

**KARAKTERISASI MINERALISASI TEMBAGA-EMAS BERDASARKAN GEOKIMIA
MULTIUNSUR DENGAN METODE K-MEANS DAN ANALISIS KOMPONEN UTAMA,
TOGURACI, INDONESIA**

**CHARACTERIZATION OF COPPER-GOLD MINERALIZATION BASED ON
MULTIELEMENT GEOCHEMISTRY WITH K-MEANS AND PRINCIPAL COMPONENT
ANALYSIS METHODS, TOGURACI, INDONESIA**

Dharma Irwanda^{1,2}, Mega F. Rosana¹, Johannes Hutabarat¹

¹Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, Jatinangor, Sumedang, 45363

²PT. Nusa Halmahera Minerals, Gosowong, Halmahera Utama, Maluku Utara

dharmai.geo@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.47599/bsdg.v19i2.466>

ABSTRAK

Pengolahan data geokimia multiunsur dengan metode *K-means* dan analisis komponen utama dilakukan pada area Toguraci, bagian dari area kontrak karya tambang emas Gosowong di Kabupaten Halmahera Utara, Provinsi Maluku Utara. Penelitian sebelumnya telah menyebutkan adanya *overprinting* mineralisasi Au-Ag epitermal sulfida rendah dan porfiri Cu-Au. Penelitian ini difokuskan pada 2 lubang pengeboran inti (*core*) yang dipilih dengan total 540 sampel dan dianalisis kadar Au serta 46 unsur geokimia lainnya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik mineralisasi tembaga-emas, serta batuan induk pembawanya dengan analisis geokimia multiunsur, agar dapat digunakan sebagai acuan untuk kegiatan eksplorasi. Pengolahan data geokimia multiunsur dengan metode *K-means* dalam penelitian ini menghasilkan 3 kluster litogeokimia berdasarkan komposisi unsur *immobile* nya yaitu basal dan diorit yang merupakan batuan induk, serta urat kuarsa (*vein*). Analisis komponen utama menunjukkan hasil yang konsisten untuk 3 kluster tersebut, dimana kombinasi PC1 dan PC2 yang secara kumulatif mewakili 46,32% ragam pada kelompok data, pada skor tinggi dan rendahnya menggambarkan asosiasi unsur-unsur *immobile* yang memisahkan dengan jelas antara basal, diorit dan urat kuarsa. Penyederhanaan data dengan 7 komponen utama (P1-PC7) yang mewakili 73,62% ragam data, menghasilkan 6 domain geologi yang memiliki karakteristik geokimia masing-masing yaitu domain Urat kuarsa, Basal-1, Basal-2, Diorit-1, Diorit-2, dan Diorit-3. Mineralisasi tembaga terdapat pada Basal-1 dan Diorit-1 dengan tipe porfiri yang memiliki karakteristik asosiasi unsur Mo-Cu-Re-Ge-Au. Sedangkan mineralisasi emas terdapat pada domain Urat kuarsa dengan tipe epitermal sulfida rendah yang memiliki karakteristik asosiasi unsur Ag-Sb-Te-Au-Tl-Bi-As-Pb-Se-In.

Kata kunci: Geokimia multiunsur, *K-means*, Analisis Komponen Utama, Epitermal sulfida rendah, Porfiri

ABSTRACT

Multielement geochemical data processing with K-means and principal component analysis was carried out in the Toguraci, part of the Gosowong gold mine contract of work in North Halmahera Regency, North Maluku Province. Previous research has suggested that there is overprinting low sulphidation epithermal Au-Ag mineralization and Cu-Au porphyry. This research focused on 2 selected drill holes with a total of 540 samples that were analyzed for Au and 46 other geochemical elements. The purpose of this research is to determine the characteristics of the copper-gold mineralization, and its host rock with multielement geochemical analysis, in order to provide a guide for exploration activities. Multielement geochemical data processing with K-means produced 3 lithochemical clusters based on

their immobile element composition, namely basalt and diorite which are the host rocks, and quartz vein. Principal component analysis shows consistent results for the 3 clusters, where the combination of PC1 and PC2 which cumulatively represented 46,32% of the variance, indicates high and low loading scores describing the association of immobile elements that separates basalt, diorite and quartz vein. Data simplification with 7 principal components (P1-PC7) representing 73,62% of the variance has produced 6 geological domains which have their respective geochemical characteristics, namely Quartz vein, Basalt-1, Basalt-2, Diorite-1, Diorite-2, and Diorite-3. Copper mineralization is found in Basalt-1 and Diorite-1 related to porphyry type that has characteristics of Mo-Cu-Re-Ge-Au elemental association. While gold mineralization is found in the Quartz vein domain related to low sulphidation epithermal type which is characterized by Ag-Sb-Te-Au-Tl-Bi-As-Pb-Se-In elemental association.

Keywords: *Geochemistry, K-means, Principal Component Analysis, Low sulphidation epithermal, porphyry*

PENDAHULUAN

Toguraci merupakan salah satu deposit mineralisasi emas yang ada di wilayah tambang emas Gosowong (atau disebut juga Gosowong *goldfield*), secara administratif termasuk ke dalam Kabupaten Halmahera utara, Provinsi Maluku Utara, Indonesia. Dikelola oleh PT. Nusa Halmahera Minerals (PT. NHM) sebagai pemegang izin kontrak karya. Ditemukan pada tahun 2000, ditambang dengan metode tambang terbuka dan kemenerusan mineralisasinya ke bagian utara ditemukan pada tahun 2009, ditambang dengan metode penambangan bawah tanah mulai tahun 2011, dan masih berlangsung sampai saat ini. Gosowong *goldfield* dikenal sebagai kompleks mineralisasi epitermal sulfida rendah (Carlile *et al*, 1998), terdapat 3 area deposit yang ekonomis dan telah ditambang sejak tahun 1999, yaitu deposit Gosowong, Toguraci, dan Kencana. Mineralisasi epitermal sulfida rendah dicirikan dengan urat-urat kuarsa yang membawa logam berharga termasuk emas-perak.

Penamaan tipe mineralisasi epitermal sulfida rendah ini adalah penyederhanaan terhadap tipe-tipe mineralisasi yang berkembang di Gosowong *goldfield*, epitermal sulfida rendah dipilih karena merupakan tipe mineralisasi yang telah terbukti ekonomis dan telah ditambang sejak tahun 1999.

Selain tiga deposit yang sudah banyak dikenal dan telah ditambang, terdapat juga area mineralisasi lainnya di Gosowong *goldfield* dan tidak hanya terbatas pada epitermal sulfida rendah saja, akan tetapi juga terdapat indikasi mineralisasi tipe porfiri. Mineralisasi tipe porfiri terdapat di prospek Bora, Tobobo, Ngoali, dan Matat. Sedangkan mineralisasi tipe epitermal sulfida rendah terdapat di deposit Gosowong, Toguraci, dan Kencana seperti yang telah dijelaskan diatas, ditambah beberapa area prospek lainnya seperti Ruwait, Gosowong North, Dongak, Langsung dan beberapa area lainnya (Olberg *et al*, 1999).

Peneliti terdahulu menjelaskan tentang adanya dua tipe mineralisasi di area Toguraci, yaitu porfiri Cu-Au yang lemah, yang di *overprint* oleh mineralisasi epitermal sulfida rendah Au-Ag (Olberg *et al*, 1999; Richards and Basuki Dwi Priyono, 2004; Sulistyawan, 2009; Andrina, 2013). Hal ini membuat Toguraci menunjukkan alterasi dan mineralisasi yang berbeda dengan deposit lainnya yang telah ditambang yaitu Gosowong dan Kencana, dan menjadi menarik untuk diteliti lebih lanjut.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik mineralisasi tembaga-emas, serta batuan induk pembawanya melalui analisis geokimia multiunsur menggunakan metode statistik

multivariat *K-means* dan analisis komponen utama (*Principal Component Analysis* atau PCA). Hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan untuk kegiatan eksplorasi.

METODOLOGI

Penelitian dilakukan pada 2 lubang pemboran inti (*core*) yang ada di sekitar tambang bawah tanah aktif Toguraci. Deskripsi (*core logging*) dilakukan untuk mendapatkan gambaran secara kualitatif tentang jenis batuan, alterasi, dan mineralisasi yang ada, sebagai acuan untuk penentuan batas interval *core* yang akan disampel dan dikirim ke laboratorium untuk analisis kadar (*assay*).

Analisis laboratorium

Sebanyak 540 sampel *core* dipreparasi dan dianalisis kadar Au dan 46 unsur lainnya di laboratorium (Intertek) di PT. NHM dengan rincian metode sebagai berikut:

- Au dengan metode *Fire Assay* dan *atomic absorption spectrophotometry* (AAS).
- Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, S, Sc, Ti, V, Zn dengan metode 4 *acid digest* dan *Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES).
- Ag, As, Ba, Be, Bi, Cd, Co, Cs, Ga, Ge, Hf, In, Li, Mo, Nb, Pb, Rb, Re, Sb, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Tl, U, W, Y, Zr, dengan metode 4 *acid digest* dan *Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry* (ICP-MS).

Analisis kluster *K-means*

Preparasi data dilakukan untuk memastikan data yang berada di bawah batas deteksi (*detection limit*), pencilan (*outlier*), dan kemungkinan adanya data yang hilang telah disesuaikan dan distribusi data normal. Pengelolaan ini perlu dilakukan agar menghindari bias saat analisis *K-means* maupun analisis komponen utama.

K-means adalah salah satu metode yang paling umum digunakan dalam analisis kluster yang bertujuan untuk

mengelompokkan data berdasarkan kesamaan karakteristik. Menurut Isfan, dkk (2021), pada prosesnya metode ini membagi data berdasarkan jarak *euclidean* terdekat. Dengan kata lain, data yang berdekatan akan dikelompokkan dalam grup yang sama, sedangkan data yang terpisah jauh akan dikelompokkan tersendiri. Tiap-tiap kluster yang terbentuk menggambarkan kelompok data dengan posisi *centroid* atau titik pusat tersendiri.

Dalam penelitian ini langkah-langkah analisis *K-means* diproses menggunakan *software* ioGAS™. Dimulai dari transformasi data ke skala 0 sampai 1, penentuan jumlah kluster optimum dengan metode *sum of squares*, perhitungan nilai rata-rata kelompok data dan jarak ke *centroid* dengan rumus *euclidean distance* yang dilakukan berulang hingga nilai *centroid* tidak berubah lagi sampai pada akhirnya menghasilkan kluster data dengan karakteristik tertentu.

Analisis komponen utama

Metode statistik multivariat berikutnya yang digunakan adalah analisis komponen utama atau PCA (*Principal Component Analysis*) yang merupakan salah satu teknik yang digunakan untuk menyederhanakan suatu kumpulan data multivariabel dengan cara mereduksi dimensi dan teknik dekorelasi yang mengubah distribusi multivariat yang berkorelasi menjadi kombinasi linear ortogonal dari variabel asalnya (Hotelling, 1933; Pearson, 1901). Variabel asli yang berjumlah banyak dapat ditransformasikan kedalam beberapa variabel baru yang tidak berkorelasi dan lebih sederhana yang disebut *principal component coordinates*, dan menghasilkan diagram variasi yang tetap berisi informasi tentang semua variabel yang ada, bukan hanya mewakili 2 atau 3 variabel saja (Rollinson, 1993). Saat analisis, hanya komponen utama dengan nilai *eigenvalues* >1 yang digunakan karena mewakili sebagian besar ragam (*variance*) dalam kelompok data (Dempster *et al*, 2013).

Pengolahan data geokimia dengan PCA ini bertujuan untuk mengidentifikasi

pengelompokan dan korelasi data multiunsur secara lebih sederhana namun lengkap yang menggambarkan kondisi geologi yang ada di area Toguraci, terutama asosiasi unsur-unsur yang memiliki afinitas untuk bersenyawa membentuk mineral sulfida atau *chalcophile* (Goldschmidt, 1954), yang dapat digunakan sebagai pendekatan untuk menentukan tipe mineralisasi bijih tertentu.

Langkah pengerjaan mulai dari preparasi data, transformasi data dengan *centred log ratio* (CLR), *correlation matrix*, *eigen-vectors*, *eigenvalues*, hingga perhitungan nilai komponen utama dan diagram-diagram visualisasi yang digunakan untuk mendapatkan kesimpulan dilakukan dengan bantuan *software* ioGAS™.

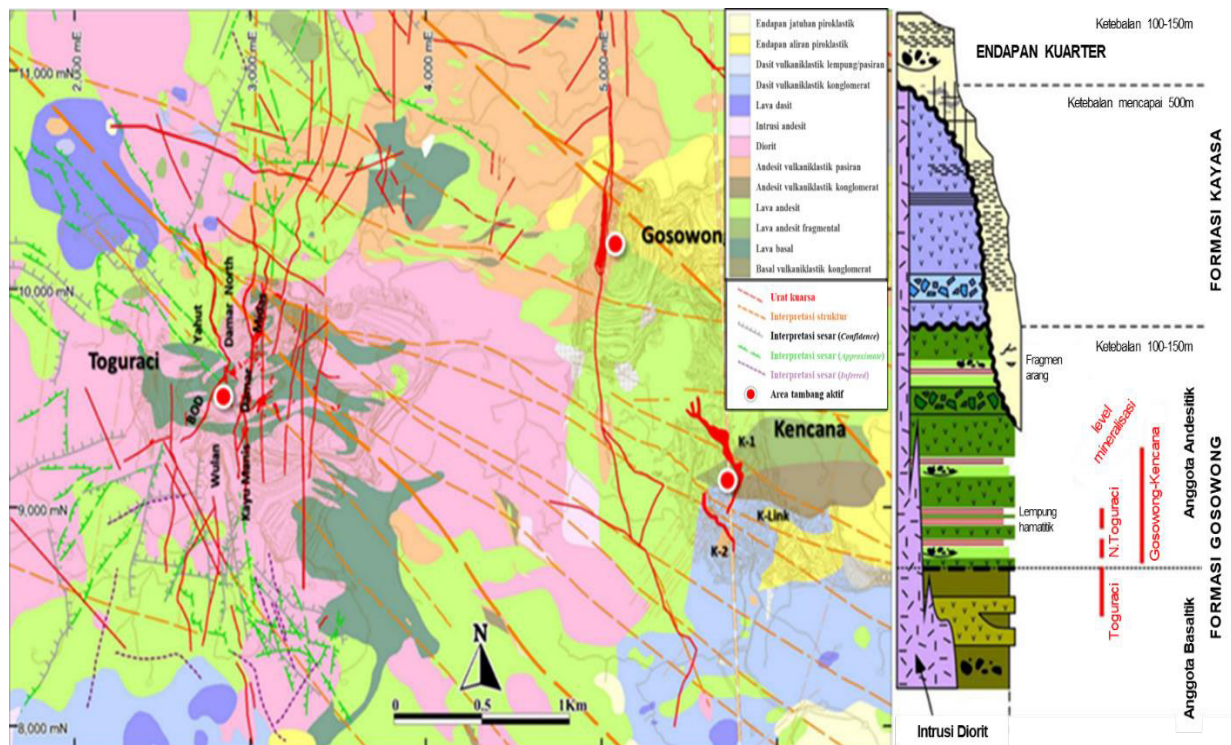
GEOLOGI

Area Toguraci disusun oleh Formasi Gosowong, dengan batuan induk basaltik dan intrusi diorit. Mineralisasi yang berkembang berupa urat-urat kuarsa yang dikontrol oleh struktur berarah utara-

selatan (*strike*) dengan kemiringan (*dip*) yang umumnya hampir tegak, kecuali Yahut dan Yahut *Hanging Wall* yang memiliki kemiringan -45° ke arah Timur.

Batuan andesitik ditemukan di bagian Utara dan Selatan Toguraci yang secara stratigrafi berada pada bagian atas atau lebih muda dari anggota basaltik, dan pada sebagian area di Utara dan Selatannya tertutup oleh batuan dasitik dari Formasi Kayasa yang lebih muda (Gambar 1). Sampai saat ini ada beberapa urat kuarsa (*vein*) yang ekonomis dan masih aktif di tambang diantaranya; Damar, Yahut, Yahut *Hanging Wall*, Midas, Wulan, Kayumanis, dan T-Fault *Foot Wall*.

Terdapat dua tipe mineralisasi berbeda yang terbentuk di Toguraci, yaitu mineralisasi lemah porfiri Cu-Au dan alterasinya yang tumpang tindih (*overprinted*) dengan epitermal Au-Ag (Olberg *et al*, 1999; Richards dan Basuki Dwi Priyono, 2004; Sulistyawan, 2009; Andrina, 2013).



Gambar 1. Peta geologi, mineralisasi dan stratigrafi area Gosowong (modifikasi dari PT. Nusa Halmahera Minerals, 2013)

Urut-urutan kuarsa epitermal memotong mineralisasi porfiri yang berbentuk *stockwork*. Alterasi pada porfiri ditandai dengan biotit-magnetit ± klorit dengan *envelope* klorit±epidot±kalsit±pirit. Alterasi epitermal yang berkembang dicirikan oleh kuarsa-adularia-ilit-pirit pada zona urat kuarsa, dengan *envelope* ilit-kuarsa-pirit, dan pada area sekitarnya tersebar klorit-epidot-albit-kalsit-pirit secara luas sebagai *halo* (Richards and Basuki Dwi Priyono, 2004). Mineral emas yang telah teridentifikasi dari urat epitermal sulfida rendah pada penelitian sebelumnya di area Toguraci adalah elektum (AuAg) dan petzit yang memiliki rumus kimia Ag_3AuTe_2 (Sulistiyawan, 2009; *Applied Petrological Services*, 2001, 2004, 2005). Sedangkan untuk mineralisasi tembaga, berdasarkan analisis mineragrafi oleh Andrina (2013) pada sampel mineralisasi porfiri di lubang bor TGD044, telah mengidentifikasi keberadaan mineral pirit (FeS_2), kalkopirit ($CuFeS_2$), magnetit (Fe_3O_4), bornit (Cu_5FeS_4), dan kovelit (CuS).

HASIL PENELITIAN

Klaster litogeokimia dengan analisis *K-means*.

Mobilitas unsur menggambarkan perubahan kimia yang terjadi di dalam batuan setelah batuan tersebut terbentuk, yang disebabkan oleh adanya interaksi dengan fluida. Paling umum terjadi saat proses pelapukan, diagenesis dan metamorfisme atau adanya interaksi dengan fluida hidrotermal (Rollinson, 1993). Unsur yang relatif tidak bergerak (*immobile*) dipilih untuk menemukan klaster yang menggambarkan komposisi batuan asal yang sulit ditentukan berdasarkan komposisi unsur utamanya seperti yang umum dilakukan, karena batuan pada area penelitian telah berubah.

Merujuk pada Rollinson (1993), dan Railsback (2003) dalam Halley (2020), maka kombinasi unsur *immobile* yang digunakan dalam penelitian ini adalah Sc, Al, Y, Th, Zr, Hf, Ti, Nb, Ta, P, Co, Ni, V, dan Cr. Kombinasi ini juga disesuaikan dengan batasan paket analisis unsur dan metode

assay yang digunakan oleh laboratorium intertek di Gosowong, milik PT.NHM.

Tahapan preparasi data telah dilakukan sebelum algoritma *K-means* diproses. Tabel 1 menunjukkan statistik deskriptif dan gambaran data secara umum yang dikumpulkan pada tahap ini. Berdasarkan banyaknya persentase data *assay* untuk unsur Hf (53,0%) dan Ta (22,2%) di bawah limit deteksi, maka kedua unsur tersebut tidak digunakan dalam analisis selanjutnya, untuk menghindari bias pada hasil analisis. Sehingga hanya 12 unsur *immobile* pada 478 sampel yang digunakan untuk menentukan klaster litogeokimia dengan metode analisis *K-means* ini.

Penentuan jumlah klaster optimum ditentukan dengan perhitungan *sum of squares* (SS) yaitu jumlah kuadrat jarak data ke nilai rata-rata (*centroid*) di dalam klaster masing-masing. Pada grafik *elbow* Gambar 2 terlihat bahwa jumlah klaster (K) optimum pada data penelitian ini adalah 3, karena merupakan batas terjadinya perubahan nilai SS yang signifikan, dan hanya ada sedikit perubahan pada nilai ini seiring bertambahnya jumlah klaster.

Hasil pengelompokan data dalam 3 klaster dengan *K-means* ini kemudian di plot pada diagram pencar (*scatter plot*) berdasarkan rujukan dari Halley (2020), yaitu Sc terhadap Nb, P, Th, Ti, V, dan Zr (Gambar 3). Sebaran kadar *scandium* dari tinggi ke rendah menggambarkan perubahan dari batuan tinggi Fe ke batuan dengan kadar Fe yang lebih rendah, atau dengan kata lain dapat digunakan sebagai indikasi rentang komposisi batuan mafik ke felsik.

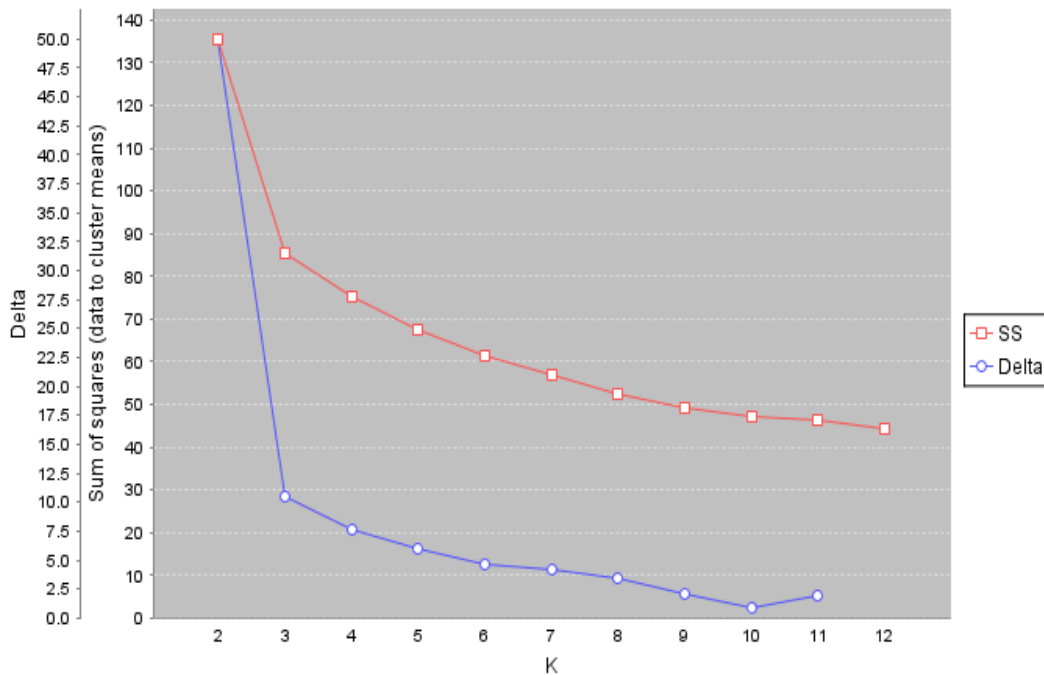
Berdasarkan karakteristik unsur *immobile* tersebut, dikombinasikan dengan pengamatan megaskopis saat deskripsi *core*, maka ketiga klaster ini diinterpretasikan sebagai klaster litogeokimia basal, diorit, dan urat kuarsa (*vein*). Visualisasi dari hasil pengelompokan litogeokimia dalam bentuk grafik dengan banyak sumbu yang menggambarkan komposisi kadar 12 unsur *immobile* pada tiap-tiap klaster ditunjukkan pada Gambar 4.

Karakteristik kluster basal digambarkan dengan asosiasi unsur *immobile* Co, Sc, V, Ti, Y, dan Ni dengan kadar rata-rata yang lebih tinggi dari kluster lainnya (Tabel 2). Kluster diorit memperlihatkan asosiasi unsur Nb, Th, dan P dengan kadar rata-rata lebih tinggi dari kluster lainnya (Tabel 3). Unsur Al dan Zr menunjukkan nilai rata-rata

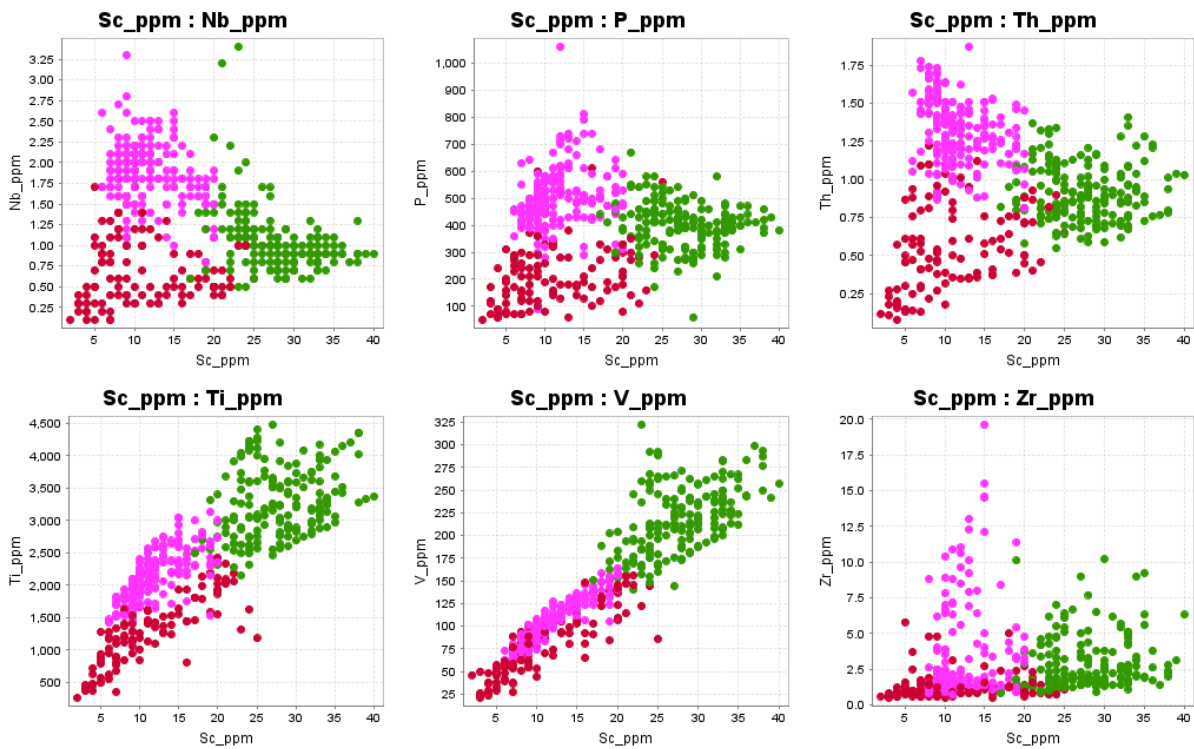
yang relatif sama pada kedua kluster ini. Sedangkan kluster ketiga yang secara megaskopis didominasi oleh urat kuarsa (*vein*) menunjukkan kadar Cr yang paling tinggi diantara kluster lainnya, dan kadar yang rendah pada unsur Al, P, Th, Nb, Y, dan Ti (Tabel 4).

Tabel 1. Statistik deskriptif dan pengelolaan data dibawah limit deteksi, serta pencilan kadar tinggi untuk 14 unsur *immobile*

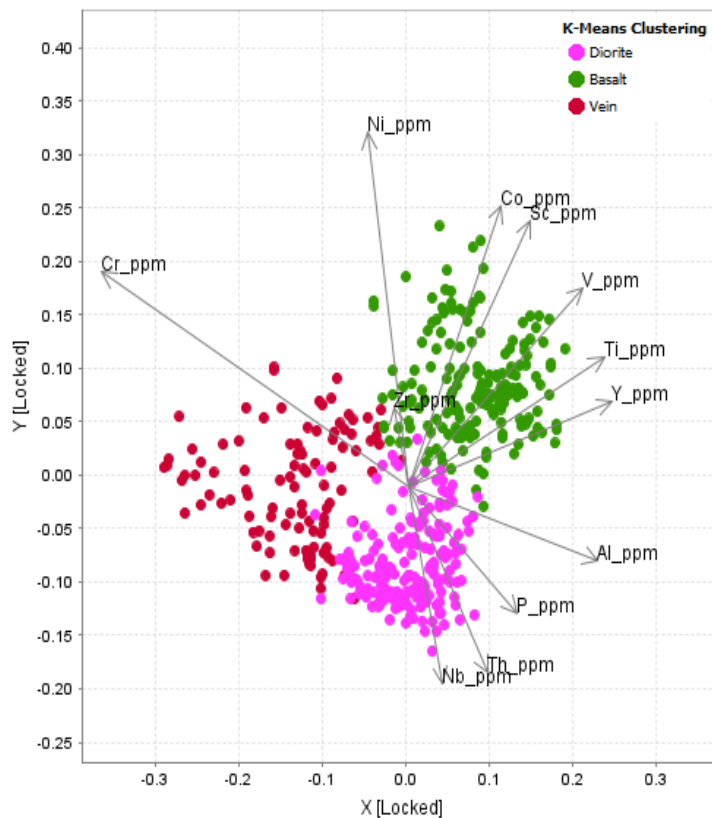
	Al	Co	Cr	Hf	Nb	Ni	P	Sc	Ta	Th	Ti	V	Y	Zr
Metode assay	4Acid/ ICP-OES	4Acid/ ICP-MS	4Acid/ ICP-OES	4Acid/ ICP-MS	4Acid/ ICP-MS	4Acid/ ICP-OES	4Acid/ ICP-OES	4Acid/ ICP-OES	4Acid/ ICP-MS	4Acid/ ICP-MS	4Acid/ ICP-OES	4Acid/ ICP-OES	4Acid/ ICP-MS	4Acid/ ICP-MS
Limit deteksi (g/l)	50	1	5	0.1	0.1	1	50	1	0.05	0.05	5	1	0.1	0.5
Total data (awal)	540	540	540	540	540	540	540	540	540	540	540	540	540	540
% Data dibawah limit deteksi	0.0%	0.0%	0.0%	53.0%	3.0%	0.0%	4.3%	0.0%	22.2%	1.1%	0.0%	0.0%	0.0%	9.1%
Kadar rata-rata (g/l)	66,045.3	16.2	200.9	Tidak digunakan pada analisis lanjutan	1.3	22.9	401.8	17.3	Tidak digunakan pada analisis lanjutan	1.0	2,345.9	138.9	9.5	2.6
Standar deviasi	19,064	8	134		1	13	155	9		0	914	68	4	3
Varian	363,453,853	60	17,968		0	160	23,930	82		0	835,598	4,578	13	7
Kadar minimum (g/l)	11,600.0	2.0	11.0		0.1	3.0	50.0	2.0		0.1	262.0	21.0	1.1	0.5
Kuartil 1 (Q1)	56,000	10	111		1	13	310	9		1	1,710	85	7	1
Kuartil 2 (Q2)	70,800	14	184		1	21	420	15		1	2,280	121	10	2
Kuartil 3 (Q3)	79,600	22	264		2	29	500	24		1	3,000	196	12	3
Kadar maximum (g/l)	99,400	38	842		5	76	1,060	40		2	4,480	322	27	20
IQR (Q3-Q1)	23,600	12	153		1	16	190	15		1	1,290	111	5	2
Pencilan kadar tinggi Q3 + (3*IQR)	150,400.0	58.0	723.0		4.8	77.0	1,070.0	69.0		2.9	6,870.0	529.0	25.4	8.3
% Data pencilan kadar tinggi	0.0%	0.0%	0.6%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	5.2%	
Jumlah data setelah penyesuaian	478	478	478	0	478	478	478	478	0	478	478	478	478	478



Gambar 2. Grafik *elbow* untuk penentuan jumlah kluster (K) optimum untuk analisis *K-means*. Garis merah *sum of squares* (SS) mewakili jumlah kuadrat jarak titik data dari rata-rata klasternya masing-masing (*centroid*). Garis biru *delta* adalah perbedaan antara total nilai SS seiring bertambahnya jumlah kluster (Sumber istilah dan definisi dari *software* ioGAST™)



Gambar 3. Diagram pencar Sc / Nb, P, Th, Ti, V, dan Zr. Kluster basal digambarkan dengan titik warna hijau, diorit dengan warna magenta, dan urat kuarsa (*vein*) dengan warna merah



Gambar 4. Grafik 3D *biplot* hasil penge-lompokkan unsur *immobile* menggunakan analisis *K-means*

Tabel 2. Statistik deskriptif kadar unsur-unsur *immobile* pada klaster basal

Basal	Al	Co	Cr	Nb	Ni	P	Sc	Th	Ti	V	Y	Zr
Satuan	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t
Jumlah data	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175
Minimum	49400,0	14,0	11,0	0,5	14,0	60,0	17,0	0,6	2150,0	140,0	7,6	0,8
Maksimum	92400,0	38,0	446,0	3,4	76,0	670,0	40,0	1,4	4480,0	322,0	18,2	10,2
Rata-rata	73788,0	24,9	155,5	1,0	33,8	399,2	27,6	0,9	3279,7	216,7	12,7	2,9
Kuartil 1	66300,0	21,0	92,0	0,8	25,0	350,0	24,0	0,8	2860,0	187,0	11,2	1,5
Kuartil 2 (Median)	73700,0	24,0	146,0	1,0	31,0	410,0	27,0	0,9	3230,0	213,0	12,7	2,1
Kuartil 3	82200,0	28,0	208,0	1,2	40,0	450,0	32,0	1,0	3660,0	244,0	14,3	3,7
Rentang	43000,0	24,0	435,0	2,9	62,0	610,0	23,0	0,9	2330,0	182,0	10,6	9,4
Jarak interkuartil	15900,0	7,0	116,0	0,4	15,0	100,0	8,0	0,3	800,0	57,0	3,1	2,2
Standar deviasi	10472,3	4,8	80,6	0,4	12,6	84,0	4,9	0,2	541,2	37,9	2,2	1,9

Tabel 3. Statistik deskriptif kadar unsur-unsur *immobile* pada klaster diorit

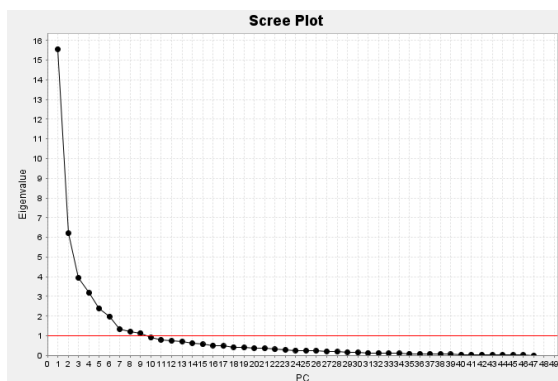
Diorit	Al	Co	Cr	Nb	Ni	P	Sc	Th	Ti	V	Y	Zr
Satuan	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t
Jumlah data	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196
Minimum	45400,0	7,0	11,0	0,8	5,0	90,0	6,0	0,8	1290,0	62,0	2,8	0,6
Maksimum	99400,0	20,0	554,0	3,3	47,0	1060,0	20,0	1,9	3130,0	164,0	13,0	19,6
Rata-rata	75370,9	11,9	187,3	1,9	16,2	507,3	11,6	1,3	2115,5	102,8	9,1	3,1
Kuartil 1	69700,0	10,0	134,5	1,7	11,0	450,0	9,0	1,2	1822,5	83,0	8,2	1,2
Kuartil 2 (Median)	74900,0	11,0	186,5	1,9	14,0	500,0	11,0	1,3	2090,0	100,5	9,1	1,6
Kuartil 3	82675,0	14,0	237,3	2,1	20,0	560,0	14,0	1,5	2360,0	120,0	10,1	3,4
Rentang	54000,0	13,0	543,0	2,5	42,0	970,0	14,0	1,1	1840,0	102,0	10,2	19,0
Jarak interkuartil	12975,0	4,0	102,8	0,4	9,0	110,0	5,0	0,3	537,5	37,0	1,9	2,2
Standar deviasi	9957,9	2,9	107,1	0,4	6,7	108,8	3,5	0,2	383,1	23,6	1,5	3,3

Tabel 4. Statistik deskriptif kadar unsur-unsur *immobile* pada klaster urat kuarsa

Urat Kuarsa	Al	Co	Cr	Nb	Ni	P	Sc	Th	Ti	V	Y	Zr
Satuan	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t	g/t
Jumlah data	107	107	107	107	107	107	107	107	107	107	107	107
Minimum	11600,0	2,0	14,0	0,1	3,0	50,0	2,0	0,1	262,0	21,0	1,1	0,5
Maksimum	57100,0	21,0	695,0	1,7	44,0	610,0	25,0	1,2	2430,0	156,0	9,3	5,8
Rata-rata	37062,6	10,2	285,7	0,7	17,5	209,3	11,2	0,6	1272,7	80,0	5,0	1,3
Kuartil 1	30300,0	7,0	190,0	0,4	11,0	130,0	6,0	0,4	883,0	53,0	3,7	0,8
Kuartil 2 (Median)	37700,0	8,0	290,0	0,6	17,0	190,0	10,0	0,5	1270,0	78,0	5,0	1,0
Kuartil 3	46600,0	15,0	368,0	1,0	23,0	280,0	16,0	0,8	1610,0	103,0	6,3	1,4
Rentang	45500,0	19,0	681,0	1,6	41,0	560,0	23,0	1,1	2168,0	135,0	8,2	5,3
Jarak interkuartil	16300,0	8,0	178,0	0,6	12,0	150,0	10,0	0,4	727,0	50,0	2,6	0,6
Standar deviasi	11950,9	4,8	170,1	0,4	8,3	108,9	6,0	0,3	522,7	35,6	2,0	1,0

Asosiasi unsur dengan analisis komponen utama (PCA).

Analisis PCA pada 540 sampel dengan variabel 47 unsur dalam penelitian ini menghasilkan 9 komponen utama dengan nilai *eigenvalues* >1 yang mewakili 78,63% *variance* yang ada. Namun hanya PC1 - PC7 yang menunjukkan perubahan nilai *eigenvalues* yang signifikan, sedangkan dari PC7 ke PC8 dan PC9 sudah tidak banyak perbedaan. Dengan kata lain, posisi *elbow* ada di PC7 (Gambar 5) yang mewakili 73,62% *variance* yang ada. Nilai *eigenvalues* secara terperinci dari semua PC dapat dilihat pada Tabel 5.



Gambar 5. Scree plot yang menunjukkan posisi *elbow* dari *eigenvalues* pada 7 komponen utama

Tabel 5. Nilai *eigenvalues* untuk semua komponen utama

PC	<i>Eigenvalues</i>	Persentase	Kumulatif (%)	PC	<i>Eigenvalues</i>	Persentase	Kumulatif (%)	PC	<i>Eigenvalues</i>	Persentase	Kumulatif (%)
PC1	15,57	33,12	33,12	PC17	0,48	1,02	89,96	PC33	0,11	0,23	98,47
PC2	6,21	13,21	46,32	PC18	0,43	0,91	90,87	PC34	0,10	0,22	98,68
PC3	3,95	8,40	54,72	PC19	0,40	0,86	91,73	PC35	0,09	0,20	98,89
PC4	3,18	6,76	61,48	PC20	0,37	0,79	92,52	PC36	0,08	0,18	99,06
PC5	2,39	5,08	66,56	PC21	0,36	0,76	93,28	PC37	0,08	0,17	99,24
PC6	1,99	4,23	70,79	PC22	0,31	0,66	93,94	PC38	0,07	0,16	99,39
PC7	1,33	2,83	73,62	PC23	0,29	0,61	94,55	PC39	0,06	0,12	99,52
PC8	1,21	2,58	76,19	PC24	0,26	0,55	95,10	PC40	0,05	0,10	99,62
PC9	1,14	2,43	78,63	PC25	0,25	0,52	95,62	PC41	0,04	0,09	99,70
PC10	0,90	1,92	80,55	PC26	0,24	0,51	96,13	PC42	0,04	0,08	99,79
PC11	0,79	1,69	82,23	PC27	0,21	0,45	96,59	PC43	0,03	0,07	99,85
PC12	0,74	1,57	83,80	PC28	0,19	0,41	96,99	PC44	0,03	0,06	99,91
PC13	0,71	1,51	85,31	PC29	0,17	0,37	97,36	PC45	0,02	0,05	99,96
PC14	0,63	1,33	86,64	PC30	0,15	0,32	97,68	PC46	0,02	0,04	100,00
PC15	0,57	1,20	87,85	PC31	0,13	0,29	97,96	PC47	0,00	0,00	100,00
PC16	0,52	1,10	88,94	PC32	0,13	0,27	98,23				

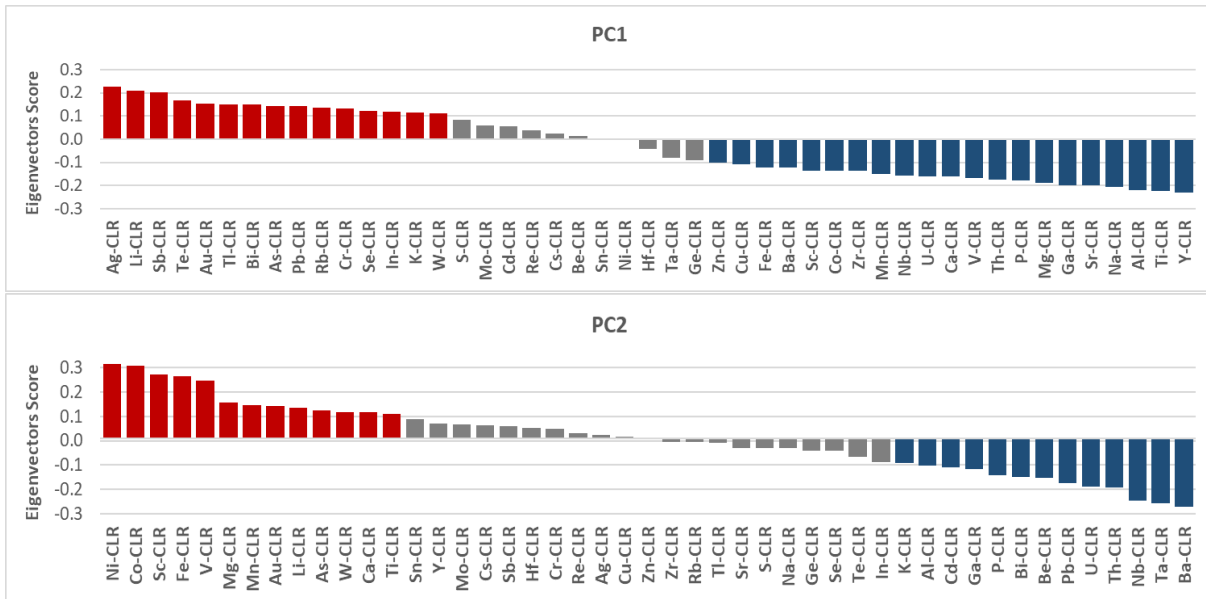
PCA juga menghasilkan *eigenvector* yang menggambarkan seberapa signifikan suatu unsur dalam populasi yang dinyatakan dengan skor dalam tiap komponen utama. Asosiasi unsur dengan skor tinggi (positif) dan skor rendah (negatif) menggambarkan karakteristik geologi tertentu. Unsur yang memiliki skor *eigenvector* diatas skor rata-rata yaitu 0,1 dipilih sebagai unsur yang dominan.

PC1; dengan *eigenvalue* 15,57 mewakili 33,12% *variance* data merupakan komponen utama yang paling dominan menggambarkan 2 kelompok asosiasi unsur yaitu pada skor tinggi (>0,1) terdiri dari unsur Ag-Li-Sb-Te-Au-Tl-Bi-As-Pb-Rb-Cr-Se-In-K-W, sedangkan pada skor rendah (<-0,1) didominasi unsur Y-Ti-Al-Na-Sr-Ga-Mg-P-Th-V-Ca-U-Nb-Mn-Zr-Co-Sc-Ba-Fe-Cu-Zn (Gambar 6).

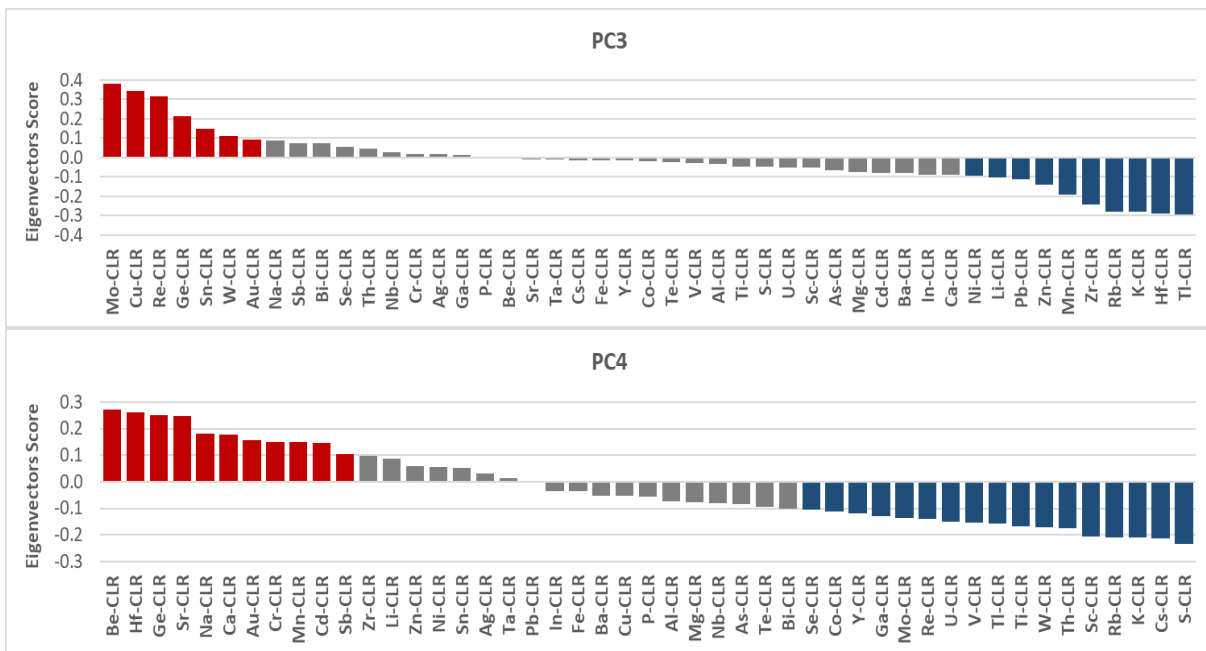
PC2; dengan *eigenvalue* 6,21 mewakili 13,21% *variance* data menunjukkan korelasi unsur Ni-Co-Sc-Fe-V-Mg-Mn-Au-Li-As-W-Ca-Ti pada skor tinggi (>0,1), sedangkan pada skor rendah (<-0,1) didominasi oleh unsur Ba-Ta-Nb-Th-U-Pb-Be-Bi-P-Ga-Cd-Al-K (Gambar 6).

PC3; memiliki nilai *eigenvalue* 3,95 mewakili 8,40% *variance* data pada skor tinggi (>0,1) menggambarkan asosiasi unsur Mo-Cu-Re-Ge-Sn-W dan Au dengan skor 0,09. Sedangkan asosiasi unsur pada skor rendah (<-0,1) yaitu Ti-Hf-K-Rb-Zr-Mn-Zn-Pb-Li (Gambar 7).

PC4; dengan nilai *eigenvalues* 3,18 yang mewakili 6,76% *variance* data menunjukkan asosiasi unsur Be-Hf-Ge-Sr-Na-Ca-Au-Cr-Mn-Cd-Sb pada skor tinggi (>0,1). Sedangkan asosiasi unsur pada skor rendah (<-0,1) yaitu S-Cs-K-Rb-Sc-Th-W-Ti-Tl-V-U-Re-Mo-Ga-Y-Co-Se (Gambar 7).



Gambar 6. *Eigenvector plot* untuk unsur-unsur dalam PC1 dan PC2, skor tinggi dominan >0,1 (merah) dan skor rendah dominan <-0,1 (biru). PC1 dan PC2 secara kumulatif mewakili 46,32% *variance* dalam data



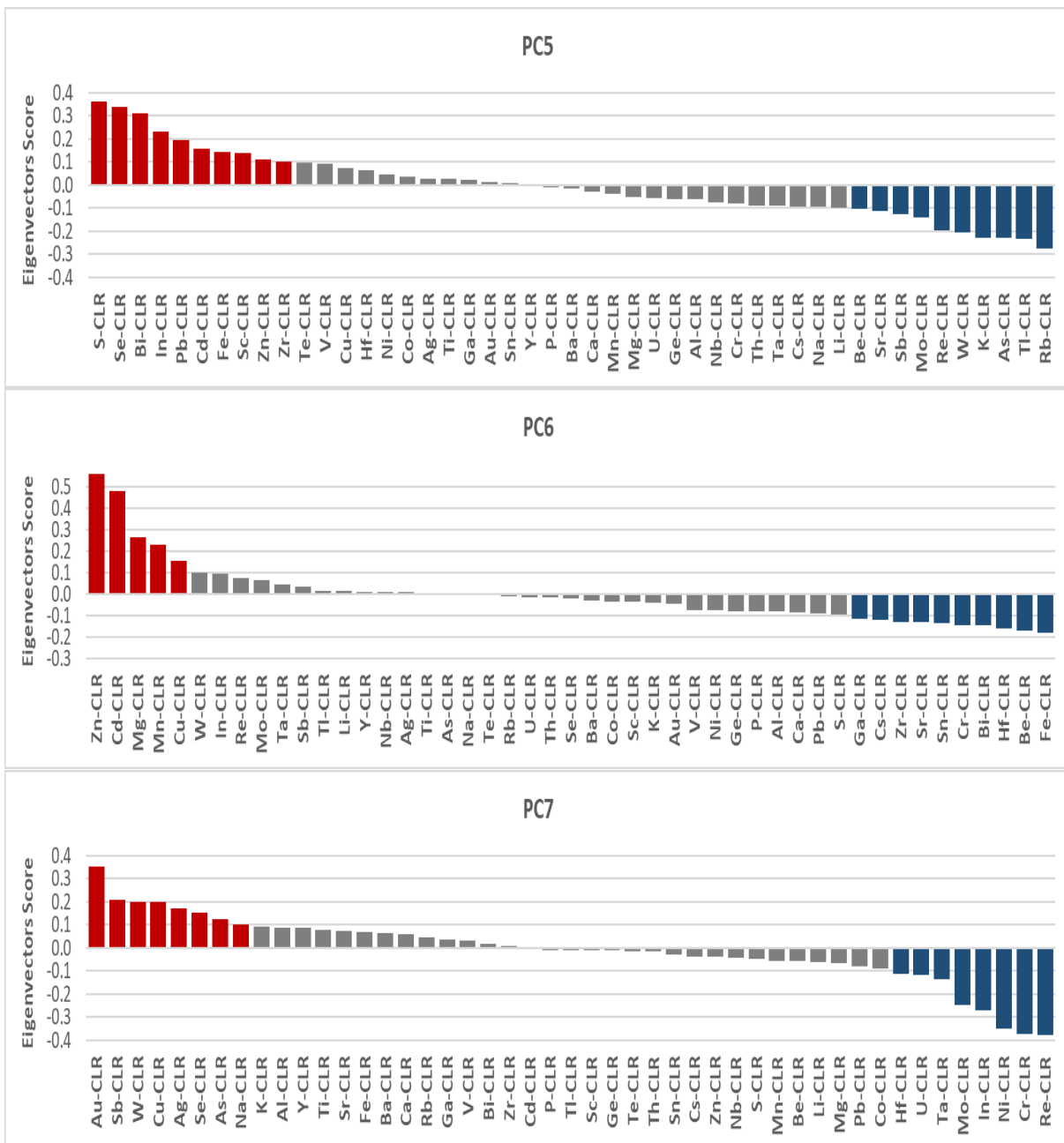
Gambar 7. *Eigenvector plot* untuk unsur-unsur dalam PC3 dan PC4, skor tinggi dominan >0,1 (merah) dan skor rendah dominan <-0,1 (biru).

PC5; dengan nilai *eigenvalues* 2,39 yang mewakili 5,08% *variance* data menunjukkan asosiasi unsur S-Se-Bi-In-Pb-Cd-Fe-Sc-Zn-Zr pada skor tinggi (>0,1). Sedangkan asosiasi unsur pada skor rendah (<-0,1) yaitu Rb-Tl-As-K-W-Re-Mo-Sb-Sr-Be (Gambar 8).

PC6; dengan nilai *eigenvalues* 1,99 yang mewakili 4,23% *variance* data menunjukkan asosiasi unsur Zn-Cd-Mg-Mn-Cu pada skor

tinggi (>0,1). Sedangkan asosiasi unsur pada skor rendah (<-0,1) yaitu Fe-Be-Hf-Bi-Cr-Sn-Sr-Zr-Cs-Ga (Gambar 8).

PC7; dengan nilai *eigenvalues* 1,33 yang mewakili 2,83% *variance* data menunjukkan asosiasi unsur Au-Sb-W-Cu-Ag-Se-As-Na pada skor tinggi (>0,1). Sedangkan asosiasi unsur pada skor rendah (<-0,1) yaitu Re-Cr-Ni-In-Mo-Ta-U-Hf (Gambar 8).



Gambar 8. *Eigenvector plot* untuk unsur-unsur dalam PC5, PC6, dan PC7, skor tinggi dominan >0,1 (merah) dan skor rendah dominan <-0,1 (biru)

PEMBAHASAN

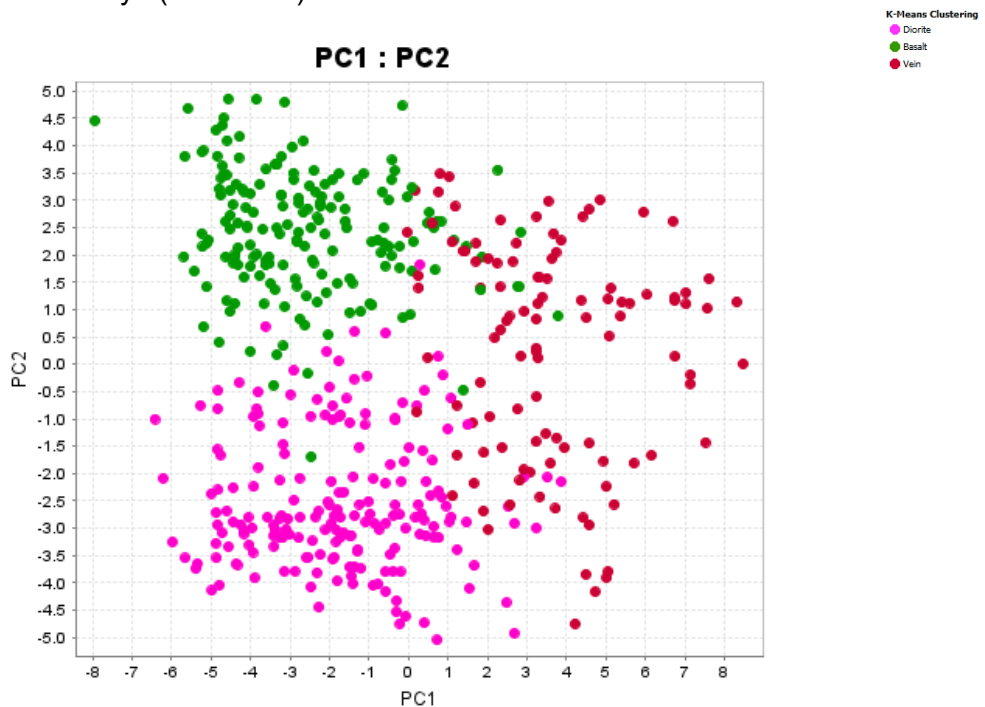
Karakteristik kluster litogeokimia hasil analisis *K-means* menunjukkan konsistensi jika dibandingkan dengan hasil analisis komponen utama dan hasil deskripsi megaskopis. Karakteristik litogeokimia ini sekaligus menjadi komponen utama dengan nilai *eigenvalue* paling tinggi. Kombinasi PC1 dan PC2 secara kumulatif mewakili 46.32% *variance* pada kelompok data, yang pada skor tinggi dan rendahnya menggambarkan asosiasi unsur-unsur *immobile* yang mewakili komposisi batuan. Konsistensi antara hasil dari *K-means* dan PCA dapat dilihat dengan menggunakan diagram pencar PC1 terhadap PC2 yang diberi atribut warna dari hasil *clustering* menggunakan *K-means* (Gambar 10).

Unsur Cr menjadi unsur *immobile* kunci yang memisahkan urat kuarsa pada PC1 sumbu positif, dengan batuan samping yang menunjukkan asosiasi unsur *immobile* lainnya (Y-Ti-Al-P-Th-V-Nb-Zr-Co-Sc) pada sumbu negatif. Sedangkan PC2 memisahkan batuan samping menjadi basal pada sumbu positif dengan asosiasi unsur *immobile* Ni-Co-Sc-V-Ti, dan diorit pada sumbu negatif dengan Nb-Th-P-Al sebagai asosiasi unsur *immobile*-nya (Gambar 9).

Komponen utama dalam skala besar (PC1-PC2) telah membagi data dalam 3 kelompok yang dipisahkan berdasarkan asosiasi unsur *immobile*-nya atau dapat disimpulkan juga mewakili komposisi kimia batuan asalnya. Kemudian dalam skala yang lebih detail, PC3 sampai PC7 menggambarkan ragam yang ada di dalam tiap-tiap batuan, termasuk karakteristik mineralisasinya. Gambar 20 merupakan grafik *log* keseluruhan hasil penelitian ini, yang menggambarkan 6 kelompok atau domain dengan karakteristik komponen utamanya masing-masing.

Domain urat kuarsa

Merupakan domain utama mineralisasi epitermal sulfida rendah Au-Ag di Toguraci. Urat kuarsa±karbonat hadir dalam bentuk *stockwork* berukuran 2-5 mm, breksia, hingga *lode* (masif) dengan ketebalan 1 sampai 15 meter, dan lebar zona mineralisasi mencapai 20 meter di dalam batuan induk basal maupun diorit. Tekstur umumnya kristalin dan mikrokristalin, dan pada zona dengan kadar Au tinggi menunjukkan tekstur *banded crustiform / colloform* dengan lapisan mineral sulfida dan klorit, terbentuk pada zona kontak batuan diorit-basal (Gambar 10).



Gambar 9. Diagram pencar PC1 dan PC2 dengan atribut warna dari hasil *K-means clustering*



Gambar 10. Urat kuarsa±karbonat, dengan tekstur kristalin-mikrokristalin, dan minor *crustiform/colloform banded* dengan lapisan sulfida dan klorit berwarna kehijauan

Domain urat kuarsa ini memiliki karakteristik nilai PC1 yang positif yang menunjukkan asosiasi unsur Ag-Li-Sb-Te-Au-Tl-Bi-As-Pb-Rb-Cr-Se-In-K-W. Unsur-unsur ini dapat dijadikan petunjuk untuk kegiatan eksplorasi, terutama unsur-unsur yang memiliki afinitas atau kecenderungan untuk bersenyawa membentuk mineral sulfida (*chalcophile*) yang dapat menjadi *pathfinder* mineralisasi seperti Ag-Sb-Te-Au-Tl-Bi-As-Pb-Se-In.

Domain Basal-1

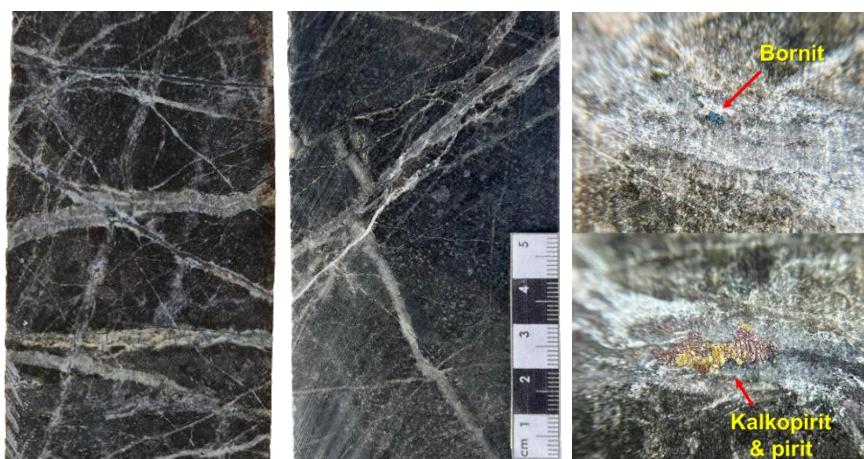
Basal tipe pertama ini, secara megaskopis mempunyai karakteristik berwarna gelap, tekstur afanitik, dengan sedikit fenokris mineral mafik berukuran halus. Ubahan potasik, batuan berubah sedang-kuat, dengan magnetit dan ±biotit menggantikan mineral mafik dari batuan asal. Berasosiasi dengan mineralisasi porfiri berbentuk *stockwork* dengan intensitas tinggi, yaitu >20 *vein* per meter. Ketebalan 1-5 mm, dengan kombinasi *A-type* dan *B-type vein* yang membawa mineral kalkopirit, pirit, serta *veinlet* magnetit (*M-type*) dan kalkopirit berukuran rambut (*C-type*). Secara setempat dalam jumlah kecil terdapat bornit yang berasosiasi dengan kalkopirit (Gambar 11). Asosiasi unsur yang memiliki afinitas ke mineral sulfida pada domain ini ditunjukkan

pada PC3 positif yaitu Mo-Cu-Re-Ge-Au dan PC7 positif yaitu Au-Sb-Cu-Ag-Se-As.

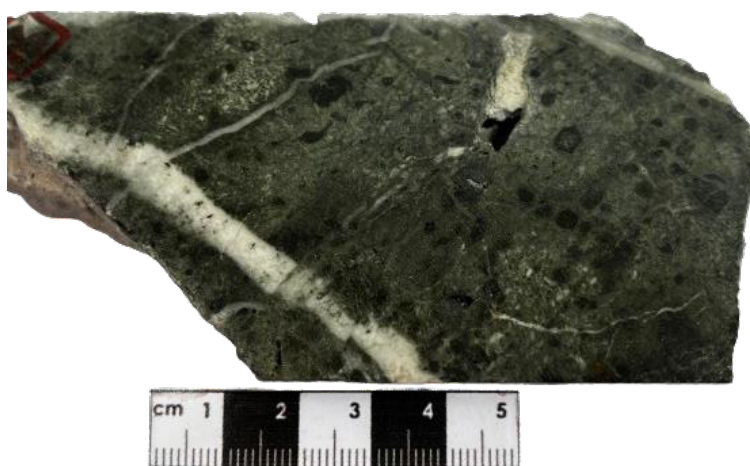
Domain Basal-2

Basal bertekstur porfiritik, dengan dominasi mineral *augite* sebagai fenokris di dalam masa dasar yang telah berubah, berwarna gelap kehijauan. Ubahan propilitik dengan intensitas sedang, secara setempat masih dapat diamati bentuk kristal *augite* yang sempurna, berubah sebagian menjadi klorit.

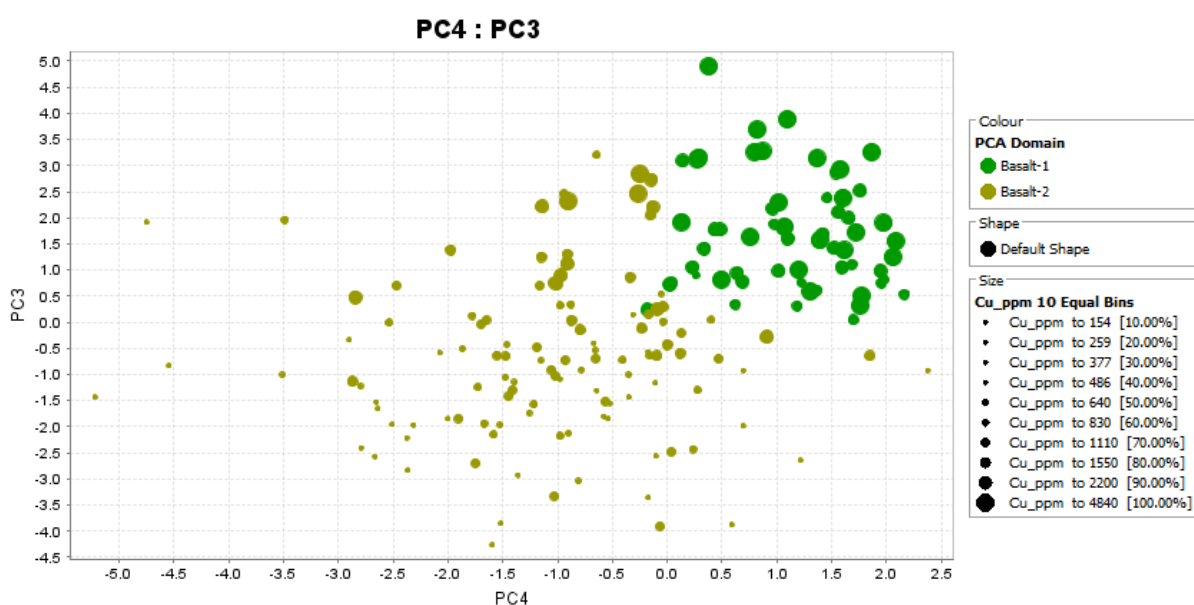
Berasosiasi dengan mineralisasi porfiri berbentuk *stockwork* dengan intensitas rendah, <10 *vein* per meter. Ketebalan 1-15 mm, dengan dominasi *B-type vein* dengan pirit dan kalkopirit *centre line*. Secara setempat terdapat *veinlet* magnetit, pirit, dan juga kalkopirit. Domain ini tidak menunjukkan secara khusus terkait asosiasi unsur yang memiliki afinitas ke mineral sulfida, dilihat dari skor PC3 dan PC7 yang tidak secara konsisten menunjukkan nilai tinggi (positif). Sesuai dengan kenampakan megaskopisnya yang memperlihatkan intensitas *stockwork* yang rendah (Gambar 12). Komponen utama yang dapat digunakan untuk memisahkan domain Basal-1 dan Basal-2 adalah PC4 seperti yang ditunjukkan pada diagram pencar Gambar 13.



Gambar 11. Basal-1 dengan intensitas *stockwork* porfiri tinggi, yang membawa mineral kalkopirit, pirit, dan bornit



Gambar 12. Basal-2, mineral *augite* sebagai fenokris, ubahan klorit



Gambar 13. Diagram pencar PC3 dan PC4 dengan atribut warna dari domain Basal-1 dan Basal-2, serta ukuran titik yang dibuat berdasarkan skala kadar Cu

Domain Diorit-1

Diorit bertekstur porfiritik, dengan fenokris berukuran halus <2 mm, terdiri dari 65% plagioklas, 5% hornblenda, dan kuarsa 10% di dalam masa dasar. Pada area kontak dengan basal menunjukkan tekstur lebih halus (afanitik). Secara setempat terdapat fragmen kuarsa porfiri *vein* dan batuan basal yang lebih tua. Terubah sebagian, dengan intensitas sedang, mineral ubahan yang dapat diamati adalah K-feldspar berwarna merah muda dan biotit sekunder juga ditemukan secara setempat. Dengan mineralisasi porfiri *stockwork* intensitas sedang, 10-20 *vein* per meter, ketebalan 1-20 mm, dengan dominasi *A-type* dan *B-type vein* yang membawa mineral kalkopirit, pirit dan *veinlet* magnetite (*M-type*), secara megaskopis diorit-1 dapat dilihat pada Gambar 14. Asosiasi unsur yang memiliki afinitas ke mineral sulfida pada domain ini menunjukkan kemiripan dengan domain Basal-1 yaitu dari PC3 positif yaitu Mo-Cu-Re-Ge-Au dan PC7 positif yaitu Au-Sb-Cu-Ag-Se-As.



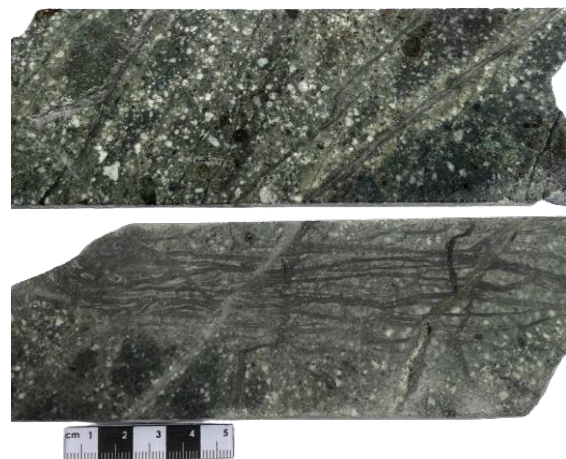
Gambar 14. Diorit-1 dengan *stockwork* porfiri intensitas sedang. Ubahan K-feldspar berwarna merah muda pada masa dasar dan fenokris berukuran halus

Domain Diorit-2

Diorit dengan tekstur porfiritik, dengan fenokris berukuran 2-3 mm, terdiri dari 75% plagioklas, 10% hornblenda, dan kuarsa 10% di dalam masa dasar. Secara setempat

ditemukan fragmen batuan yang lebih tua. Terubah sebagian, dengan intensitas sedang, dominan ubahan klorit berwarna kehijauan, serta ubahan serisit secara setempat sebagai halo disekitar porfiri *vein*. Berasosiasi dengan mineralisasi porfiri berupa *stockwork* dengan intensitas lemah, <10 *vein* per meter dengan ketebalan 1-2 mm.

Umumnya *B-type vein* dengan *centre line* pirit, dan secara setempat *veinlet* pirit±molibdenit. Dikonfirmasi juga dengan *assay* kadar Mo yang tinggi pada zona ini. Pada zona batuan ini juga di *overprinted* oleh kuarsa±karbonat epitermal *vein* dengan intensitas yang cukup tinggi (Gambar 15). Asosiasi unsur yang memiliki afinitas ke mineral sulfida pada domain ini juga ditunjukkan dengan PC3 positif yaitu Mo-Cu-Re-Ge-Au. Namun sedikit berbeda dengan domain Basal-1 dan Diorit-1, domain Diorit-2 mempunyai nilai negatif (skor rendah) untuk PC7. Perbedaan komponen utama ini menunjukkan bahwa domain Diorit-2 memiliki karakteristik kadar Mo yang lebih tinggi dan lebih dominan daripada Cu maupun Au.



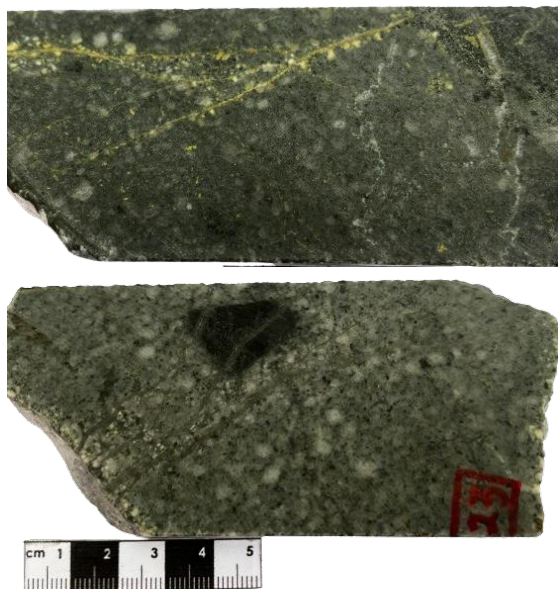
Gambar 15. Diorit-2 dengan ubahan klorit, dan *stockwork* porfiri dengan ubahan serisit sebagai halo.

Domain Diorit-3

Diorit dengan tekstur porfiritik-faneritik, dengan fenokris berukuran 2-5 mm, terdiri dari 75% plagioklas, 10% hornblenda, dan kuarsa 15%. Fragmen diorit dan basal yang

lebih tua ditemukan di sebagian tempat pada domain ini. Terubah sebagian, dengan intensitas lemah-sedang, dominan ubahan klorit berwarna kehijauan, serta ubahan epidot berupa *veinlet* maupun pada fenokris dan masa dasarnya. Namun fragmen batuan yang lebih tua telah terubah kuat, dengan *disseminated* magnetit dan mineral sulfida seperti pirit±kalkopirit berukuran halus di dalamnya. Domain ini juga berasosiasi dengan mineralisasi porfiri *stockwork* dengan intensitas lemah, <10 *vein* per meter. Ketebalan *veinlet* 1-5 mm, dengan dominasi *D-type vein*, kuarsa-pirit dengan serisit halo. Pada zona batuan ini juga di *overprinted* oleh kuarsa±karbonat epitermal *vein* dengan intensitas sedang (lebih rendah dari Diorit-2) dan secara setempat terdapat *veinlet* epidot (Gambar 16).

Asosiasi unsur yang memiliki afinitas ke mineral sulfida pada domain ini ditunjukkan dengan skor PC5 positif yaitu S-Se-Bi-In-Pb-Cd-Fe-Zn.



Gambar 16. Diorit-3 dengan ubahan klorit-epidot, dan fragmen basal yang membawa mineral sulfida

Domain ini diinterpretasikan sebagai batuan yang paling muda, jika dilihat dari adanya fragmen basal maupun diorit di dalamnya. Paling sedikit termineralisasi, dilihat dari intensitas *vein* dan asosiasi unsur-unsur

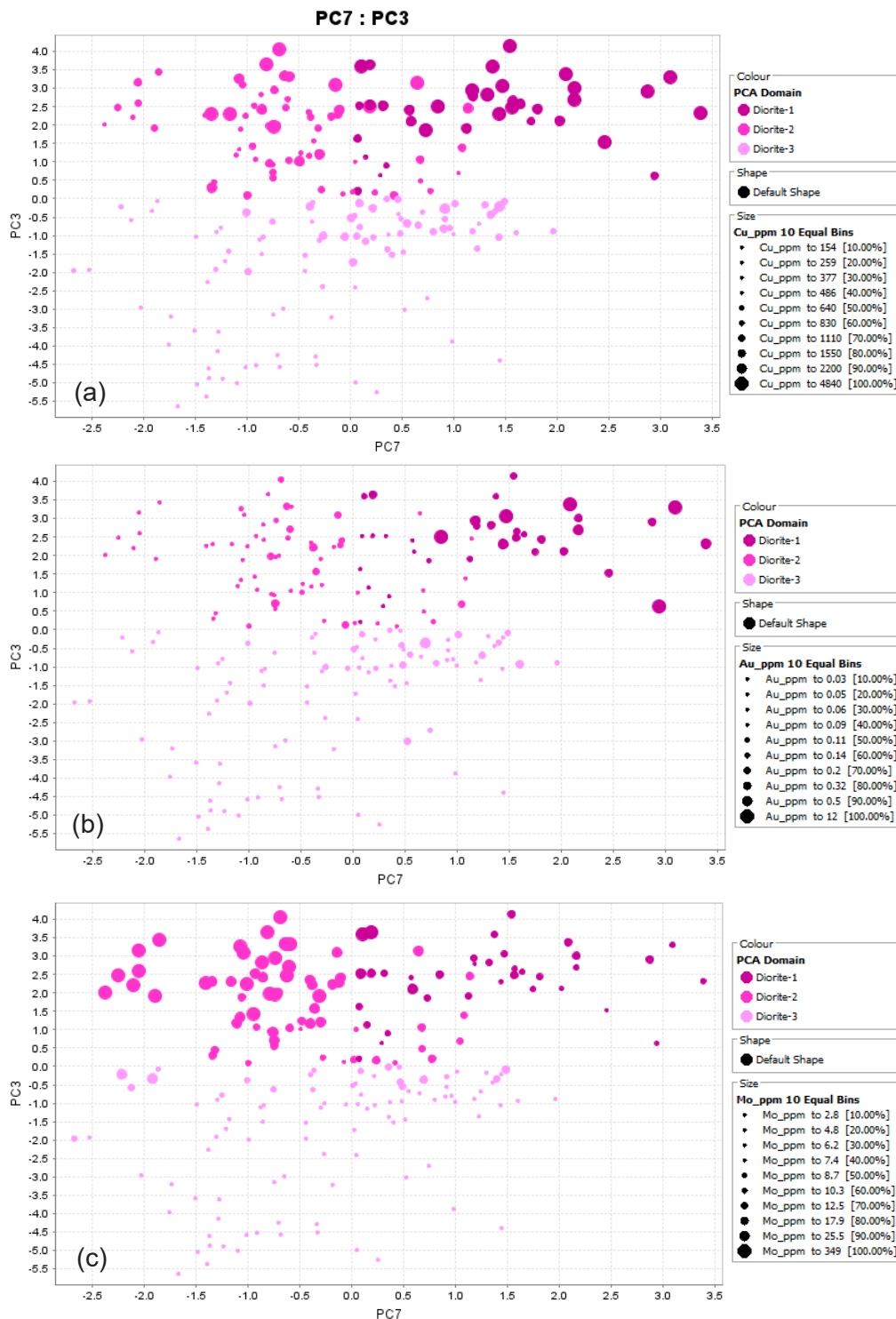
yang menjadi komponen utamanya yang tidak berhubungan dengan Cu maupun Au. Namun demikian, masih dapat ditemukan juga kadar Cu tinggi di beberapa sampel yang berhubungan dengan keberadaan fragmen basal maupun diorit yang lebih tua yang membawa mineralisasi.

Komponen utama yang membedakan ketiga domain diorit ini adalah PC3 dan PC7 yang juga berhubungan dengan distribusi kadar Cu, Au, dan Mo pada tiap domain, seperti yang ditunjukkan pada diagram pencar Gambar 17. Diorit-1 dan Diorit-2 memiliki rata-rata kadar Cu yang lebih tinggi dari pada Diorit-3, namun Diorit-1 memiliki karakteristik kadar Au yang lebih tinggi, sedangkan Diorit-2 dicirikan dengan kadar Mo tinggi yang lebih dominan.

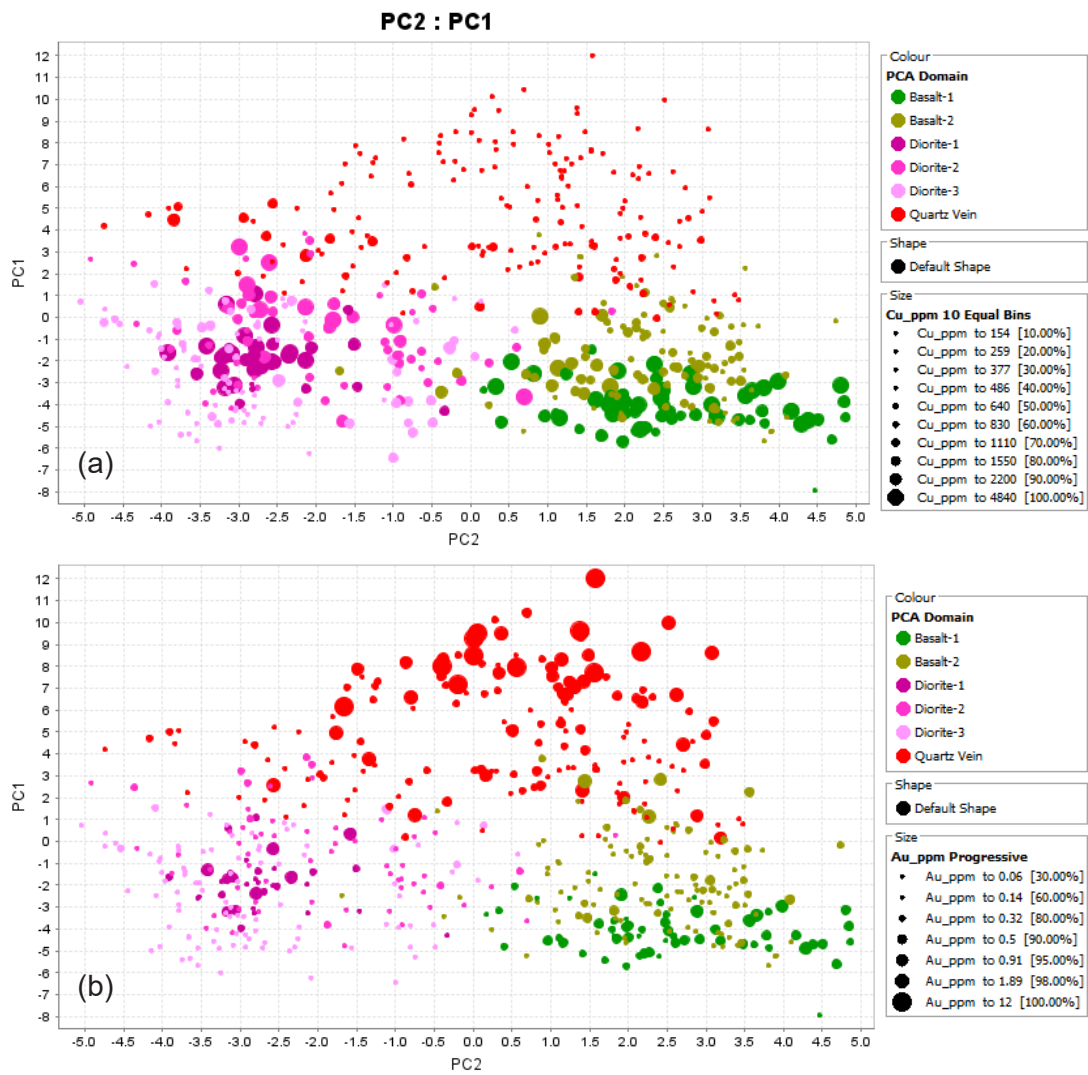
Analisis statistik multivariat yang digunakan untuk pengolahan data geokimia dalam penelitian ini telah menghasilkan 6 domain dengan karakteristik geologi dan mineralisasinya masing-masing. Mineralisasi tembaga terutama terdapat pada domain Basal-1 dan juga Diorit-1 (Gambar 18a), dengan tipe porfiri yang memiliki karakteristik utama asosiasi unsur Mo-Cu-Re-Ge-Au. Komponen utama yang merepresentasikan mineralisasi tembaga ini adalah PC3 dan PC7. Sedangkan mineralisasi emas terutama terdapat pada domain urat kuarsa (Gambar 18b), dengan tipe epitermal sulfida rendah yang memiliki karakteristik asosiasi unsur-unsur Ag-Sb-Te-Au-Tl-Bi-As-Pb-Se-In. Komponen utama yang merepresentasikan mineralisasi emas ini adalah PC1, yang secara tegas juga memisahkan urat kuarsa dari batuan samping. Selain 3 komponen utama tersebut, ada 4 komponen utama lainnya yang berhubungan dengan litologi dan alterasi sebagai data pendukung untuk mengetahui kondisi geologi pada domain yang termineralisasi. Secara lengkap, hasil deskripsi batuan (*core logging*), kluster litogeokimia, domain PCA, kadar unsur tembaga-emas, serta 7 komponen utama yang mewakili 73,62% *variance* data geokimia pada 2 lubang bor dalam penelitian ini disajikan dengan grafik *log* pada Gambar 19 dan 20.

Selain melihat data geokimia, karakteristik fisik atau megaskopis seperti jenis dan tekstur batuan, mineral ubahan, intensitas dan tipe urat, serta tekstur kuarsa juga

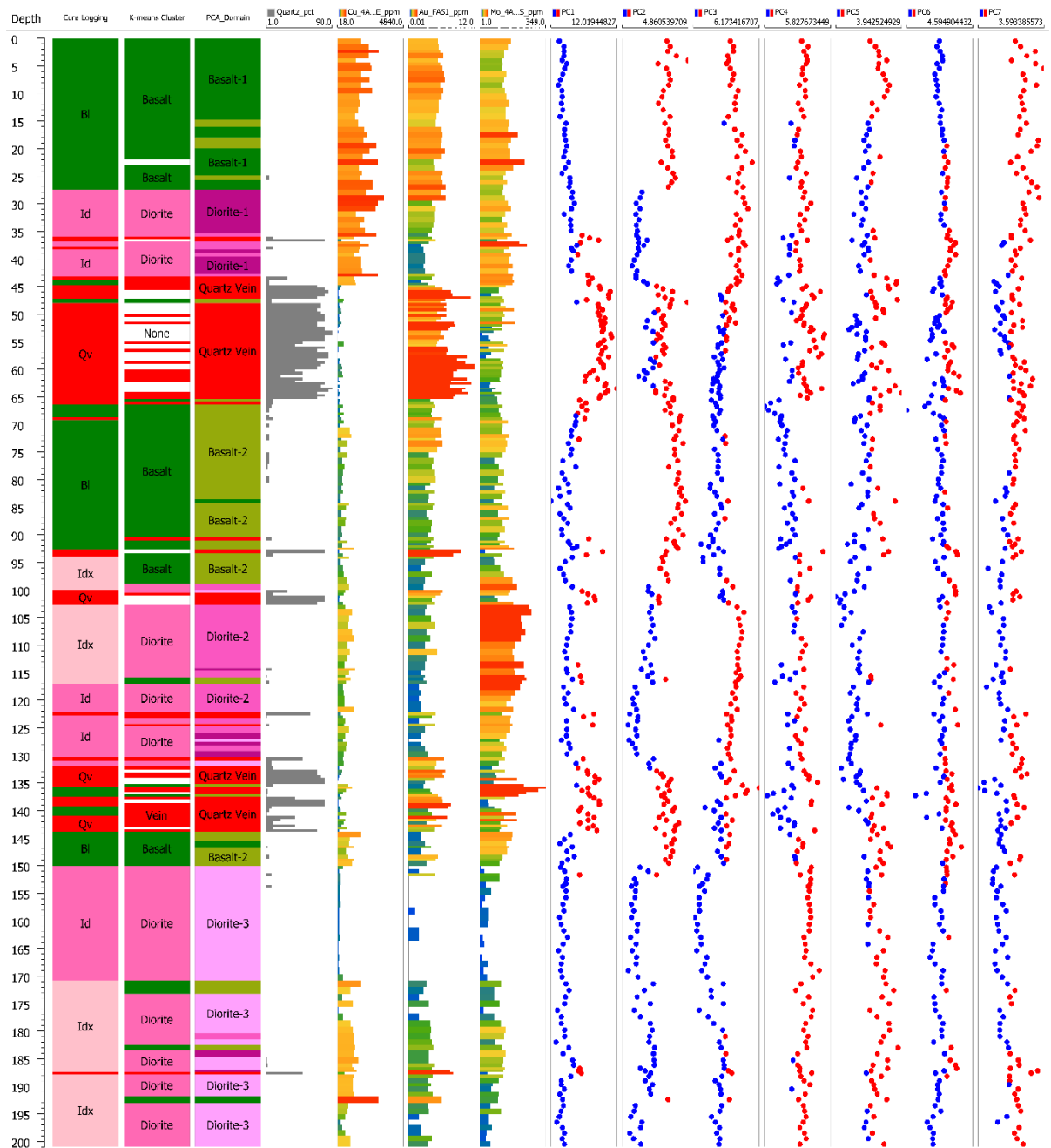
penting untuk dipahami, karena menjadi hal pertama yang akan diidentifikasi saat deskripsi *core* sebelum kita mengetahui hasil assya nya dari laboratorium.



Gambar 17. Diagram pencar PC3 dan PC7 dengan atribut warna dari domain Diorit-1, Diorit-2 dan Diorit-3. **a)** Ukuran titik data dibuat mengikuti skala kadar Cu. **b)** Ukuran titik data dibuat mengikuti skala kadar Au. **c)** Ukuran titik data dibuat mengikuti skala kadar Mo.



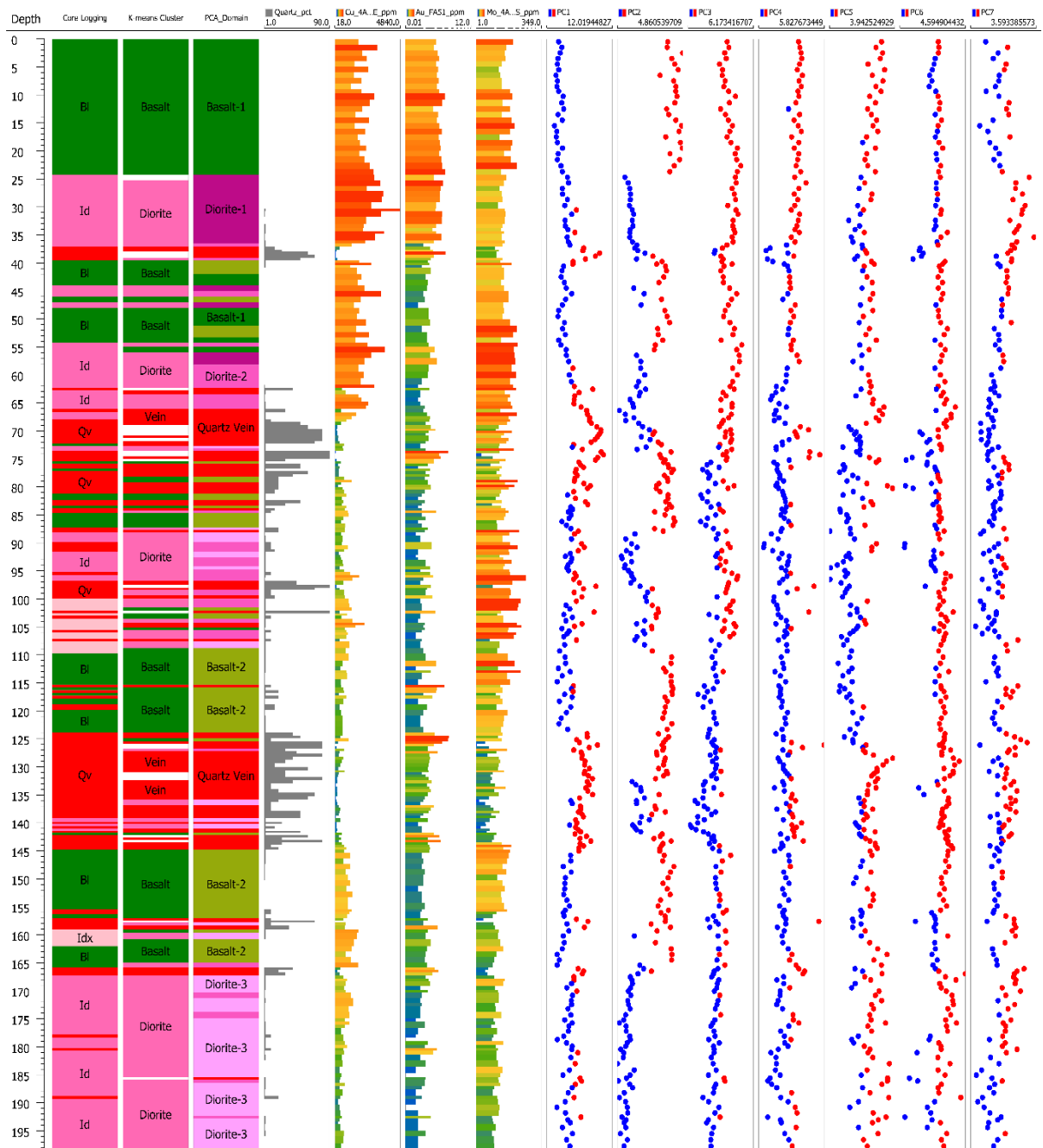
Gambar 18. Diagram pencar PC1-PC2 dengan atribut warna dari 6 domain.
a) Menggambarkan distribusi kadar tembaga. **b)** Menggambarkan distribusi kadar emas.



Keterangan:

Core logging		K-means Cluster		PCA_Domain		
Bl	Basalt	Basalt	Basalt	Basalt-1	Domain Basal-1	Diagram batang persentase kuarsa
Id	Intrusi diorit	Diorite	Diorite	Basalt-2	Domain Basal-2	Diagram batang kadar unsur (skala warna)
Qv	Urut kuarsa	Vein	Urut kuarsa	Diorite-1	Domain Diorit-1	Nilai komponen utama (PC) positif
Idx	Intrusi diorit breksia	None	Dibawah limit deteksi	Diorite-2	Domain Diorit-2	Nilai komponen utama (PC) negatif
				Diorite-3	Domain Diorit-3	
				Quartz Vein	Domain Urat Kuarsa	

Gambar 19. Grafik log untuk lubang bor TYD-D2 berisi data deskripsi batuan (*core logging*), klaster litogeokimia *K-means*, domain PCA, persentase kuarsa, kadar unsur Cu, Au, dan Mo, serta hasil transformasi data pada PC1 sampai PC7 yang dikelompokkan berdasarkan nilai positif dan negatif



Keterangan:

Core logging

Bi	Basalt
Id	Intrusi diorit
Qv	Urat kuarsa
Idx	Intrusi diorit breksia

K-means Cluster

Basalt	Basalt
Diorite	Diorite
Vein	Urat kuarsa
None	Dibawah limit deteksi

PCA_Domain

Basalt-1	Domain Basalt-1
Basalt-2	Domain Basalt-2
Diorite-1	Domain Diorit-1
Diorite-2	Domain Diorit-2
Diorite-3	Domain Diorit-3
Quartz Vein	Domain Urat Kuarsa

	Diagram batang persentase kuarsa
	Diagram batang kadar unsur (skala warna)
	Nilai komponen utama (PC) positif
	Nilai komponen utama (PC) negatif

Gambar 20. Grafik log untuk lubang bor TDD-D1 berisi data deskripsi batuan (*core logging*), klaster litogeokimia *K-means*, domain PCA, persentase kuarsa, kadar unsur Cu, Au, dan Mo, serta hasil transformasi data pada PC1 sampai PC7 yang dikelompokkan berdasarkan nilai positif dan negatif

KESIMPULAN

Karakterisasi mineralisasi tembaga-emas dengan metode *K-means* dan analisis komponen utama yang dilakukan dalam penelitian ini menghasilkan 6 domain geologi dan mineralisasi yang dapat dibedakan berdasarkan geokimia multi-unsurnya. Karakteristik geokimia pada domain yang termineralisasi dapat digunakan sebagai vektor atau unsur *pathfinder* pada kegiatan eksplorasi untuk menemukan potensi mineralisasi tembaga-emas di area lainnya. Diantara yang dapat digunakan sebagai acuan adalah sebagai berikut:

- Mineralisasi Cu-Au pada area penelitian memiliki karakteristik asosiasi unsur Mo-Cu-Re-Ge-Au dengan *hostrock* basal dan diorit yang berhubungan dengan sistem porfiri ditunjukkan pada domain Basal-1 dan Diorit-1.
- Mineralisasi Au-Ag memiliki karakteristik asosiasi unsur Ag-Sb-Te-Au-Tl-Bi-As-Pb-Se-In pada urat kuarsa yang berhubungan dengan tipe epitermal sulfida rendah ditunjukkan pada domain urat kuarsa.

K-means dan analisis komponen utama (PCA) merupakan 2 contoh dari sekian banyak metode statistik multivariat yang dapat digunakan untuk membantu mencari pola, kelompok atau asosiasi unsur geokimia yang dapat menggambarkan karakteristik geologi secara lebih kuantitatif dan objektif. Namun, harus diimbangi dengan pemahaman tentang konteks geologi pada area yang diteliti. Pengamatan lapangan juga harus dilakukan untuk membantu dalam penarikan kesimpulan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya atas dukungan dari Manajemen PT. Nusa Halmahera Minerals dalam penelitian ini, khususnya Bapak Denny

Lesmana sebagai *General Manager Geology Resources and Support*, Bapak Rendra Suryanatadipura sebagai *Mine Geology Manager*, serta Bapak Arif Supriyadi sebagai *Mine Geology Deputy Manager*, atas izin dan dukungannya selama proses pengambilan data hingga publikasi hasil penelitian ini. Terimakasih juga penulis sampaikan kepada rekan-rekan *Geologist* yang telah banyak membantu dalam diskusi yang konstruktif, terutama pada Syaiful Hilal, Giri Hartono, Bima Pribadi, Lodih Riasan Basari, Thomas Aquinas Ardhito Kristiono, dan Alfon Priambodo, serta seluruh *Geologist* di Gosowong yang tidak dapat disebutkan satu per satu. Proses pengolahan data geokimia dan visualisasinya dikerjakan dengan menggunakan *software* ioGAS™ berlisensi akademik atas nama penulis, serta *software* Leapfrog Geo dengan lisensi "MGEI-Competition License-December 2023" dari Seequent.

DAFTAR PUSTAKA

- Andrina, D. R., 2013. *Characteristics of Porphyry Deposit in Toguraci and Tobobo Area, North Halmahera District, North Maluku Province, Indonesia*. A thesis submitted for the degree of Bachelor of Geology at The University of Padjadjaran in May 2013. Unpublished.
- Applied Petrological Services. 2001. *Petrological Studies of Diamond Core and Surface Samples from The Toguraci and Tobobo Projects, Gosowong Epitermal Gold Project Area, Halmahera*. PT. Nusa Halmahera Minerals. APS report 214, Project No. 3088.
- Applied Petrological Services. 2001. *Petrological Studies of Diamond Core and from The Midas and Damar Projects, Toguraci, Halmahera: Gold Paragenesis and Distribution Studies*. PT. Nusa Halmahera Minerals. APS report 223, Project No. 03090.

- Applied Petrological Services. 2004. *Petrological Studies of Diamond Drill Core from The Toguraci Gold Prospect, Halmahera, Indonesia*. PT. Nusa Halmahera Minerals. APS report 271, Project No. 03093.
- Applied Petrological Services. 2005. *Petrological Studies of Diamond Core from KMD012 of The Kayu Mati Prospect Area*. PT. Nusa Halmahera Minerals. APS report 294, Project No. 03094.
- Carlile, J.C., Davey, G.R., Kadir, I., Langmead, R.P., and Rafferty, W.J., 1998. *Discovery and exploration of the Gosowong epithermal gold deposit, Halmahera, Indonesia*. Journal of Geochemical Exploration, 60, h. 207 - 227.
- Dempster, M., Dunlop, P., Scheib, A., and Cooper, M., 2013. Principal component analysis of the geochemistry of soil developed on till in Northern Ireland. Journal of Maps, 9:3, 373-389.
- Goldschmidt, V.M., 1954. *Geochemistry*. Oxford University Press, Oxford, England, p. 730.
- Halley, S., 2020. *Mapping magmatic and hydrothermal processes from routine exploration geochemical analyses*. Economic Geology, 115(3), pp.489-503.
- Hotelling, H., 1933. *Analysis of a complex of statistical variables into principal components*. Journal of Educational Psychology, 24, 417-441.
- Isfan., Harsono, A., Haris, A., 2021. *Cluster Analysis of Lithology Grouping Trends using Principal Component Spectral Analysis and Complex Seismic Attributes*. Makara Journal of Science. Vol.25.
- Olberg, D.J., Rayner, J., Langmead R.P., and Coote, J.A.R., 1999. *Geology of the Gosowong epithermal gold deposit, Halmahera, Indonesia, East Indonesia*: Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series 4/1999, p. 179-186.
- Pearson, K., 1901. *On lines and planes of closest fit to systems of points in space*. Philosophical Magazine 2, 11, 559-572.
- PT. Nusa Halmahera Mineral. 2013. *Peta Geologi Area Gosowong*. Tidak dipublikasikan.
- PT. Nusa Halmahera Mineral. 2013. *Skematik Stratigrafi Area Gosowong*. Tidak dipublikasikan.
- Richards, T.H., and Basuki Dwi Priyono, M.D., 2004. *Discovery of the Toguraci Epithermal Au-Ag Deposits, Gosowong Goldfield, Halmahera Island, East Indonesia*. Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series 5/2004, p. 359-366.
- Rollinson, H.R., 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman Group UK Limited, 352p.
- Sulistiyawan, R.I.H., 2009. *Studi Karakteristik Mineralisasi Sulfida di Gosowong Halmahera*. Tesis Magister. Program Studi Magister Rekayasa Pertambangan. Institut Teknologi Bandung. Tidak dipublikasikan.

Diterima : 19 Februari 2024
Direvisi : 13 Mei 2024
Disetujui : 19 Agustus 2024