



Pendekatan Analisa Geokimia dengan *Multivariate Analysis* untuk Mengetahui Tipe Mata Air Panas: Studi Kasus Lapangan Panas Bumi Mapos, Nusa Tenggara Timur

Fajar Rizki Widiatmoko¹

¹Jurusan Teknik Pertambangan – Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya (ITATS)

INFORMASI ARTIKEL

Jurnal IPTEK – Volume 23
Nomer 2, Desember 2019

Halaman:
71 – 78
Tanggal Terbit :
31 Desember 2019

DOI:
[10.31284/j.iptek.2019.v23i2.518](https://doi.org/10.31284/j.iptek.2019.v23i2.518)

ABSTRACT

Geothermal exploration is conducted by using various methods, geochemistry is one of the preliminary exploration method to determine the chemical character underneath based on the fluids from hot springs, small part of the geochemistry is determining the fluid source by using Cl-SO₄-HCO₃. Multivariate Analysis is a statistical method for creating model of samples that have many parameters through data projections, the Principal Component Analysis (PCA) can be used to know the unique parameters of each samples, so it can be used to classify the samples based on the unique parameters, the Multivariate Analysis showing a linear similarity with the common geochemical method. The Multivariate Analysis is applied by using samples from Mapos geothermal field. The PCA results showing the most unique parameter were Cl, SO₄, and HCO₃ which is related with the common geochemical method, while the PCA results showing the classification of the samples that has similar result with the common geochemical method. The different way of both of the methodology, the geochemical method is based on the fact of the field, while the Multivariate Analysis conducted the classification based on the unique parameter. If the sample was added, it will update the further model.

Keywords: *Principal Component Analysis (PCA); geothermal; geochemistry; pairwise distance*

EMAIL

widiatmoko@itats.ac.id

PENERBIT

LPPM- Institut Teknologi
Adhi Tama Surabaya
Alamat:
Jl. Arief Rachman Hakim
No.100, Surabaya 60117,
Telp/Fax: 031-5997244

Jurnal IPTEK by LPPM-ITATS is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

ABSTRAK

Eksplorasi panas bumi dilakukan dalam berbagai metode, geokimia merupakan metode eksplorasi pendahuluan panas bumi yang digunakan untuk mengetahui karakteristik kimia bawah permukaan berdasarkan data kimia air dari mata air panas, salah satu kegunaan geokimia adalah untuk mengetahui tipe sumber fluida pada suatu mata air panas, dengan menggunakan diagram Cl-SO₄-HCO₃ dapat diketahui kecenderungan asal mula fluida. *Multivariate Analysis* adalah metode statistik untuk memodelkan beberapa sampel dengan parameter yang banyak melalui proyeksi data parameter, pendekatan *Principal Component Analysis* (PCA) dapat digunakan untuk menemukan keunikan parameter pada setiap sampel, sehingga sampel dapat dikelompokkan dalam beberapa kelompok parameter yang unik, pendekatan *Multivariate Analysis* berbanding lurus dengan metode geokimia umumnya. Pendekatan *Multivariate Analysis* diterapkan pada sampel geokimia lapangan panas bumi Mapos, Hasil PCA menunjukkan parameter pembeda dari setiap sampel adalah Cl, SO₄, dan HCO₃. PCA mengelompokkan sampel berdasarkan kemiripan parameter yang sama dengan pengelompokan sampel geokimia pada umumnya. Pembeda antara kedua metode adalah dari proses, geokimia mendasarkan pengelompokan dari data lapangan, sementara *Multivariate Analysis* mengelompokkan berdasarkan keunikan parameter, sehingga dengan bertambahnya sampel akan memperbarui model selanjutnya.

Kata kunci: *Analisis komponen utama (AKU); panas bumi; geokimia; jarak kemiripan data.*

PENDAHULUAN

Eksplorasi panas bumi dilakukan melalui tahap yang panjang, dimulai dari studi pendahuluan, survey geologi, survey geokimia, survey geofisika, pengeboran eksplorasi, dan studi kelayakan [1]. Indikasi pertama yang ditemukan di lapangan adalah manifestasi yang salah satunya mata air panas, namun tidak semua sampel mata air panas menjadi standar studi kelayakan ekstraksi energi panas bumi. Dalam survey geokimia dilakukan pemerkiraan karakteristik kimia bawah permukaan dengan menggunakan sampel mata air panas. Proses kesetimbangan terjadi saat air di bawah permukaan yang mengalami pemanasan dan pelarutan senyawa terhadap batuan di bawah permukaan [2], sehingga sampel mata air panas mempunyai karakteristik yang sama dengan kondisi kimia di bawah permukaan. Secara umum sampel air panas diklasifikasikan ke dalam 3 tipe air panas; tipe *Chloride*, *Sulphate*, dan *Bicarbonate* [3].

Tipe *Chloride* sebagai tipe air yang terpanaskan pada reservoir dan tidak mengalami pencampuran dengan fluida lainnya [4], air yang terpanaskan pada reservoir secara langsung mengalir menuju permukaan melalui celah batuan yang terkekarkan dan sampai di permukaan menjadi mata air panas [2]. Tipe *Sulphate* merupakan air panas dari reservoir yang mengalami pencampuran dengan gas gunungapi saat sedang mengalir menuju permukaan menjadi mata air panas [4]. Tipe air *Bicarbonate* menunjukkan air dari reservoir yang mengalami pencampuran dengan air tanah saat sedang mengalir menuju permukaan menjadi mata air panas [5]. Interpretasi asal fluida menjadi penting karena karakter setiap fluida sangat berbeda, terlebih eksplorasi energi panas bumi mengutamakan ekstraksi langsung dari reservoir [6], sementara tipe air *Sulphate* mempunyai resiko korosi dan tipe air *Bicarbonate* mempunyai resiko *scalling* (penyumbatan).

Multivariate Analysis (MVA) adalah suatu metode analisa statistik yang mempunyai banyak data variabel [7], *Pairwise Distance Analysis* (PDA) adalah bagian dari MVA yang berfungsi untuk mengetahui tingkat kemiripan data setiap sampel [8], *Principal Component Analysis* (PCA) diperkenalkan untuk menyederhanakan data dengan pertimbangan data variabel yang lebih dari 3 [9]. Hasil analisa PDA pada data *biometric* digunakan untuk mengetahui silsilah spesies [8], sementara PCA pada data *biometric* digunakan untuk mengetahui variabel penentu pengelompokan sampel dan mengetahui sampel yang telah dikelompokkan [9]. Dalam bidang kebumihan analisa MVA dilakukan pada komposisi mineral pada beberapa sampel batuan untuk mengetahui tipe magma batuan tersebut [10]. Hal yang sama pada sampel geokimia panas bumi dapat digunakan untuk mengetahui kemiripan sampel hingga menentukan sumbernya dengan menggunakan PDA, mengetahui unsur penentu pengelompokan sampel dan hasil pengelompokannya dengan menggunakan PCA.

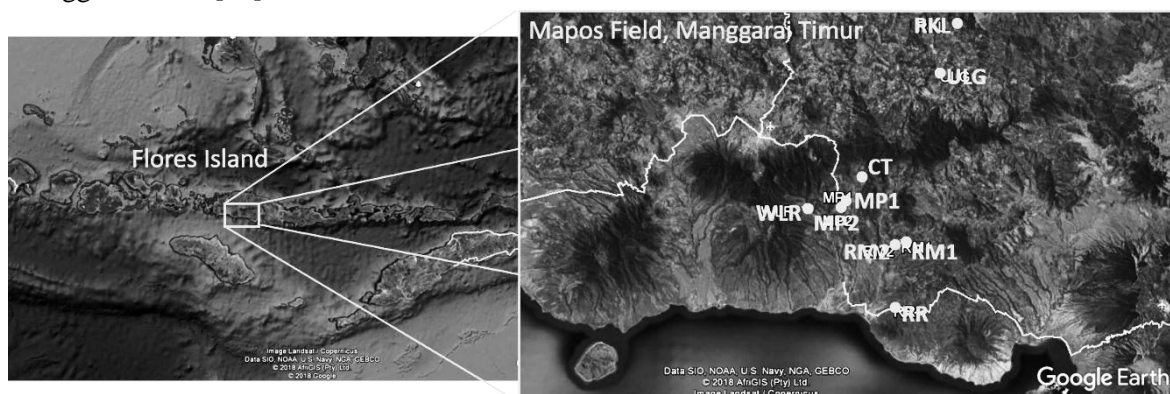
Lokasi penelitian berada di lapangan Mapos, Kabupaten Manggarai Timur, merupakan salah satu potensi panas bumi di pulau Flores adalah daerah Mapos. Lapangan panas bumi Mapos dinyatakan mempunyai potensi cadangan terduga 50 MWe [11]. Terdapat 8 mata air yang dijadikan sampel analisa panas bumi yang masing-masing mempunyai perbedaan karakteristik (Gambar 1). Hal tersebut menjadi menarik untuk dianalisis tipe sumber fluida pada setiap mata air panas tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan hasil analisa $Cl - SO_4 - HCO_3$ dengan hasil MVA. Penelitian ini berfungsi untuk mengetahui hasil kemiripan setiap sampel hingga menentukan sumber sampel menggunakan PDA dan mengetahui unsur penentu pengelompokan sampel hingga hasil pengelompokannya menggunakan PCA.

TINJAUAN PUSTAKA

Kemunculan pulau Flores merupakan produk dari hasil subduksi lempeng Micro Sunda dengan Indo-Australia [12]. Pergerakan lempeng tektonik menyebabkan sesar regional yang membentang dari Sulawesi Selatan hingga wilayah Nusa Tenggara pada umur Oligosen [13]. Arah utama tekanan berasal dari utara dan selatan [14], mengakibatkan rekahan terbuka berarah dari utara dan selatan [15], rekahan terbuka menjadi celah magma untuk mengalir menuju permukaan sebagai produk magmatik berupa tubuh intrusi dan gunungapi [16]. Produk magmatik termuda berada pada umur quarter [17]. Pulau flores termasuk pada busur vulkanik Sunda bagian timur yang membentuk pegunungan api sejak terjadinya subduksi [18]. Jajaran busur gunungapi menerus hingga busur

gunungapi yang ada di pulau jawa sebagai produk gunungapi kuarter [19]. Hidrologi bawah permukaan yang terpengaruh oleh aktivitas magmatik, sehingga air bawah permukaan terpanaskan oleh magma yang menjadi suatu sistem panas bumi [2].

Pulau Flores dinyatakan sebagai pulau penghasil energi panas bumi karena potensi panas bumi tersebar di setiap wilayah dan mempunyai potensi energi sebesar 902 MWe [20]. Daerah penelitian berada pada kompleks gunungapi Ranakah di kota Ruteng – NTT, anggota kompleks gunungapi tersebut adalah gunung Likong dan gunung Watuweri. Komplek gunungapi Ranakah berumur Pleistosen [17]. Daerah penelitian diperkirakan mempunyai panas reservoir pada suhu 200 °C dan diperkirakan mempunyai potensi energi 25 MWe [21]. Survei geofisika menunjukkan posisi reservoir berada pada kedalaman 1500 m dengan cadangan terduga 50 MWe [11]. Hingga saat ini pengembangan energi panas bumi di pulau tersebut sedang diprioritaskan di lapangan Wae Sano – Manggarai Barat [22].



Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian (background peta dari Google Earth) [23].

METODE

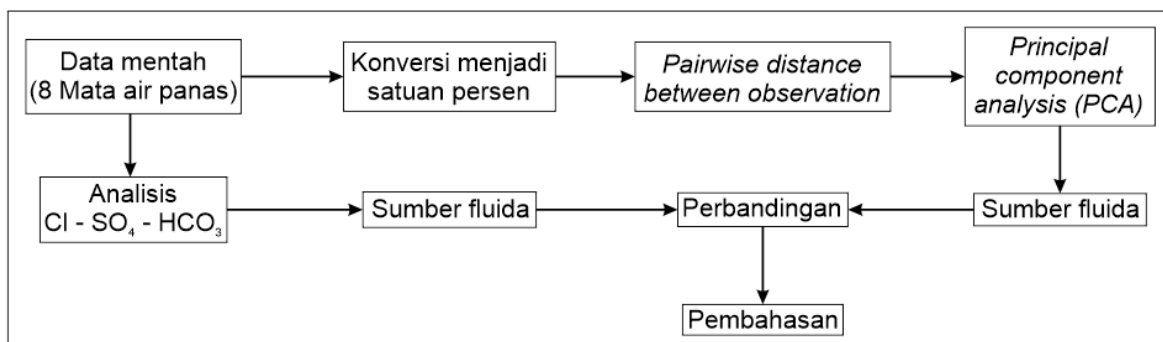
Pada eksplorasi panas bumi, untuk mengetahui tipe mata air panas dilakukan analisa diagram *Trinary Cl –SO₄ – HCO₃* [3]. Sampel dengan dominasi Cl bersumber dari reservoir sistem panas bumi, karena Cl mewakili karakteristik kimiawi yang ada di dalam reservoir. Sampel dengan dominasi SO₄ bersumber dari zona *upflow*, karena zona *upflow* mempunyai karakter kelimpahan sulfur. Sampel dengan dominasi HCO₃ bersumber dari *outflow*, karena proses perubahan air menjadi bikarbonat dipengaruhi oleh pencampuran air meteorik [4].

Dalam penelitian ini data geokimia mata air panas didapatkan dari peneliti sebelumnya (Tabel 1). Data mentah dikonversi menjadi satuan persen, kemudian dilakukan analisa *pairwise distance between observation* untuk mengetahui kemiripan data, sehingga dapat dilakukan pengelompokan sampel. Secara keseluruhan penelitian diringkas dalam diagram alur penelitian (Gambar 2). *Pairwise distance between observation* adalah sebuah metode statistik yang digunakan untuk mengetahui kemiripan karakteristik setiap sampel yang mempunyai parameter lebih dari 3. Prinsipnya setiap sampel mempunyai kecenderungan data dominan pada suatu parameter, pengelompokan kecenderungan parameter tersebut dijadikan dasar kemiripan suatu data terhadap data lainnya [8]. *Principal Component Analysis (PCA)* adalah metode statistik yang digunakan untuk melakukan transformasi dua parameter data terhadap parameter lainnya. Sederhananya kemampuan manusia adalah membuat model 3 dimensi, tetapi pada kenyataannya parameter model itu lebih dari 3, sehingga dengan menggunakan PCA pemodelan multivariasi dapat dilakukan. Penelitian ini menggunakan 9 sampel dengan 16 parameter, sehingga metode PCA dapat diterapkan [9].

Sumber fluida dari hasil analisa *Multivariate Analysis* adalah berdasarkan hasil *principal component* dengan nilai *percent explained* yang tinggi, sehingga dapat mewakili seluruh data. Dua data *percent explained* tertinggi digabungkan menjadi diagram kartesius, kuadran yang membagi persebaran sampel dijadikan parameter sumber sampel [24]. Kuadran parameter sumber sampel dijadikan perbandingan dengan diagram trinary Cl-SO₄-HCO₃.

Tabel 1. Data geokimia sampel mata air panas di lapangan Mapos [21]

	MP1	MP2	RM1	RM2	RR	CT	WLR	ULG	RKL
SiO ²	27.55	26.75	29.99	31.21	136.66	61.52	135.22	58.04	39.43
B	1.27	1.49	103.97	92.07	10.79	0.57	0.66	0.21	0.85
Al ³⁺	0.03	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.01	0.03
Fe ³⁺	0.13	0.12	0	7.59	2.16	1.08	0	0.01	0.02
Ca ²⁺	152.5	161	547.1	486.1	360.9	322.1	71.8	98.9	65.98
Mg ²⁺	31.85	32.94	118.83	115.46	96.69	11.68	34.46	23.7	20.3
Na ⁺	127.6	128.7	2311.2	1995.3	466.2	117.8	66.9	43.74	38.56
K ⁺	11.15	10.58	308.41	264.64	11.52	5.97	9.32	3.5	2.14
Li ⁺	0.1	0.1	8.38	7.76	0.13	0.13	0.02	0.03	0.03
As ³⁺	0.05	0.05	0.76	1.37	0	0.01	0.01	0.04	0.05
NH ₄ ⁺	1.16	1.14	5.58	6.86	1.65	2.17	0.98	0.09	0.18
F ⁻	0.19	0.12	1	0.1	0.44	0.14	0	0.08	0.24
Cl ⁻	18.26	20.47	4562.4	4169.3	1050.44	8.76	2.4	11.12	11.92
SO ₄ ²⁻	470.5	492.75	282.7	272.7	306.53	942.44	32.8	257.64	129.82
HCO ₃ ⁻	299.7	297.98	683.17	924.2	544.72	189.56	503.11	176.9	210.57
CO ₃ ²⁻	0	0	0	0	0	0	0	0	0

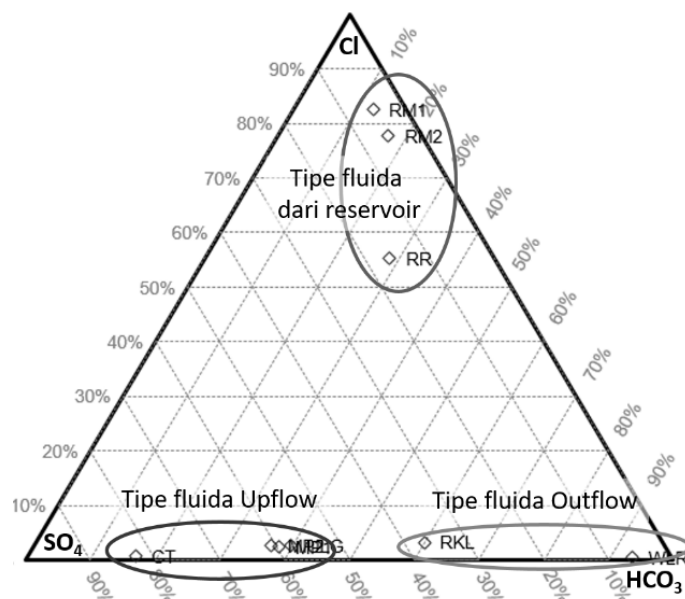


Gambar 2. Alur penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Geokimia

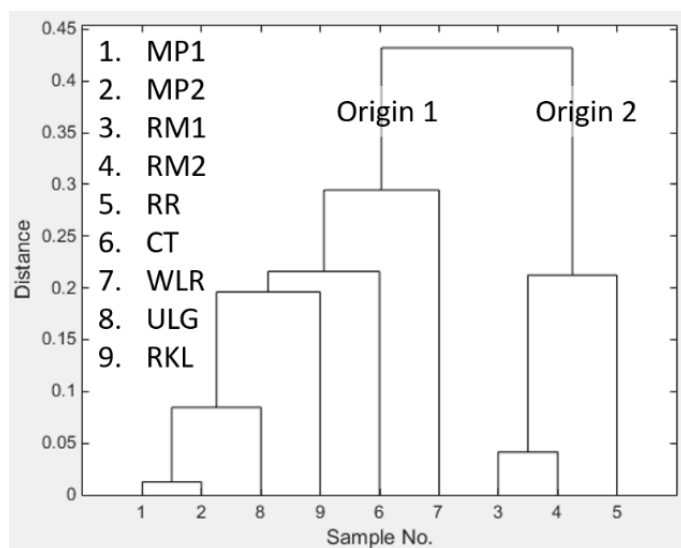
Di lapangan Mapos terdapat 9 mata air panas, dengan parameter pengukuran 16 unsur kimiawi (Tabel 1). Setiap parameter unsur kimiawi digunakan dalam analisa geokimia lainnya, seperti penentuan karakter batuan reservoir, penentuan geothermometer, dan lainnya. Dalam analisa diagram ternary Cl – SO₄ – HCO₃ (Gambar 3) sampel RM1, RM2, dan RR merupakan tipe fluida yang bersumber dari reservoir, sampel dari mata air panas tersebut menunjukkan dominasi air yang bersumber dari reservoir. Tipe air panas *Chloride* sebagai air panas yang belum mengalami pencampuran dengan fluida lainnya saat sedang mengalir menuju permukaan [4] dan [3]. Sampel WLR dan RKL merupakan tipe fluida *outflow*, sampel dari mata air panas tersebut menunjukkan adanya pencampuran dengan air meteorik yang terinfiltrasi menjadi air tanah. Tipe air *Bicarbonate* sebagai air panas yang telah mengalami pencampuran dengan air tanah [6] dan [3]. Sampel MP1, MP2, CT, dan ULG merupakan tipe fluida *upflow*, sampel dari mata air panas tersebut menunjukkan adanya pencampuran gas-gas asam gunungapi saat fluida dari reservoir mengalir menuju permukaan [4] dan [3].



Gambar 3. Diagram ternary Cl-SO₄-HCO₃ [3], dari sampel mata air panas Mapos [21].

Pairwise Distance Between Observation

Analisa *pairwise distance between observation* (Gambar 4) menunjukkan kemiripan dari setiap parameter sampel. Sampel MP1, MP2, ULG, RKL, CT, dan WLR berasal dari origin 1. Kemiripan terdekat pada origin 1 ditunjukkan oleh sampel MP1 dan MP2, diikuti oleh kemiripan sampel ULG, kemudian diikuti oleh sampel RKL, lalu sampel CT, dan sampel WLR. Sampel RM1, RM2, dan RR berasal dari origin 2. Kemiripan terdekat pada origin 2 adalah sampel RM1 dan RM2, kemudian diikuti oleh sampel RR. Pada origin 1 kemiripan umumnya terwakili oleh sampel WLR, sedangkan pada origin 2 kemiripan umumnya terwakili oleh sampel RR. Lokasi sampel tersebut jika dilihat pada peta (gambar 1), anggota sampel origin 1 berada pada tubuh gunungapi Likong, sementara anggota sampel origin 2 berada pada tubuh gunungapi Watuweri. Kedua gunungapi tersebut sama sama berumur pleistosen [17], namun kedua tubuh gunungapi tersebut berasal dari sumber magma yang berbeda [21].

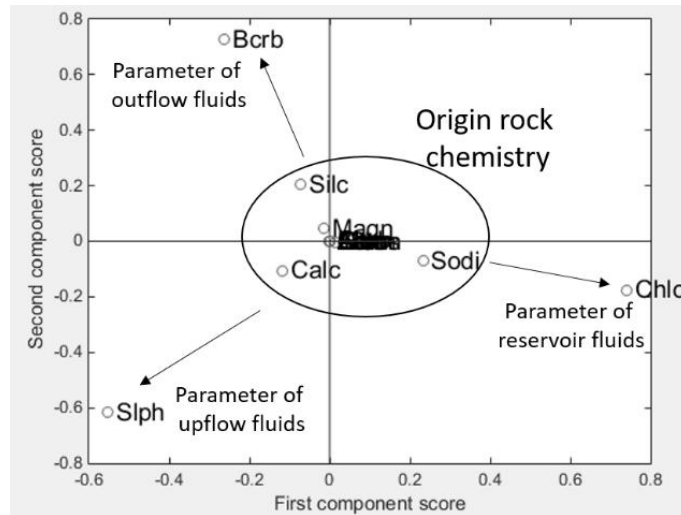


Gambar 4. Hasil analisa pairwise distance between observation sampel mata air panas

Principal Component Analysis (PCA)

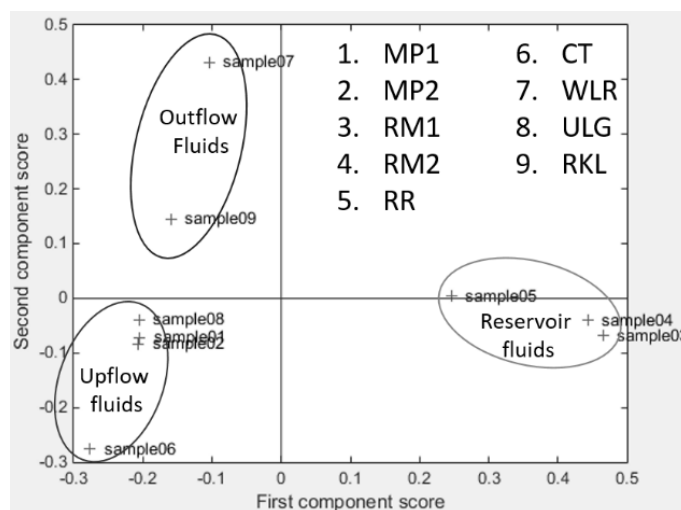
Hasil transformasi PCA menunjukkan *percent explained* dari 16 parameter unsur kimia. Dari proyeksi setiap parameter didapatkan 7 kali proyeksi untuk mendapatkan *percent explained*

seutuhnya. Kedua proyeksi pertama menunjukkan *percent explained* tertinggi, yaitu pertama 69.5% dan kedua 29.5%, sehingga total keduanya 99% *explained*. Gambar 5 menunjukkan pengelompokan parameter berdasarkan keunikan masing-masing parameter, sehingga jika parameter semakin unik, maka akan semakin jauh dari parameter lainnya, sebaliknya untuk parameter tidak unik mempunyai kedekatan dengan parameter lainnya. Diagram kartesius data proyeksi pertama dan kedua dengan atribut data kimia menunjukkan proyeksi posisi masing – masing sampel (Gambar 5). 13 parameter kimia cenderung berada di pusat diagram, sementara kimia *Chloride*, *Bicarbonate*, dan *Sulphate* berada di posisi masing-masing yang berbeda kuadran. Ketiga parameter kimia tersebut dijadikan parameter pengelompokan setiap sampel. Dalam diagram trinary pengelompokan tipe air panas didasarkan pada $Cl-SO_4-HCO_3$, sementara data unsur dan senyawa lainnya dijadikan parameter indikator geokimia kondisi reservoir [3].



Gambar 5. Hasil proyeksi *principal component* pertama dan kedua dengan atribut data kimia

Gambar 6 menunjukkan pengelompokan sampel berdasarkan kemiripan parameter pada sampel, semakin dekat posisi sampel menunjukkan semakin mirip sampel tersebut, sebaliknya untuk sampel yang berjauhan bermakna semakin tidak mirip sampel tersebut, sehingga dapat dikelompokkan sampel – sampel dalam beberapa kelompok. Diagram kartesius data proyeksi pertama dan proyeksi kedua dengan atribut kode sampel menunjukkan proyeksi masing-masing posisi sampel (Gambar 6). Sampel RM1, RM2, dan RR termasuk sebagai sampel yang berada pada parameter fluida dari reservoir. Sampel WLR dan RKL termasuk sebagai sampel yang berada pada parameter fluida *outflow*. Sampel MP1, MP2, CT, dan ULG termasuk sebagai sampel yang berada pada parameter fluida *upflow*.



Gambar 6. Hasil proyeksi *principal component* pertama dan kedua dengan atribut kode sampel

Perbandingan Hasil Geokimia dengan PCA

Antara hasil geokimia dengan PCA menunjukkan kesamaan hasil klasifikasi sampel. PCA Secara rinci dapat menguraikan kemiripan sampel dengan 99% keterwakilan data, menguraikan parameter terunik sebagai dasar klasifikasi, dan memposisikan kemiripan sampel untuk diklasifikasikan.

Diagram trinary Cl – SO₄ – HCO₃ merupakan diagram yang didasarkan pada 3 parameter kimia dalam satuan ppm, sementara parameter kimia lainnya dianalisa dalam analisis rasio kimia dan diagram trinary lainnya untuk mengetahui identifikasi geokimia yang lainnya [3]. Diagram trinary Cl – SO₄ – HCO₃ dibuat berdasarkan karakter kimia dominan pada setiap sumber fluida, sehingga jika suatu sampel mempunyai kecenderungan dominan pada salah satunya, maka sampel tersebut bersumber dari kondisi geokimia tertentu [4].

PCA merupakan analisa statistik multivariansi yang menggunakan banyak parameter dalam satuan yang sama, dalam konteks pembahasan ini menggunakan satuan persen [9]. Gambar 5 menunjukkan fungsi PCA sebagai pencari keunikan parameter pada setiap sampel, sedangkan Gambar 6 menunjukkan fungsi PCA untuk menunjukkan posisi kemiripan sampel berdasarkan setiap parameter, sehingga Gambar 5 digunakan untuk menentukan dasar klasifikasi sampel, sementara Gambar 6 digunakan untuk menentukan bahwa sampel tersebut termasuk ke dalam klasifikasi pada Gambar 5.

Perbedaan metode geokimia dengan PCA terletak pada dasar klasifikasinya, geokimia diklasifikasikan berdasarkan sumber fluida secara geologi dan kimiawi, sementara PCA berdasarkan keunikan parameter. Melihat dari hasil analisa multivariansi menunjukkan kelebihan PCA dapat mengklasifikasi sampel apapun dalam bentuk parameter yang banyak. Apabila sampel bertambah lagi, maka hasil dari PCA tidak sama dengan hasil PCA sebelumnya, yang artinya konsistensi model klasifikasi akan terus diperbarui.

KESIMPULAN

Hasil analisa MVA menunjukkan kesamaan dengan hasil analisa geokimia Cl-SO₄-HCO₃. Secara detail hasil analisa MVA bisa digunakan untuk mencari kemiripan setiap sampel hingga menentukan origin atau silsilah setiap sampel menggunakan PDA, juga bias digunakan untuk mengetahui unsur dan senyawa dominan sebagai penentu pengelompokan sampel hingga hasil pengelompokannya. Delapan sampel yang dianalisa menggunakan MVA menunjukkan model untuk sejumlah sampel tersebut, jika jumlah sampel bertambah, maka akan terjadi perubahan model, sehingga perlu dilakukan pembaruan model setiap penambahan sampel.

UCAPAN TERIMA KASIH

Apresiasi terima kasih saya sampaikan juga kepada seluruh kolega yang telah mendukung penelitian ini. Terkhusus untuk seluruh anggota akademik kuliah ES_51400-*Computer methods and data analysis in Earth Sciences* pada tahun 2018 di *National Dong Hwa University*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ____ "Tahapan Pengembangan Panas Bumi", Asosiasi Panas Bumi Indonesia (API) Aug, 2017, [online] Available: <https://www.panasbuminews.com/wp-content/uploads/2017/08/Tahapan-Pengembangan-Panas-Bumi.jpg> [Accessed Dec 23, 2019].
- [2] Pirajno F., "Hydrothermal Processes and Mineral Systems," Springer, Netherlands, 2009.
- [3] Nicholson K., "Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques," Springer, Berlin, Germany, 1993.
- [4] Ellis A. J. and Mahon W. A., 1977, "Chemistry and Geothermal System", Academic Press, New York, 1977.
- [5] Fournier R. O., "Chemical Geothermometers and Mixing Model for Geothermal Systems", *Geothermics* ed 5 pp. 41-50, 1977.
- [6] Giggenbach W. F., "Chemical Techniques in Geothermal Exploration", Chemistry Division, DSIR, Private Bag, New Zealand, 1988.
- [7] Izenman and Alan J., "Modern Multivariate Statistical Techniques: Regression, Classification, and Manifold Learning", Springer Texts in Statistics, New York: Springer-Verlag, 2008.
- [8] Weyenberg G. and Yoshida R., "Chapter 12- Reconstructing the phylogeny: Computational Methods", *Algebraic and Discrete Mathematical methods for modern Biology*: 293-319, 2015.

- [9] Abdi H. and Williams L. J., "*Principal Component Analysis*", Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics. ed. 2 (4): pp. 433–459, 2010.
- [10] Yen J. Y. ES__51400. Class Lecture, Topic: "6th week, course - Computer methods and data analysis in Earth Sciences", College of Environmental Studies, National Dong Hwa University, 2018.
- [11] Kholid M. dan Munandar A., "Survei Magnetotelluric (MT) dan Time Domain Elektro Magnetik (TDEM) daerah panas bumi Mapos Kabupaten Manggarai Timur, Provinsi Nusa Tenggara Timur", Prosiding Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung, 2015.
- [12] Bird P., "An updated digital model of plate boundaries", *Journal of The Earth Sciences* 4(3), 2003.
- [13] Atmadja R. S., Suparka S., Abdullah C., and Noeradi D., "Magmatism in western Indonesia, the trapping of the Sumba Block and the gateways to the east of Sundaland," *Journal of Asian Earth Sciences*, ed. 16(1), pp. 1-12, 1998
- [14] Pulunggono A. dan Martodjojo S., "Perubahan Tektonik Paleogen-Neogen Merupakan Peristiwa Tektonik Terpenting di Jawa", *Proceeding Geologi dan Geoteknik Pulau Jawa*, 1994.
- [15] Buck W. R., Martinez F., Steckler M. S., and Cochran J. R., "Thermal consequences of lithospheric extension: pure and simple", *Tectonics*, ed. 7(2): pp. 213-234, 1988.
- [16] Bronto S., "Geologi gunungapi purba", Badan Geologi, Bandung, 2013.
- [17] Koesoemadianata S., Noya Y., dan Kadarisman D., "Peta Geologi Lembar Ruteng, Nusatenggara, skala 1:250.000", Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung, 1994.
- [18] Darman H. and Sidi F. H., "An outline of geology of Indonesia," Indonesian Association of Geologists, Jakarta, 2000.
- [19] Van Bemmelen R. S., "The Geology of Indonesia," 1st Edition Govt Printing Office, The Hague, Vol 1A, 1949.
- [20] _____, "Penetapan pulau Flores sebagai pulau panas bumi", *Energi Baru Tebarukan (EBTKE)*, Apr 4, 2017, [online] Available: <http://ebtke.esdm.go.id/post/2017/07/04/1697/penetapan.pulau.flores.sebagai.pulau.panas.bumi>. [Accessed July 4, 2017].
- [21] Permana L. A. dan Setiawan D. I., "Penyelidikan terpadu geologi dan geokimia daerah panas bumi Mapos, Kabupaten Manggarai Timur, Provinsi Nusa Tenggara Timur", *Prosiding Pusat Sumber Daya Geologi*, Bandung, 2014.
- [22] Richter A., "115 MW of geothermal capacity under development on Flores Island, Indonesia", *Think Geoenergy*, Dec 2, 2019, [online] Available: <http://www.thinkgeoenergy.com/115-mw-of-geothermal-capacity-under-development-on-flores-island-indonesia/>. [Accessed Dec 23, 2019].
- [23] _____, "Google Earth 7.3.2.5776. 2019. Flores Island 8°40'42.81"S, 121°37'54.66"E", *Google Earth*, Aug 1, 2019, [online] Available: <https://www.google.com/maps/@-8.6785602,121.6318617,335590m/data=!3m1!1e3> [Accessed Aug 1, 2019].
- [24] Tahmasebi P. and Sahimi M., "Geostatistical Simulation and Reconstruction of Porous Media by a Cross-Correlation Function and Integration of Hard and Soft data", *Journal Transport in Porous Media*, ed. 107(3): pp. 871-905, 2015.