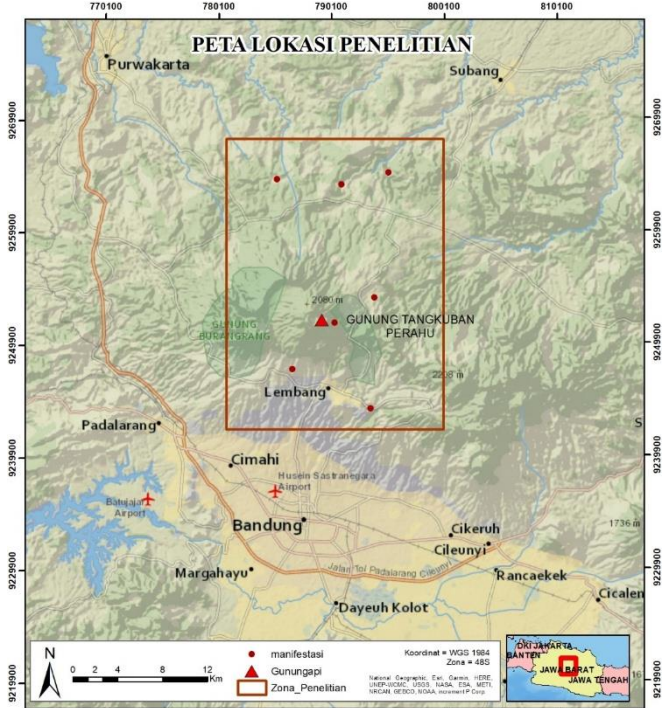
yang terjadi antara fluida dengan batuan sekitar. Karakterisasi fluida melalui kajian geokimia ini penting untuk dapat menyusun model konseptual sistem panas bumi yang lebih akurat dan menyeluruh. Kawasan Tangkuban Perahu memiliki berbagai macam manifestasi panas bumi, baik berupa fumarol, kolam air panas, maupun mata air panas. Sampel fluida yang diambil dari berbagai manifestasi ini menunjukkan karakteristik yang berbeda antara *upflow* dan *outflow*.

Pemahaman mengenai karakteristik fluida manifestasi pada daerah *upflow* dan *outflow* sangat penting dalam tahap eksplorasi awal dalam rangka mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya ini. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi komparasi geokimia antara daerah *upflow* dan *outflow* dalam sistem geotermal tersebut. Daerah *upflow*, yang merupakan area di mana fluida panas naik ke permukaan dengan sedikit interaksi dengan batuan, memiliki komposisi kimia yang berbeda dibandingkan dengan daerah *outflow*, di mana terjadi lebih banyak interaksi antara fluida dan batuan sebelum keluar di permukaan.

Dengan memahami perbedaan ini, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada pemahaman tentang dinamika sistem geotermal di Tangkuban Perahu, tetapi juga dapat memberikan wawasan yang lebih luas mengenai potensi pemanfaatan sumber daya geotermal di Indonesia. Melalui analisis komparatif ini, diharapkan dapat diidentifikasi karakteristik geokimia yang mendasari perbedaan antara kedua daerah tersebut, sehingga dapat mendukung pengelolaan dan pengembangan sumber daya panas bumi yang berkelanjutan.

1.1. Lokasi Penelitian

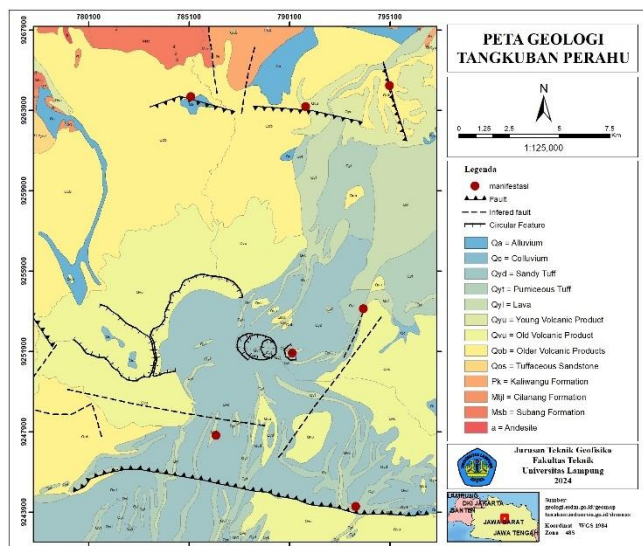
Secara administratif Gunung Tangkuban Perahu, dengan ketinggian 2084 mdpl, termasuk dalam Kecamatan Lembang, Kabupaten Bandung, terletak pada koordinat 107°35'17" BT dan 6°46' 33" LS (Gambar 1). Pencapaian daerah ini memerlukan waktu 1 – 1,5 jam dari Kota Bandung ke lokasi yang berjarak kurang lebih 30 km ke arah utara. Gunung ini merupakan salah satu gunung api aktif bertipe strato, dimana keaktifannya diindikasikan dengan adanya peningkatan seismik dari gas vulkanik di Kawah Ratu (Dana dkk., 2006). Komposisi kimia gas dari fumarol dari kawah tersebut terdiri dari *hydrous* gas (uap air CO₂ dan H₂S) (Nasution dkk., 2004).



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

1.2. Geologi Tangkuban Perahu

Morfologi gunung ini ditandai oleh kawah-kawah yang terbentuk akibat aktivitas vulkanik. Kawah Domas dan Kawah Ratu adalah dua kawah utama yang menjadi daya tarik wisata. Kawah Ratu, sebagai kawah terbesar, memiliki diameter sekitar 1.000 meter dan kedalaman yang signifikan, sementara Kawah Domas dikenal dengan aktivitas fumarol dan sumber air panasnya (Suryana, 2017). Penelitian oleh Agustin (2023) menunjukkan bahwa kondisi geologi di sekitar Tangkuban Perahu terdiri dari lapisan alluvial yang dihasilkan dari letusan gunung ini, yang berkontribusi terhadap pembentukan akuifer di sekitarnya (Agustin, 2023). Dari peta geologi (Gambar 2) diketahui bahwa litologi didominasi tuffa pasir (Qyd) dan produk vulkanik muda (Qyu) pada wilayah sentral dan produk vulkanik tua di wilayah Utara (Qvu, Qob) (Silitonga, 1973). Struktur yang terdapat pada lokasi penelitian terdiri dari Kaldera di bagian sentral, Sesar Lembang di bagian selatan dan beberapa patahan berarah E-W, NW-SE dan NE-SW (Abidin dkk., 2009; Nasution dkk., 2004; Saputra, 2014; Soetoyo, 1992).



Gambar 2. Peta Geologi Tangkuban Perahu

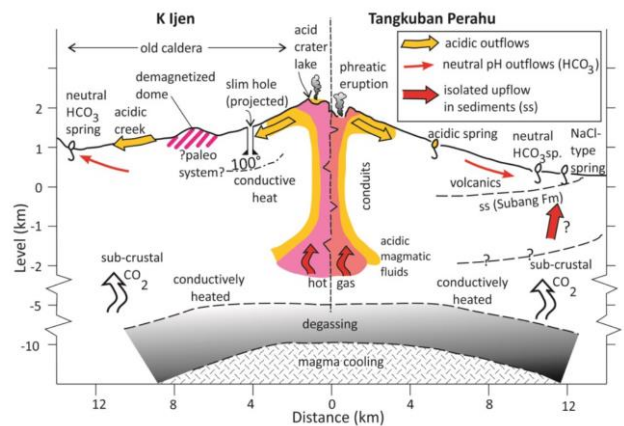
1.3. Sistem Panas Bumi Tangkuban Perahu

Sistem panasbumi menurut Hochstein dan Browne (2000) merupakan sebuah istilah umum yang menggambarkan perpindahan suatu sistem penghantaran panas didalam mantel atas dan kerak bumi dimana panas di pindahkan dari suatu sumber panas (*heat source*) menuju suatu tampungan panas (*heat sink*) yang biasanya adalah permukaan bumi. Salah satu jenis sistem panas bumi yang merepresentasikan Tangkuban Perahu adalah sistem vulkanik hidrotermal dimana transfer panas pada sistem ini dilakukan secara konvektif dengan fluida reservoir berupa campuran air meteorik dengan air magmatik.

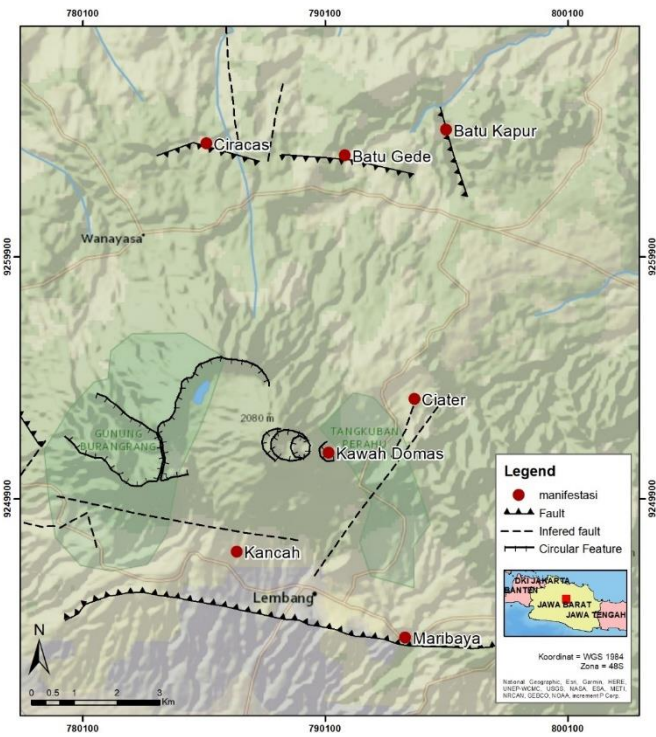
Sistem vulkanik hidrotermal berhubungan dengan stratovulkano atau kaldera muda dan menunjukkan karakteristik manifestasi permukaan yang berkaitan dengan pusat gunungapi. Manifestasi tersebut antara lain solfatar, fumarol, danau panas pH rendah, mata air panas pH rendah, dan aliran asam. Manifestasi mineral sistem ini antara lain sulfur, alunite, natroalunite, jarosite, gypsum, ephemeral hydrous sulfates, dickite, diaspore, pyrophyllite, smectites, dan residu silika (Hochstein & Browne, 2000).

Model konseptual sistem vulkanik hidrotermal pada lapangan panasbumi stratovulkano digambarkan oleh Hochstein dan Sudarman (2008) dengan mengambil dua contoh lapangan dengan morfologi yang mirip, yaitu pada Kawah Ijen dan Tangkuban Perahu. Pada gambar 3 dapat dilihat bahwa model konseptual untuk kedua wilayah ini cukup mirip dengan model Kawah Ijen digambarkan pada setengah bagian di kiri dan model Tangkuban Perahu pada setengah bagian di kanan. Sumber fluida adalah campuran dari fluida magmatik yang bersifat asam dan air meteorik yang menyebabkan keanekaragaman jenis fluida yang muncul di manifestasinya.

Sumber panas utama dari sistem panas bumi Tangkuban Perahu berasal dari magma di bawah permukaan. Zona *upflow* terletak pada bagian sentral/puncak gunung dan zona *outflow* berada di kaki gunung. Terdapat pula kemungkinan adanya zona *upflow* dari reservoir sedimen yang berada di sekitar Batu Gede (Hochstein & Sudarman, 2015).



Gambar 3. Model konseptual sistem panasbumi volcanic-hidrotermal pada lapangan Kawah Ijen (bagian kiri) dan Tangkuban Perahu (bagian kanan) (M. P. Hochstein & Sudarman, 2008)



Gambar 3. Sebaran zona manifestasi

2. Metodologi

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data komposisi mineral yang terkandung dalam fluida air yang dikumpulkan dari manifestasi yang berkaitan dengan sistem geotermal Tangkuban Perahu. Peta sebaran manifestasi dapat dilihat pada Gambar 3. Dari

setiap lokasi terdapat sampel air sejumlah satu hingga beberapa sampel sesuai dengan banyaknya keluaran mata air panas di lokasi tersebut. Data kemudian diproses dan dianalisis untuk melihat tren kemunculannya pada daerah *upflow* maupun *outflow*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Komposisi Kimia Fluida Manifestasi

Berdasarkan hasil pengukuran lapangan dan analisa kandungan kimia fluida di dapatkan sejumlah 16 sampel air manifestasi dari 7 titik utama lokasi manifestasi. Tabel 1 memperlihatkan tingkat pH dan kandungan ion-ion utama yaitu kandungan Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, HCO₃ dan SiO₂. Variasi pH pada seluruh manifestasi paling rendah bernilai 2,2 dan paling tinggi bernilai 7,4. Berdasarkan rentang tersebut maka diklasifikasikan dua jenis sifat fluida berdasarkan pH yaitu fluida dengan pH asam dan fluida dengan pH netral. Fluida dengan pH asam memiliki pH di bawah 5 sedangkan fluida dengan pH netral memiliki pH lebih dari 5 dan kurang dari 8. Manifestasi yang memiliki pH asam adalah manifestasi pada wilayah Domas, Kancanh dan Ciater sementara manifestasi lainnya memiliki pH netral. Temperatur

bervariasi paling rendah sebesar 32,2 dan paling tinggi 89,7 °C.

Pada daerah Kancanh manifestasi memiliki pH yang rendah, temperatur 32,2 – 33,5°C dan tidak ditemukan konsentrasi HCO₃ menandakan tidak adanya pencampuran air meteorik pada manifestasi. Pada daerah Maribaya, manifestasi memiliki pH normal, temperatur 45 – 46°C dengan kandungan HCO₃ yang tinggi dan kandungan Cl serta SO₄ yang rendah, mengindikasikan adanya pencampuran air meteorik yang cukup besar. Kondisi manifestasi di daerah Ciater dan Domas memiliki kondisi yang mirip dengan Kancanh dimana nilai pH rendah dan tidak ada konsentrasi HCO₃. Yang membedakan adalah besarnya temperatur, dimana Ciater berkisar 42 °C dan Domas mendekati titik didih sebesar 89,7°C. Sementara di daerah Batu Gede, Batu Kapur dan Ciracas memiliki kondisi yang mirip dengan daerah Maribaya dimana pH manifestasi netral, temperatur berkisar 40 – 50 °C, kandungan HCO₃ tinggi dan kandungan Cl serta SiO₂ rendah. Jika dilihat secara geografis, lokasi manifestasi ber-pH rendah berada tidak jauh dari kawah Ratu yang merupakan kawah utama Gunung Tangkuban Perahu dan manifestasi dengan pH netral berada pada daerah kaki Gunung Tangkuban Perahu.

Tabel 1. Karakteristik Kimia Manifestasi Tangkuban Perahu

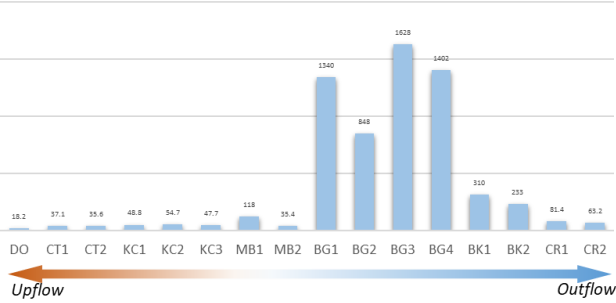
Lokasi	Label	pH	Temp	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃	SiO ₂
Kancanh-1	KC1	2,9	33,5	48,8	37,2	71,2	21,4	230	291	0	114
Kancanh-2	KC2	2,8	33,4	54,7	40	76,3	23,4	263	321	0	117
Kancanh-3	KC3	2,9	32,2	47,7	35,3	71,5	22	229	274	0	112
Maribaya-1	MB1	6,4	46	118	28,3	145	91,8	60	0	1130	187
Maribaya-2	MB2	6,2	45	35,4	8,6	47,8	26,3	16	2	357	77,5
Ciater-1	CT1	2,3	42	37,1	26,6	63,4	20,7	578	469	0	124
Ciater-2	CT2	2,2	41,8	35,6	27,4	62,7	20,7	551	455	0	124
Domas-1	DO	2,5	89,7	18,2	10,6	33	8,3	1	1070	0	131
B.Gede-1	BG1	6,5	42	1340	91,4	131	63,1	1560	0	1730	149
B.Gede-2	BG2	6,8	43,5	848	30,1	97,8	101	812	0	1700	149
B.Gede-3	BG3	7,2	45	1628	82,1	111	0,7	1581	1	826	197
B.Gede-4	BG4	7,4	44,2	1402	35,4	208	2,9	1000	1	1138	174
B.Kapur-1	BK1	6,7	50,7	310	65	50,2	43,4	229	83	791	198
B.Kapur-2	BK2	6,3	41,2	233	34,4	86,8	79,1	208	0	959	164
Ciracas-1	CR1	6,1	42,7	81,4	15,3	78,1	76,8	108	0	675	97
Ciracas-2	CR2	6,4	40	63,2	15,5	61,6	55,1	45	0	579	129

3.2. Perbandingan Konsentrasi Mineral Terlarut

Berdasarkan tabel 1 dibuat diagram batang pada tiap-tiap mineral untuk melihat secara kualitatif sebaran konsentrasi pada zona *upflow* hingga zona *outflow*. Gambar 4 memperlihatkan konsentrasi Natrium. Dapat dilihat bahwa secara umum pada zona *upflow* konsentrasi Natrium sangat rendah sementara pada zona *outflow* konsentrasi Natrium cenderung tinggi. Begitu pula dengan konsentrasi Kalium (Gambar 5), Kalsium

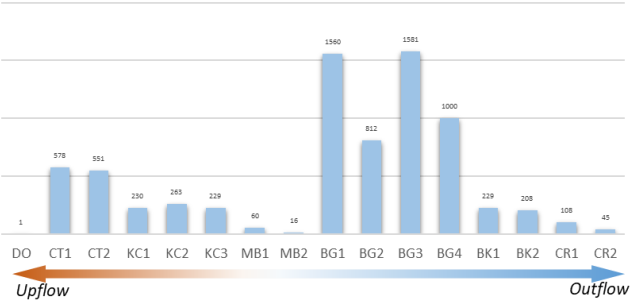
(Gambar 6), Magnesium (gambar 7), klorida (Gambar 8) dan bikarbonat (Gambar 9). Berbeda dengan konsentrasi sulfat (Gambar 10) yang menunjukkan konsentrasi yang tinggi pada zona *upflow* dan konsentrasi rendah pada zona *outflow*. Konsentrasi silika (Gambar 11) cenderung sama pada setiap manifestasi.

Natrium (Na)



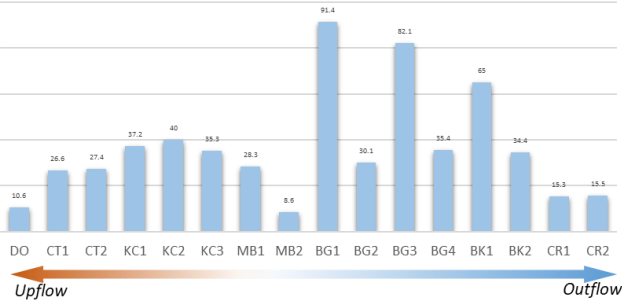
Gambar 4. Konsentrasi Natrium

Klorida (Cl)



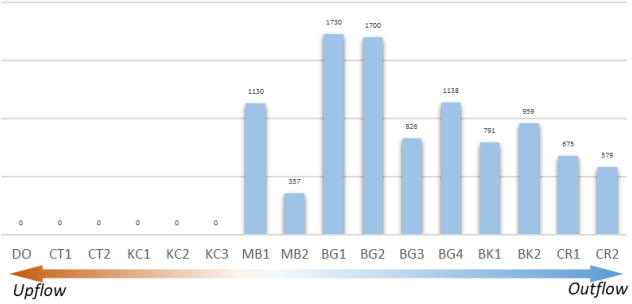
Gambar 8. Konsentrasi Klorida

Kalium (K)



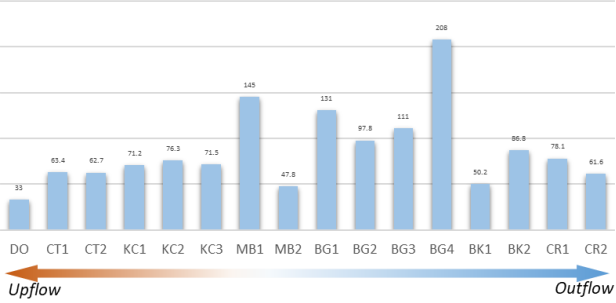
Gambar 5. Konsentrasi Kalium

Bikarbonat (HCO₃)



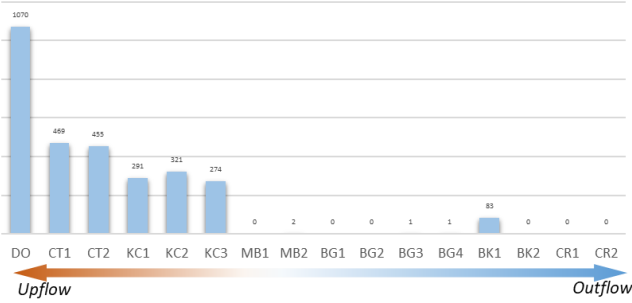
Gambar 9. Konsentrasi Bikarbonat

Kalsium (Ca)



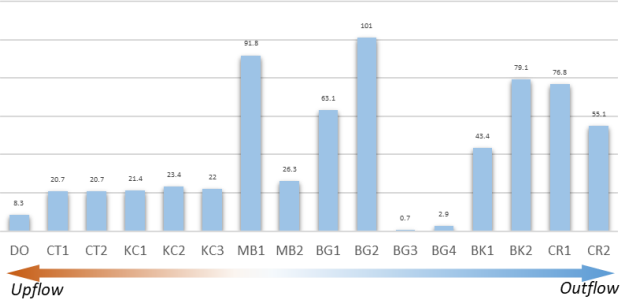
Gambar 6. Konsentrasi Kalsium

Sulfat (SO₄)



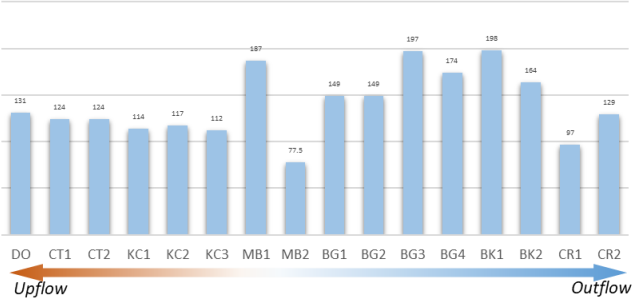
Gambar 10. Konsentrasi Sulfat

Magnesium (Mg)



Gambar 7. Konsentrasi Magnesium

Silika (SiO₂)



Gambar 11. Konsentrasi Silika

Selanjutnya dilakukan perbandingan rasio beberapa mineral, seperti rasio Cl/Mg, Na/K, Na/Ca, dan HCO_3/SO_4 (Tabel 2). Berdasarkan hasil perhitungan rasio tersebut dapat dilihat pola yang cukup jelas yaitu pada zona *upflow* rasio Cl/Mg tinggi, Na/K rendah, Na/Ca rendah dan HCO_3/SO_4 rendah. Sementara sebaliknya pada zona *outflow*, rasio Cl/Mg rendah, Na/K tinggi, Na/Ca tinggi, dan HCO_3/SO_4 tinggi. Berdasarkan jenis fluidanya, manifestasi pada zona *upflow* dan *outflow* juga terlihat perbedaannya (Gambar 12). Manifestasi pada zona *opflow* berada pada zona air Sulfat dan Sulfat-klorida. Sementara pada zona *outflow*

fluida manifestasi berada pada zona air bikarbonat dan klorida-bikarbonat.

Tabel 2. Perbandingan beberapa rasio mineral pada zona *upflow* dan *outflow*

Parameter	<i>Upflow</i>	<i>Outflow</i>
Rasio Cl/Mg	Tinggi	Rendah
Rasio Na/K	Rendah ($\sim < 15$)	Tinggi (> 15)
Rasio Na/Ca	Rendah	Tinggi
Rasio HCO_3/SO_4	Rendah	Tinggi



Gambar 12. Diagram segitiga yang menunjukkan jenis fluida pada zona upflow dan outflow

3.3 Karakteristik Fluida Daerah Upflow dan Outflow

Berdasarkan hasil pengolahan data di atas, bisa ditarik suatu karakteristik fluida pada zona *upflow* dan *outflow*. Pada zona *upflow*, fluida manifestasi *upflow* memiliki temperatur mendekati titik didih, Nilai pH sekitar 2-3, mengindikasikan zona *steam heated* dan proses *boiling* dekat permukaan. Berdasarkan kadar mineral, konsentrasi SO_4 tinggi, HCO_3 rendah mengindikasikan tingginya kondensasi gas geotermal dan minim pencampuran dengan air meteorik. Berdasarkan jenis fluida, fluida *upflow* berjenis air sulfat asam dan sulfat karbonat.

Pada zona *ouflow*, fluida manifestasi *outflow* memiliki temperatur 40-50°C, dengan pH sekitar 6-8 kadar normal. Konsentrasi SO_4 rendah dan HCO_3 tinggi indikasi tingginya percampuran dengan air meteorik. Berdasarkan jenis fluida, fluida *outflow* berjenis air bikarbonat, klorida-bikarbonat.

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang bisa diambil berdasarkan hasil penelitian ini adalah, terdapat perbedaan signifikan dalam temperatur, pH dan komposisi kimia. Pada zona *upflow*, temperatur fluida cenderung tinggi (mendekati titik didih), pH yang lebih asam, kandungan SO_4 yang tinggi dan kandungan HCO_3 yang rendah. Pada zona *outflow*, temperatur fluida lebih rendah, pH cenderung netral, kandungan SO_4 yang rendah dan kandungan HCO_3 yang tinggi. Perbedaan ini menunjukkan adanya proses geokimia yang berbeda antara kedua zona, dimana proses interaksi dengan air meteorik maupun dengan batuan sekitar pada zona *upflow* cenderung minim sementara percampuran dengan air meteorik dan interaksi dengan batuan sebelum muncul di permukaan pada zona *outflow* cenderung lebih besar.

Daftar Pustaka

- Abidin, H. Z., Andreas, H., Kato, T., Ito, T., Meilano, I., Kimata, F., Natawidjaja, D., & Harjono, H. (2009). Crustal deformation studies in Java (Indonesia) using GPS. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 3, 77–88. <https://doi.org/10.1142/S1793431109000445>
- Dana, I. N., Kadarsetia, E., Primulyana, S., Hendrasto, M., & Nasution, A. (2006). Peningkatan kegiatan Gunung Api TangkubanPerahu Jawa Barat pada bulan April 2005. *Indonesian Journal on Geoscience*, 1(4), 193–200.
- Hochstein, M. P., & Browne, P. R. (2000). Surface manifestations of geothermal systems with volcanic heat sources. Dalam *Encyclopedia of volcanoes* (Vol. 1, hlm. 835–855). Academic Press.
- Hochstein, M. P., & Sudarman, S. (2008). History of geothermal exploration in Indonesia from 1970 to 2000. *Geothermics*, 37(3), 220–266.
- Hochstein, M., & Sudarman, S. (2015). Indonesian Volcanic Geothermal Systems. *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Nasution, A., Kartadinata, M. N., Kobayashi, T., Siregar, D., Sutaningsih, E., Hadisantono, R., & Kadarstia, E. (2004). Geology, Age Dating and Geochemistry of the Tangkuban Perahu Geothermal Area, West Java, Indonesia. *Journal of the Geothermal Research Society of Japan*, 26(3), 285–303. <https://doi.org/10.11367/grsj1979.26.285>
- Saputra, M. P. (2014). *A Correlation Study between Volcanic Activities and Thermal Water Changes in Tangkuban Perahu Hydrothermal Prospect, Jawa Barat, Indonesia*.
- Silitonga, P. H. (1973). Peta Geologi Lembar Bandung, Jawa Barat. *Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Bandung*.
- Soetoyo, R. D. (1992). Peta Geologi Gunungapi Tangkuban Perahu. *Bandung, Jawa Barat, Direktorat Vulkanologi*.