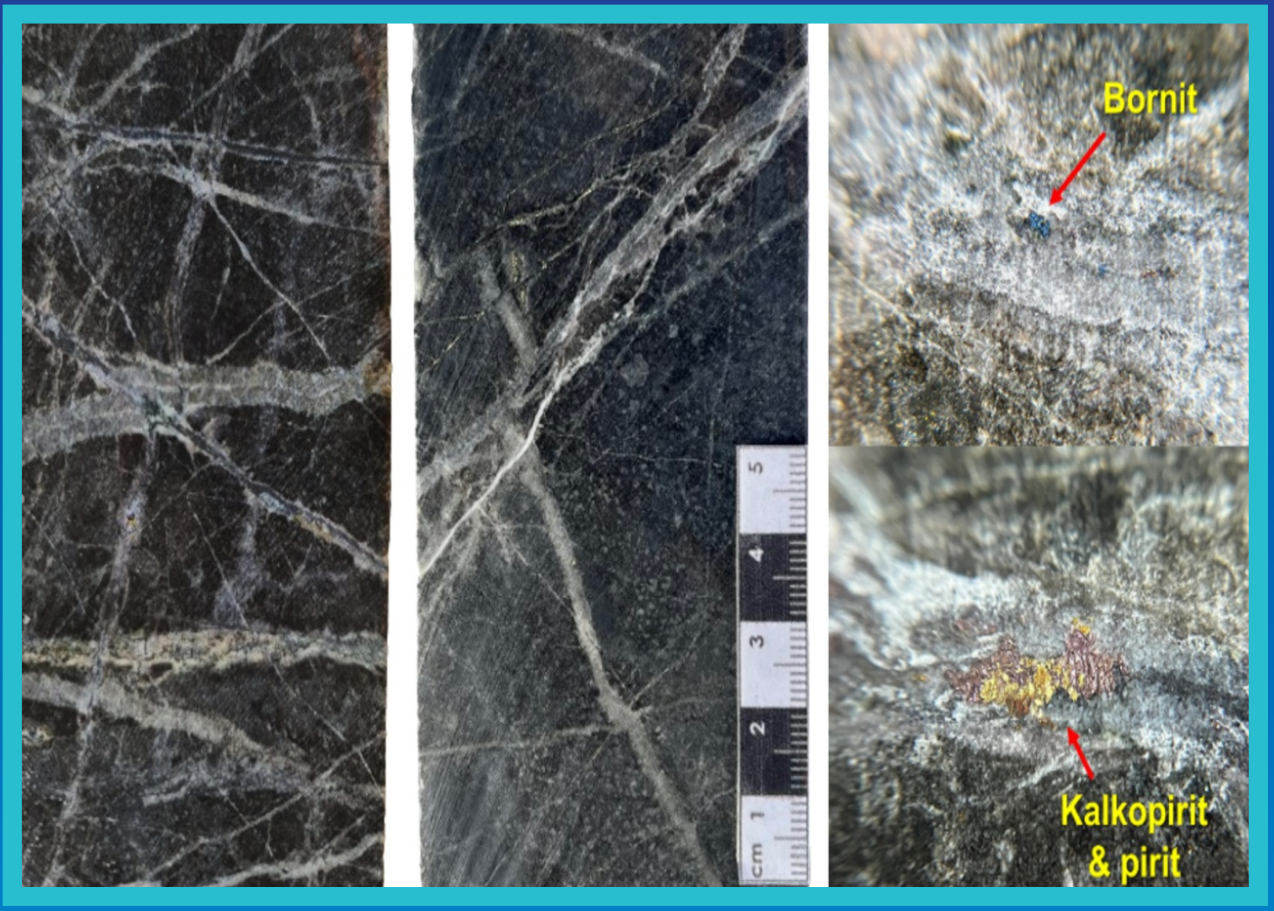
ISSN 1907-5367
eISSN 2580-1023

buletin
SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 19 No. 2, Agustus 2024



Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral
Badan Geologi
Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi

Buletin Sumber Daya Geologi	Vol. 19	No. 2	Halaman 71 - 146	Bandung Agustus 2024	Terakreditasi Kemenristekdikti sebagai Jurnal Ilmiah Nomor : 200/M/KPT/2020

KETERANGAN SAMPUL DEPAN

Basal-1 dengan intensitas *stockwork* porfiri tinggi, yang membawa mineral kalkopirit, pirit, dan bornit (Dharma Irwanda, dkk., 2024)

ISSN 1907-5367
eISSN 2580-1023

buletin
SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 19 Nomor 2, Agustus 2024

Terakreditasi Kemenristekdikti sebagai Jurnal Ilmiah Nomor : 200/M/KPT/2020

Buletin Sumber Daya Geologi merupakan jurnal ilmiah terakreditasi Kemenristekdikti bidang mineral, energi fosil, dan panas bumi yang berkaitan dengan kajian sumber daya. Majalah ini terbit tiga nomor dalam satu tahun pada bulan Mei, Agustus dan November.

DEWAN REDAKSI

Editor In Chief
Ir. Denni Widhiyatna, M.T.

Managing Editor
Eko Suryanto, S.Kom.
Resmi Novianti, S.Kom.
Ernawati, S.I.Pust.
Candra, S.T.
Riad Bakti Padilah, S.AP.
Bonny Wanda Nugraha, S.Kom
Atep Kurnia, S.S.

Editorial Board
Fitri Purnamasari Liveta, S.A.P.
Qomariah, S.Kom., M.T.
Ir. Herry Rodiana Eddy, M.Si.
Ir. Prima Muharam Hilman, M.Sc.
Ir. Dwi Nugroho Sunuhadi
Ir. Sri Widodo
Ir. Teuku Ishlah
Ir. Bambang Pardiarto
Dr. Siti Sumilah Rita Susilawati, S.T., M.Sc.
Ir. Rina Wahyuningsih
Fatimah, S.T., M.Sc.
Asep Sugianto, S.T., M.T.
Irwan Muksin, S.T.
Husin Setia Nugraha S.T., M.Sc.

Peer-Reviewer
Prof. Dr.Ir. Binarko Santoso, M.Sc
Prof. Ir. Mega Fatimah Rosana, M.Sc, Ph.D
Prof. Euis Tintin Yuningsih, S.T., M.T., Ph.D
Dr. Ir. Rukmana Nugraha Adhi, DEA
Dr. Ir. Dicky Muslim, M.Sc.
Dr. Eng. Agus Didit Haryanto, Ir., M.T.
Ir. Sabtanto Joko Suprapto, M.T.
Edi Suhanto, S.Si, M.T.
Dr. Asep Kurnia Permana, S.T., M.Sc
Dr. rer. nat. Ernowo, S.T., M.T.

Alamat sekretariat dan pengiriman naskah
Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi
Bagian Umum
Jl. Soekarno Hatta No. 444 Bandung 40254
Telepon : (022) 520 2698, 522 6270
Fax : (022) 522 6270, 522 6263
Email : buletinpsdg@gmail.com
OJS : https://buletinsdg.geologi.esdm.go.id

PENGANTAR REDAKSI

Buletin Sumber Daya Geologi Volume.19 Nomor 2 Tahun 2024 ini berisi lima makalah ilmiah yang mengulas tentang komoditas mineral dan panas bumi. Para penulis yang berkontribusi berasal dari Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Pusat Riset Sumber Daya Geologi – Badan Riset dan Inovasi Nasional, Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung, Universitas Padjadjaran, Universitas Gadjah Mada, Universitas Diponegoro, PT. Nusa Halmahera Minerals dan PT. Aneka Tambang, Tbk.

Artikel pertama berupa kajian tentang karakterisasi mineralisasi emas dan tembaga menggunakan metode geokimia dari sampel inti bor sehingga diperoleh klaster litogeokima yang dapat digunakan sebagai acuan kegiatan eksplorasi selanjutnya. Artikel kedua berupa estimasi sumber daya bauksit menggunakan metode geostatistik *ordinary kriging* yang berguna untuk menentukan target produksi, *design pit* tambang dan keputusan dalam investasi.

Artikel ketiga berupa kajian perangkingan 20 area prospek panas bumi kandidat Lokasi program *government drilling* di Indonesia dengan menggunakan metode *incremental internal rate of return* (IRR) hasil perhitungan *discounted cash flow* (DCF) sehingga diperoleh nominasi area prospeknya. Artikel selanjutnya berupa ulasan tentang kondisi geologi, mineralogi dan geokimia endapan bauksit, sehingga diketahui sebaran batuan, komposisi mineral dan kadar unsur pembentuknya serta korelasi beberapa unsur di area prospek tersebut.

Sedangkan artikel terakhir berupa kajian potensi litium pada batuan filit yang tersingkap di Kompleks Luk Ulo, Karangsambung, Provinsi Jawa Tengah. Kajian ini diharapkan dapat memberikan informasi keterdapatan potensi litium di Indonesia sebagai salah satu upaya alternatif potensi untuk mendukung program produksi baterai Litium-ion di Indonesia.

Kami mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi dan manajemen yang telah memfasilitasi pengelolaan Buletin Sumber Daya Geologi hingga saat ini. Selain itu, ucapan terima kasih disampaikan kepada para dewan redaktur, editor, mitra bestari, sekretariat, penulis dan kontributor foto serta sekretariat atas kontribusinya sehingga Buletin Sumber Daya Geologi selalu hadir untuk para pembaca dengan menyajikan makalah-makalah ilmiah yang berkualitas.

Salam sehat dan tetap semangat,

Dewan Redaksi

ISSN 1907-5367
eISSN 2580-1023

buletin
SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 19 Nomor 2, Agustus 2024

DAFTAR ISI

MAKALAH ILMIAH

71 - 92 **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, Mega F. Rosana, Johanes Hutabarat

93 - 104 **ESTIMASI SUMBER DAYA BAUKSIT MENGGUNAKAN METODE ORDINARY KRIGING DI KECAMATAN MELIAU, KALIMANTAN BARAT**
ESTIMATION OF BAUXITE RESOURCES BASED ON ORDINARY KRIGING METHODS AT KECAMATAN MELIAU, WEST KALIMANTAN
Westia Alifah Surya Pratiwi, Denny Lumban Raja, Priatna, Sarah Mutia, Dedi Sunjaya

105 - 120 **EVALUASI KELAYAKAN PROYEK DAN PERANKINGAN AREA PROSPEK PANAS BUMI KANDIDAT LOKASI PROGRAM GOVERNMENT DRILLING**
EVALUATION OF FEASIBILITY AND RANKING OF GEOTHERMAL PROSPECT AREA CANDIDATES FOR GOVERNMENT DRILLING PROGRAM LOCATIONS
Husin Setia Nugraha, Dadan Wildan, Rina Wahyuningsih

121 - 130 **GEOLOGI, MINERALOGI, DAN GEOKIMIA ENDAPAN BAUKSIT LATERIT DI DESA MUKTI JAYA, KABUPATEN SANGGAU, KALIMANTAN BARAT**
GEOLOGY, MINERALOGICAL, AND GEOCHEMICAL LATERITE BAUXITE DEPOSITS IN MUKTI JAYA VILLAGE, SANGGAU DISTRICT, WEST KALIMANTAN
Aisha Permatasari, Sabtanto Joko Suprapto, Priatna, Tatik Handayani, Dedi Sunjaya

131 - 146 **IDENTIFIKASI KANDUNGAN LITIUM PADA BATUAN FILIT KOMPLEKS LUK ULO, JAWA TENGAH**
LITHIUM IDENTIFICATION ON PHYLLITE FROM THE LUK ULO COMPLEX, CENTRAL JAVA
Isyqi, Nugroho Imam Setiawan, Ferian Anggara

ABSTRAK MAKALAH
Oleh : Redaksi

GALERI FOTO
Oleh : Eko Suryanto, S.Kom

PEDOMAN PENULISAN KARYA ILMIAH
Oleh : Redaksi

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. Rosana[1], Johanes Hutabarat[1]
[1]Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, Jatinangor, Sumedang, 45363
[2]PT. 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 klaster 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 klaster 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 lithogeochemical 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 komplek 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, Langsat dan beberapa area lainnya (Olberg *et al*, 1999).

Peneliti terdahulu menjelaskan tentang adanya dua tipe mineralsisasi 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 klaster *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 klaster 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 klaster 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 klaster 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 klaster 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.

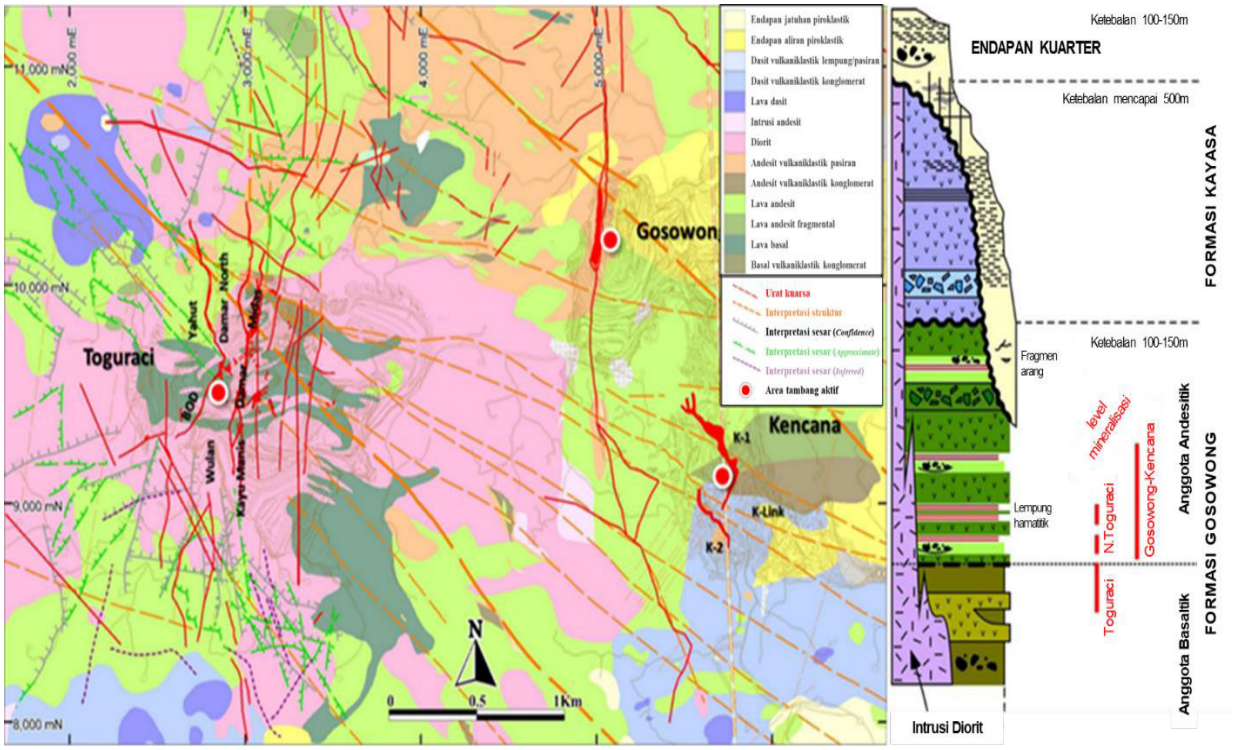
Langkah pengerjaan mulai dari preparasi data, transformasi data dengan *centred log ratio* (CLR), *correlation matrix*, *eigen-vectors*, *eigenvalues*, hingga perhitungan nilai komponen utama dan diagram-diagram visualisasi yang digunakan untuk mendapatkan kesimpulan dilakukan dengan bantuan *software*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

Urat-urat 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 elektrum (AuAg) dan petzit yang memiliki rumus kimia Ag_3AuTe_2 (Sulistyawan, 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 terubah.

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 menghidari 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.

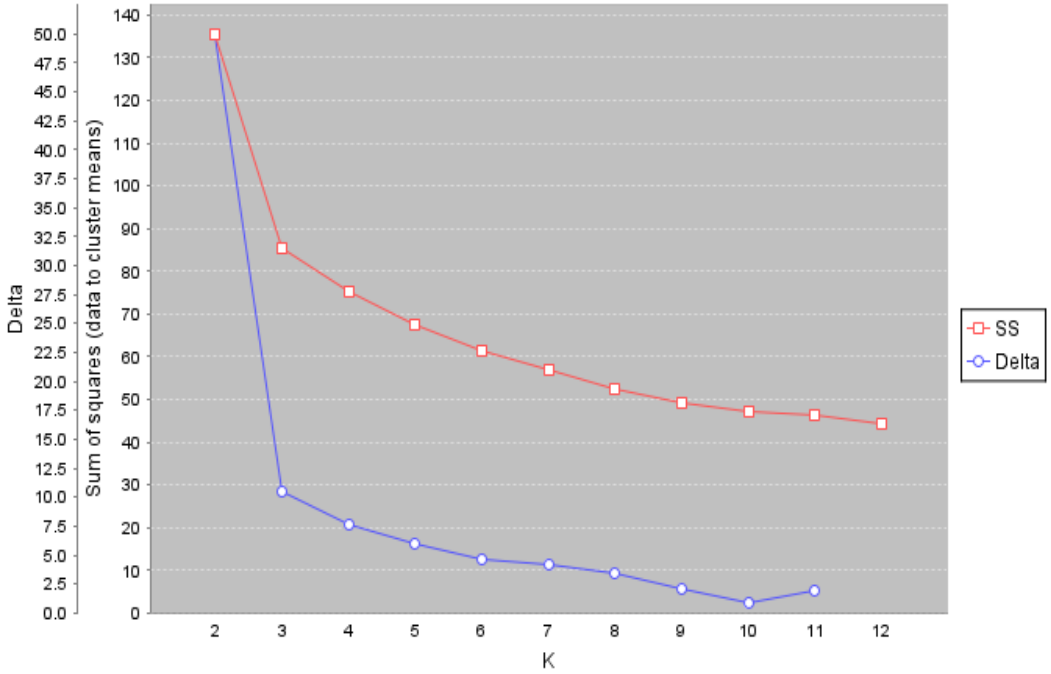
Hasil pengelompokkan data dalam 3 klaster dengan *K-means* ini kemudian di plot pada diagram pencar (*scatter plot*) berdasarkan rujukan dari Halley (2020), yaitu Sc terhadap Nb, P, Th, Ti, V, dan Zr (Gambar 3). Sebaran kadar *scandium* dari tinggi ke rendah menggambarkan perubahan dari batuan tinggi 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.

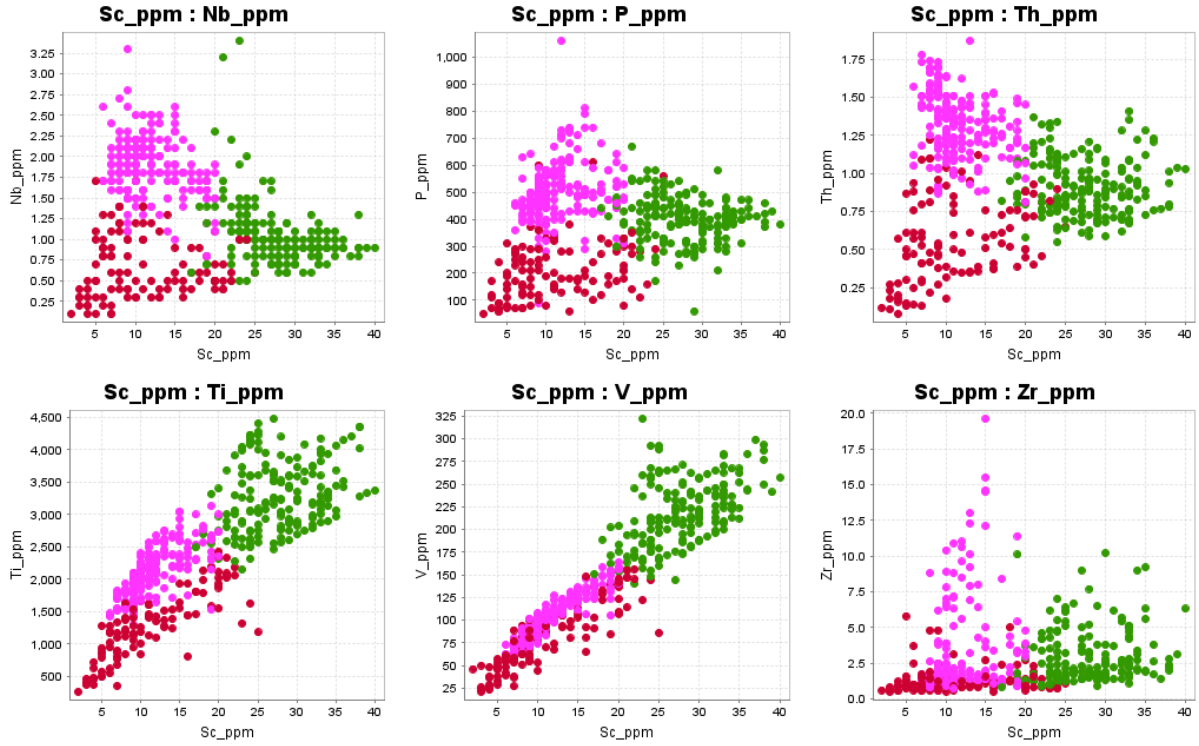
Karakteristik klaster basal digambarkan dengan asosiasi unsur *immobile* Co, Sc, V, Ti, Y, dan Ni dengan kadar rata-rata yang lebih tinggi dari klaster lainnya (Tabel 2). Klaster diorit mempertlihatkan asosiasi unsur Nb, Th, dan P dengan kadar rata-rata lebih tinggi dari klaster lainnya (Tabel 3). Unsur Al dan Zr menunjukkan nilai rata-rata yang relatif sama pada kedua klaster ini. Sedangkan klaster ketiga yang secara megaskopis didominsai oleh urat kuarsa (*vein*) menunjukkan kadar Cr yang paling tinggi diantara klaster 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*

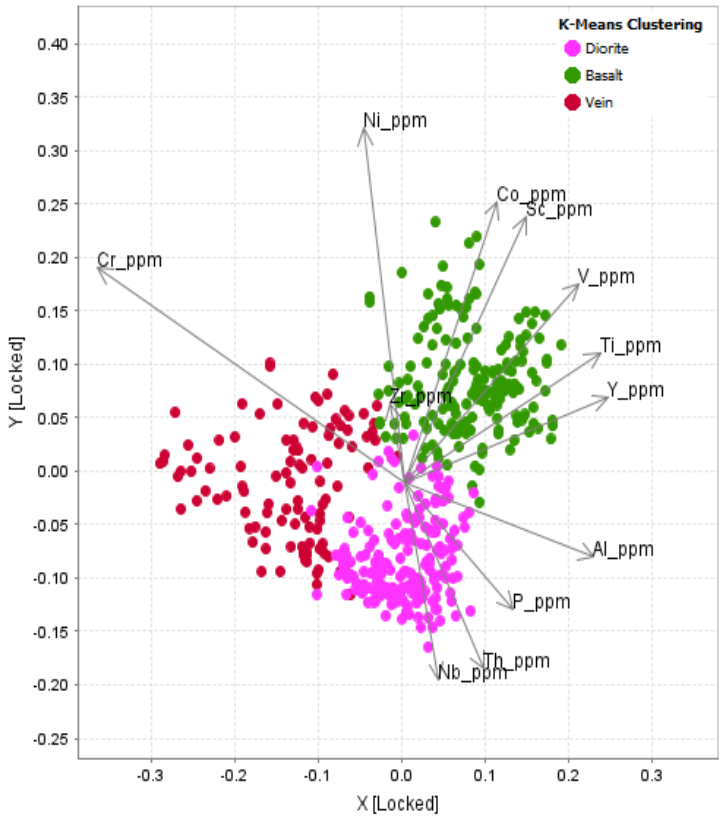
	Al	Co	Cr	Hf	Nb	Ni	P	Sc	Ta	Th	Ti	V	Y	Zr
Metode assay	4Acid/ ICP-OES	4Acid/ ICP-MS	4Acid/ ICP-OES	4Acid/ ICP-MS	4Acid/ ICP-MS	4Acid/ ICP-OES	4Acid/ ICP-OES	4Acid/ ICP-OES	4Acid/ ICP-MS	4Acid/ ICP-MS	4Acid/ ICP-OES	4Acid/ ICP-OES	4Acid/ ICP-MS	4Acid/ ICP-MS
Limit deteksi (g/t)	50	1	5	0.1	0.1	1	50	1	0.05	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/t)	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/t)	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/t)	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%	0.2%	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 klaster (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 klaster (Sumber istilah dan definisi dari *software* ioGAS™)



Gambar 3. Diagram pencar Sc / Nb, P, Th, Ti, V, dan Zr. Klaster 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

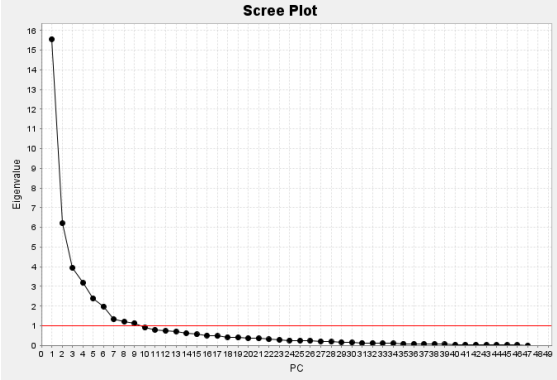
Tabel 3. Statistik deskriptif kadar unsur-unsur *immobile* pada klaster diorit

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

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).

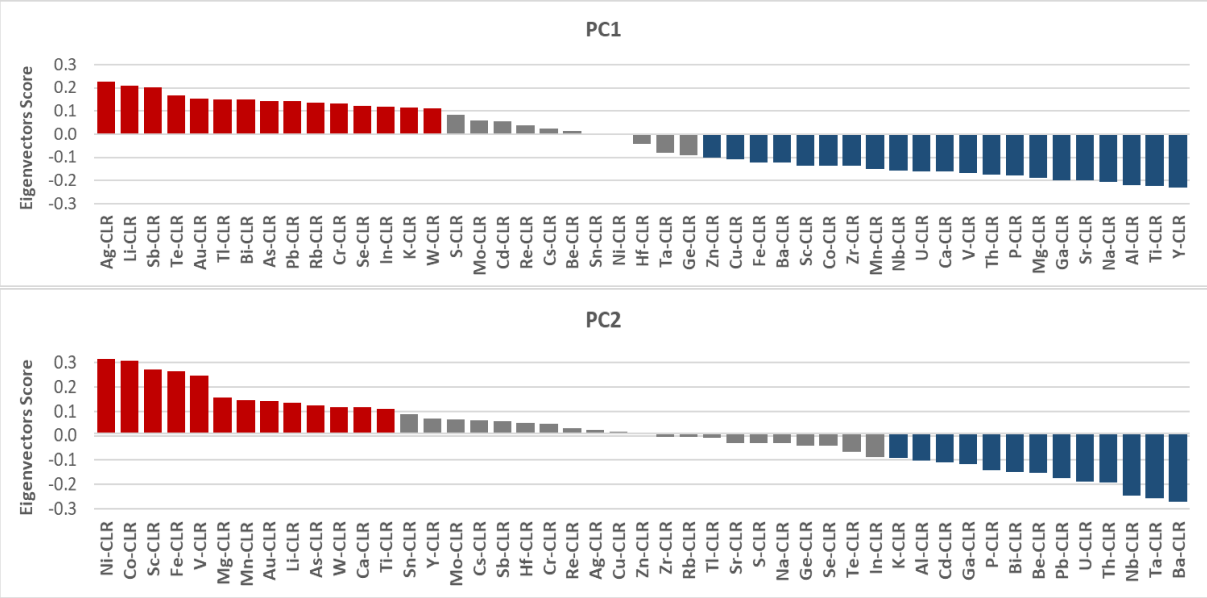
PC2; dengan *eigenvalue* 6,21 mewakili 13,21% *variance* data menunjukkan korelasi unsur Ni-Co-Sc-Fe-V-Mg-Mn-Au-Li-As-W-Ca-Ti pada skor tinggi (>0,1), sedangkan pada skor rendah (<-0,1) didominasi oleh unsur Ba-Ta-Nb-Th-U-Pb-Be-Bi-P-Ga-Cd-Al-K (Gambar 6).

Tabel 5. Nilai *eigenvalues* untuk semua komponen utama

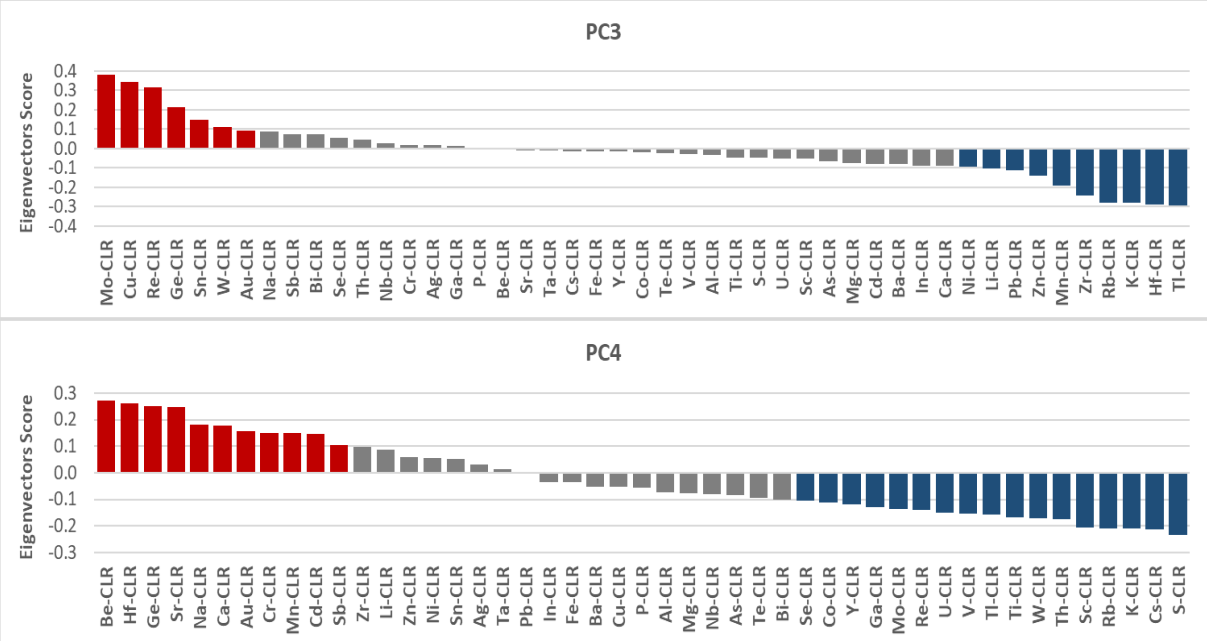
PC	*Eigenvalues*	Persentase	Kumulatif (%)
PC1	15,57	33,12	33,12
PC2	6,21	13,21	46,32
PC3	3,95	8,40	54,72
PC4	3,18	6,76	61,48
PC5	2,39	5,08	66,56
PC6	1,99	4,23	70,79
PC7	**1,33**	**2,83**	**73,62**
PC8	1,21	2,58	76,19
PC9	1,14	2,43	78,63
PC10	0,90	1,92	80,55
PC11	0,79	1,69	82,23
PC12	0,74	1,57	83,80
PC13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

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 Tl-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

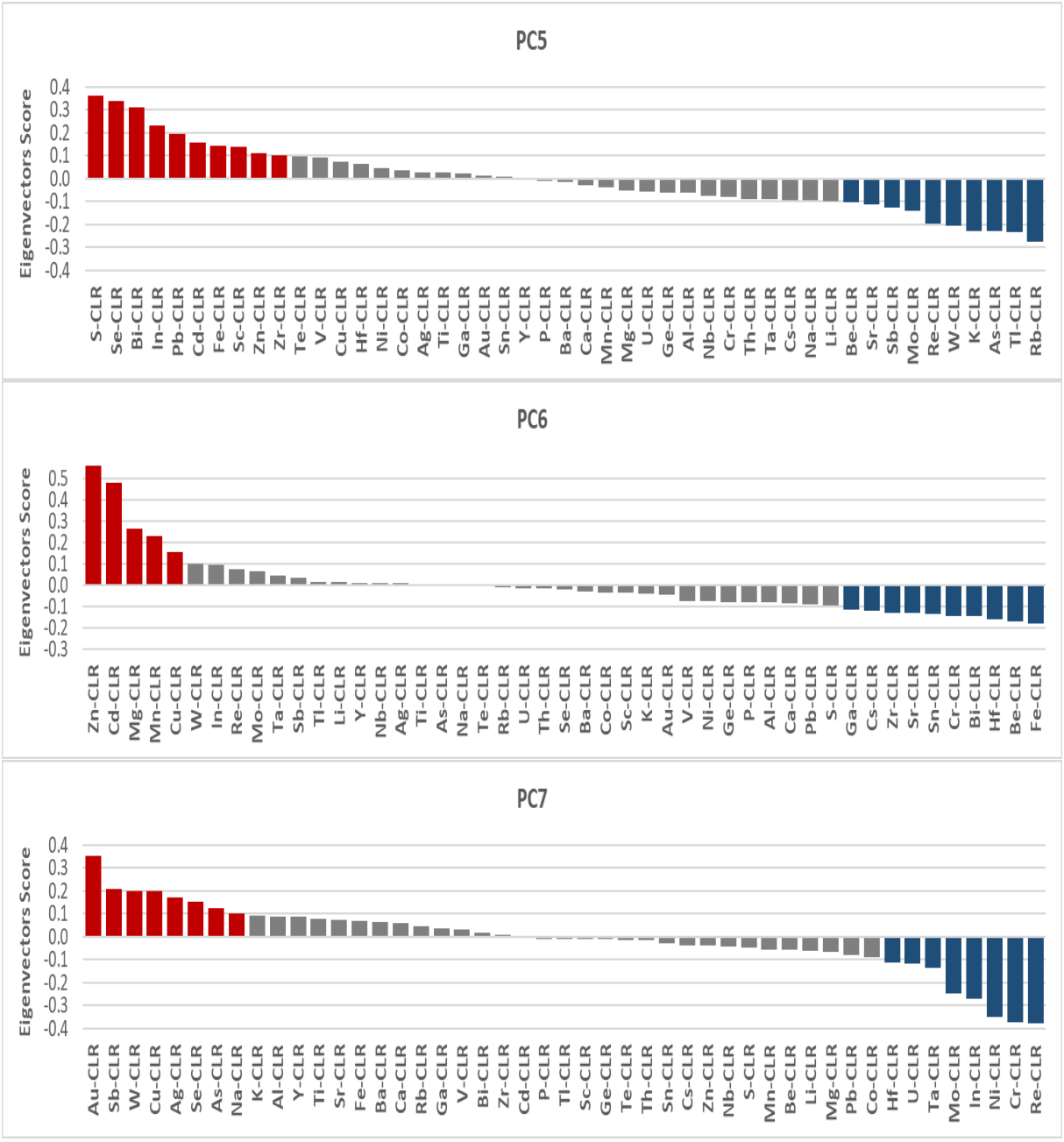


Gambar 7. *Eigenvector plot* untuk unsur-unsur dalam PC3 dan PC4, skor tinggi dominan >0,1 (merah) dan skor rendah dominan <-0,1 (biru).

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

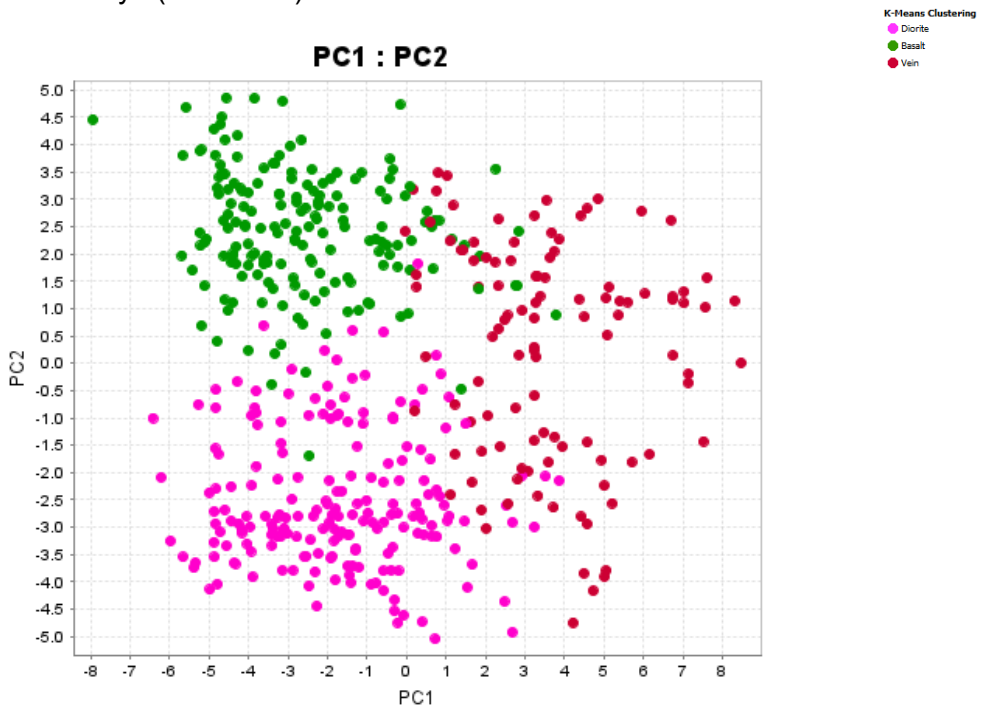
Karakteristik klaster litogeokimia hasil analisis *K-means* menujukkan konsistensi jika dibandingkan dengan hasil analisis komponen utama dan hasil deskripsi megaskopis. Karakteristik litogeokimia ini sekaligus menjadi komponen utama dengan nilai *eigenvalue* paling tinggi. Kombinasi PC1 dan PC2 secara 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.

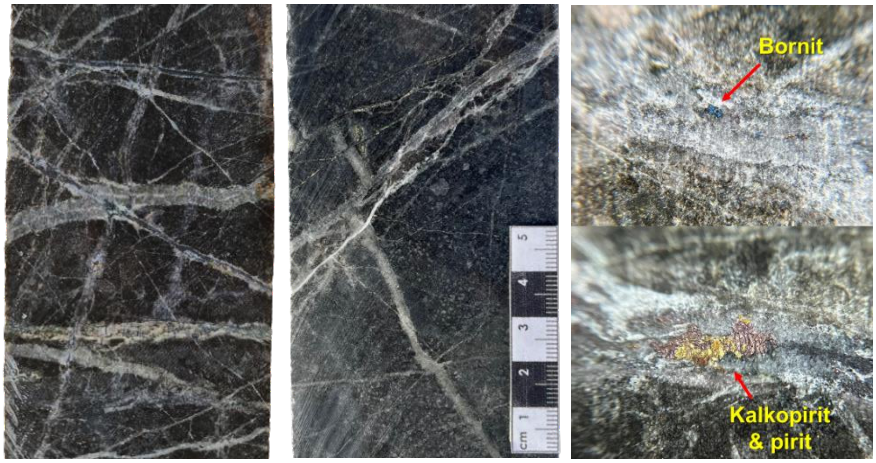
Domain Basal-1

Basal tipe pertama ini, secara megaskopis mempunyai karakteristik berwarna gelap, tekstur afanitik, dengan sedikit fenokris mineral mafik berukuran halus. Ubahan potasik, batuan terubah 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.

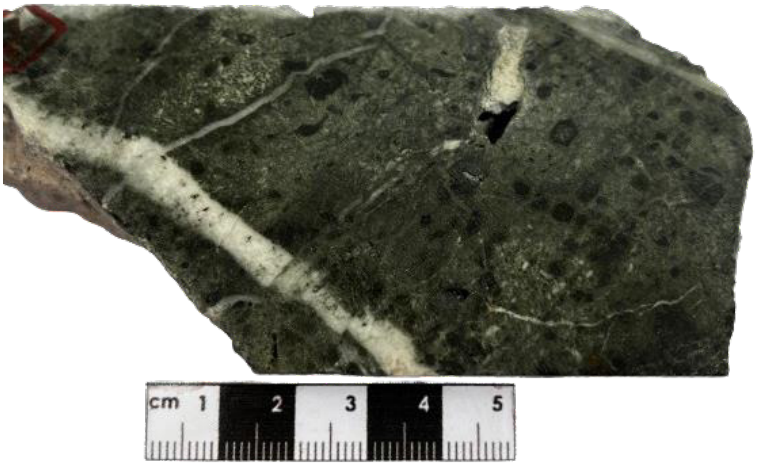
Domain Basal-2

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

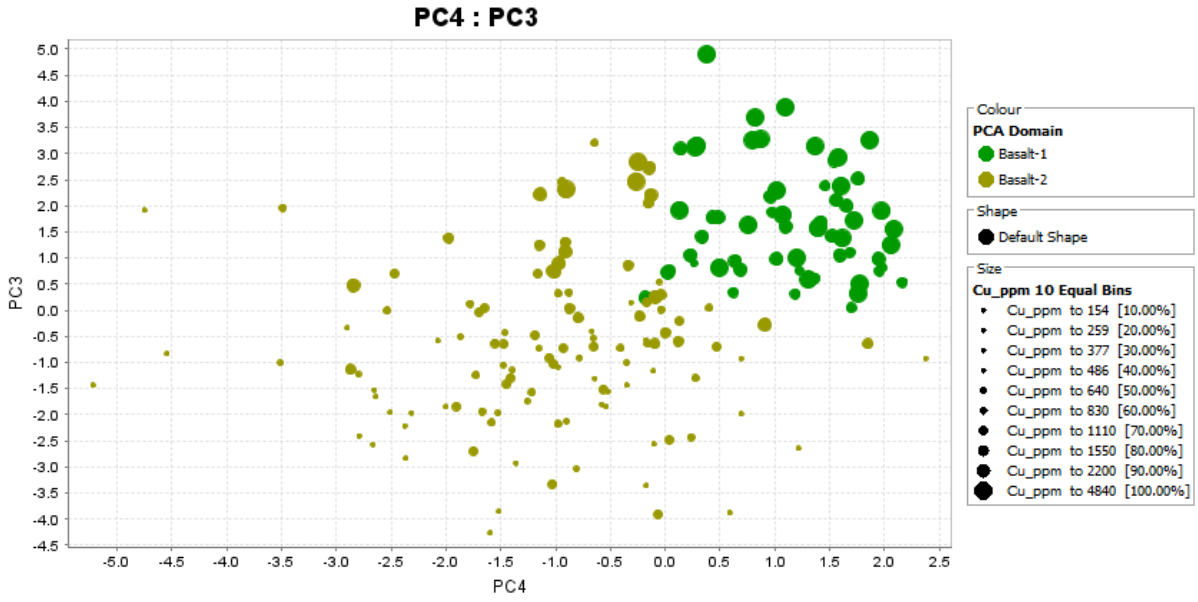
Berasosiasi dengan mineralisasi porfiri berbentuk *stockwork* dengan intensitas rendah, <10 *vein* per meter. Ketebalan 1-15 mm, dengan dominasi *B-type vein* dengan pirit dan kalkopirit *centre line*. Secara setempat terdapat *veinlet* magnetit, pirit, dan juga kalkopirit. Domain ini tidak menunjukkan 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

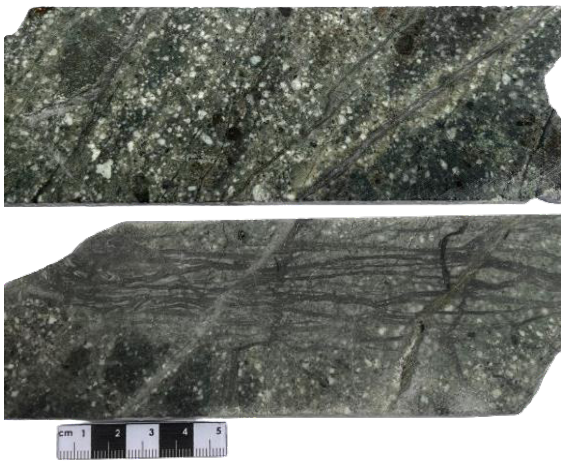
Domain Diorit-1
Diorit bertekstur porfiritik, dengan fenokris berukuran halus <2 mm, terdiri dari 65% plagioklas, 5% hornblenda, dan kuarsa 10% di dalam masa dasar. Pada area kontak dengan basal menunjukkan tekstur lebih halus (afanitik). Secara setempat terdapat fragmen kuarsa porfiri *vein* dan batuan 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 karakterstik kadar Mo yang lebih tinggi dan lebih dominan daripada Cu maupun Au.

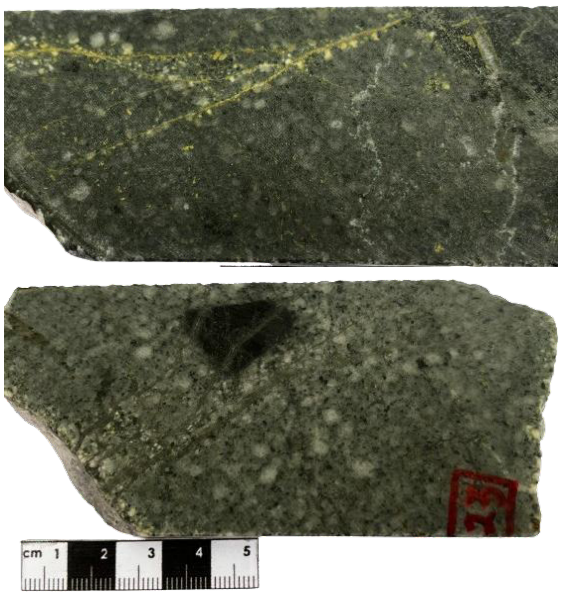


Gambar 15. Diorit-2 dengan ubahan klorit, dan *stockwork* porfiri dengan ubahan serisit sebagai halo.

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.



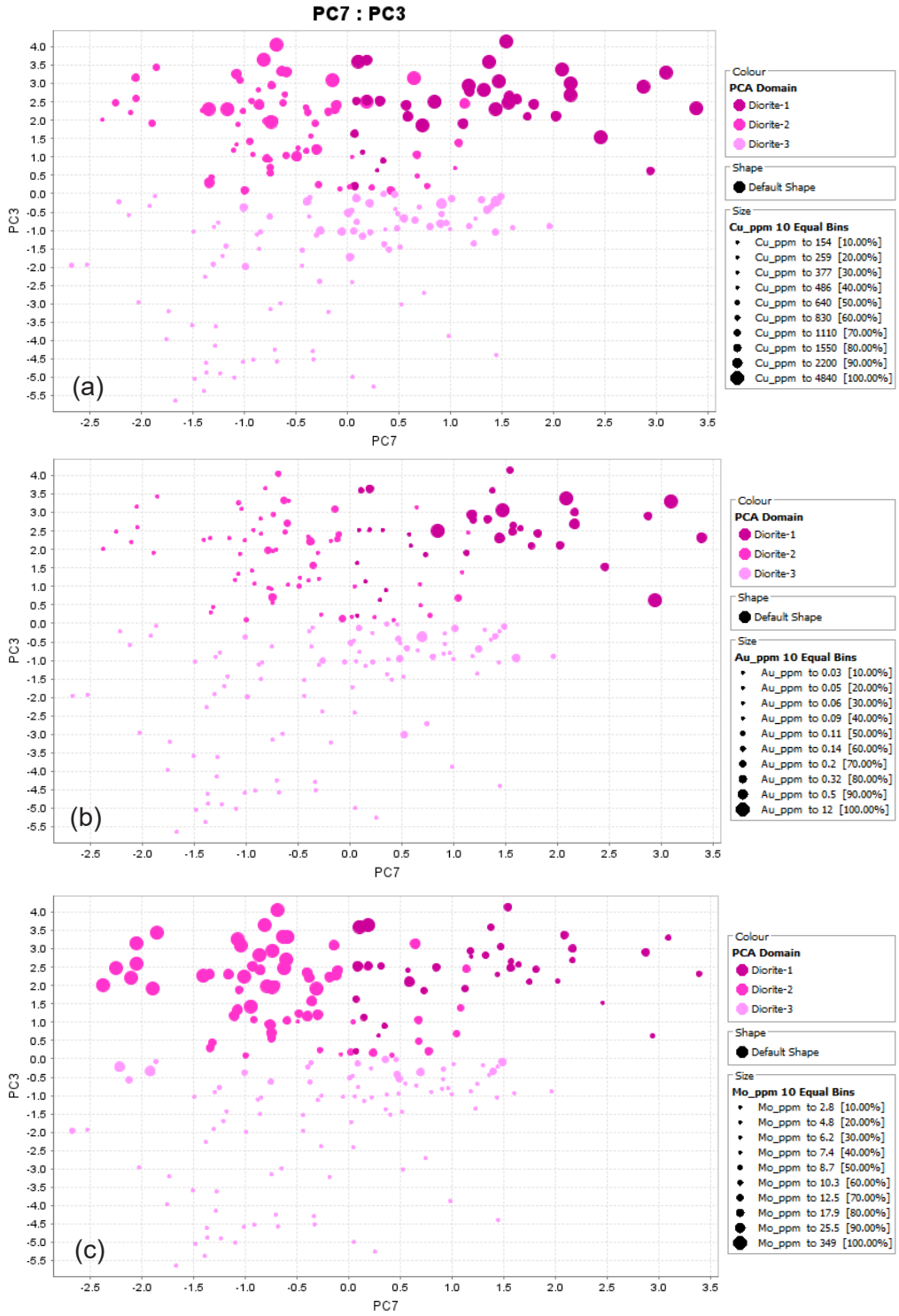
Gambar 16. Diorit-3 dengan ubahan klorit-epidot, dan fragmen basal yang membawa mineral sulfida

Domain ini diinterpretasikan sebagai batuan yang paling muda, jika dilihat dari adanya fragmen basal maupun diorit di dalamnya. Paling sedikit termineralisai, 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.

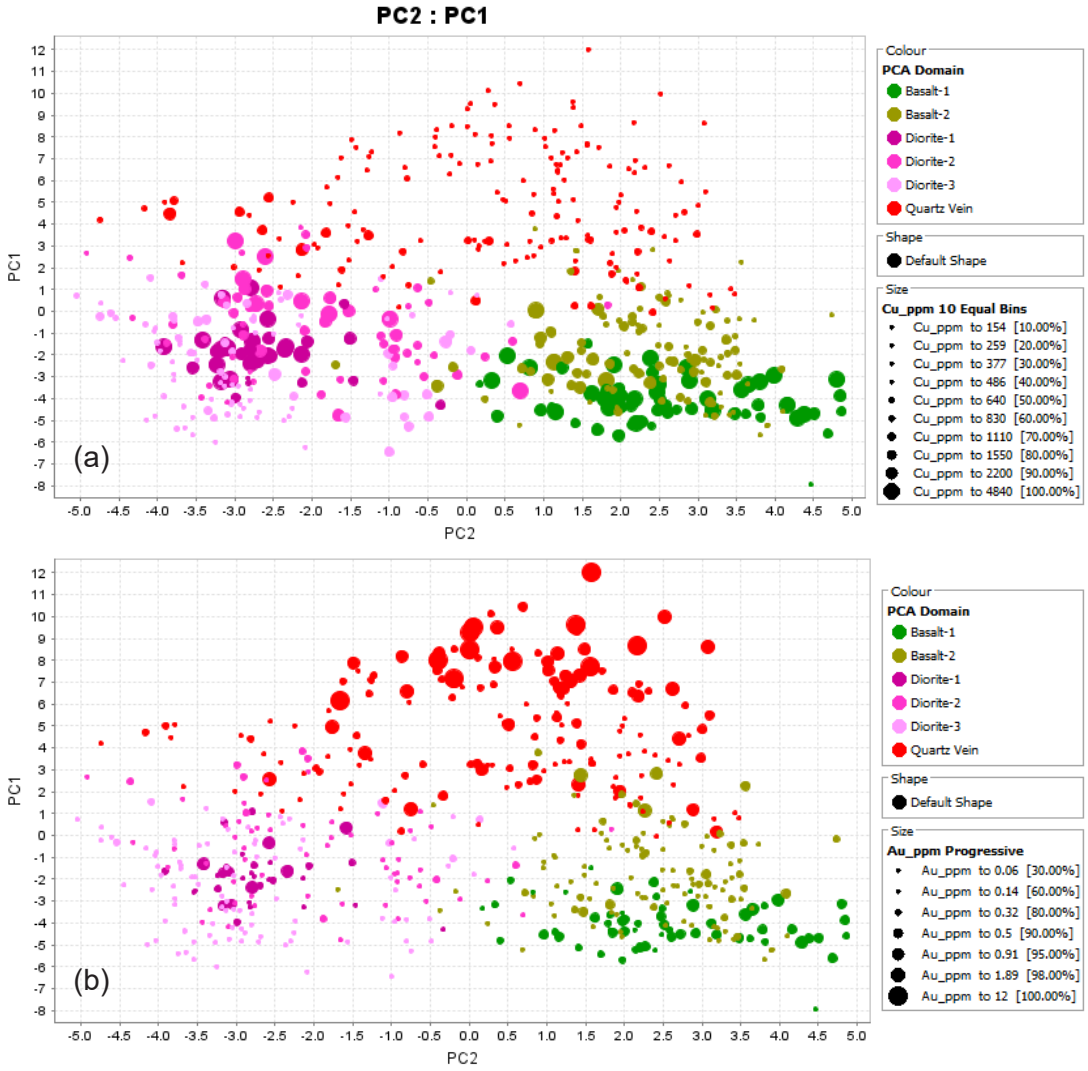
Komponen utama yang membedakan ketiga domain diorit ini adalah PC3 dan PC7 yang juga berhubungan dengan distribusi kadar Cu, Au, dan Mo pada tiap domain, seperti yang ditunjukkan pada diagram pencar Gambar 17. Diorit-1 dan Diorit-2 memiliki rata-rata kadar Cu yang lebih tinggi dari pada Diorit-3, namun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

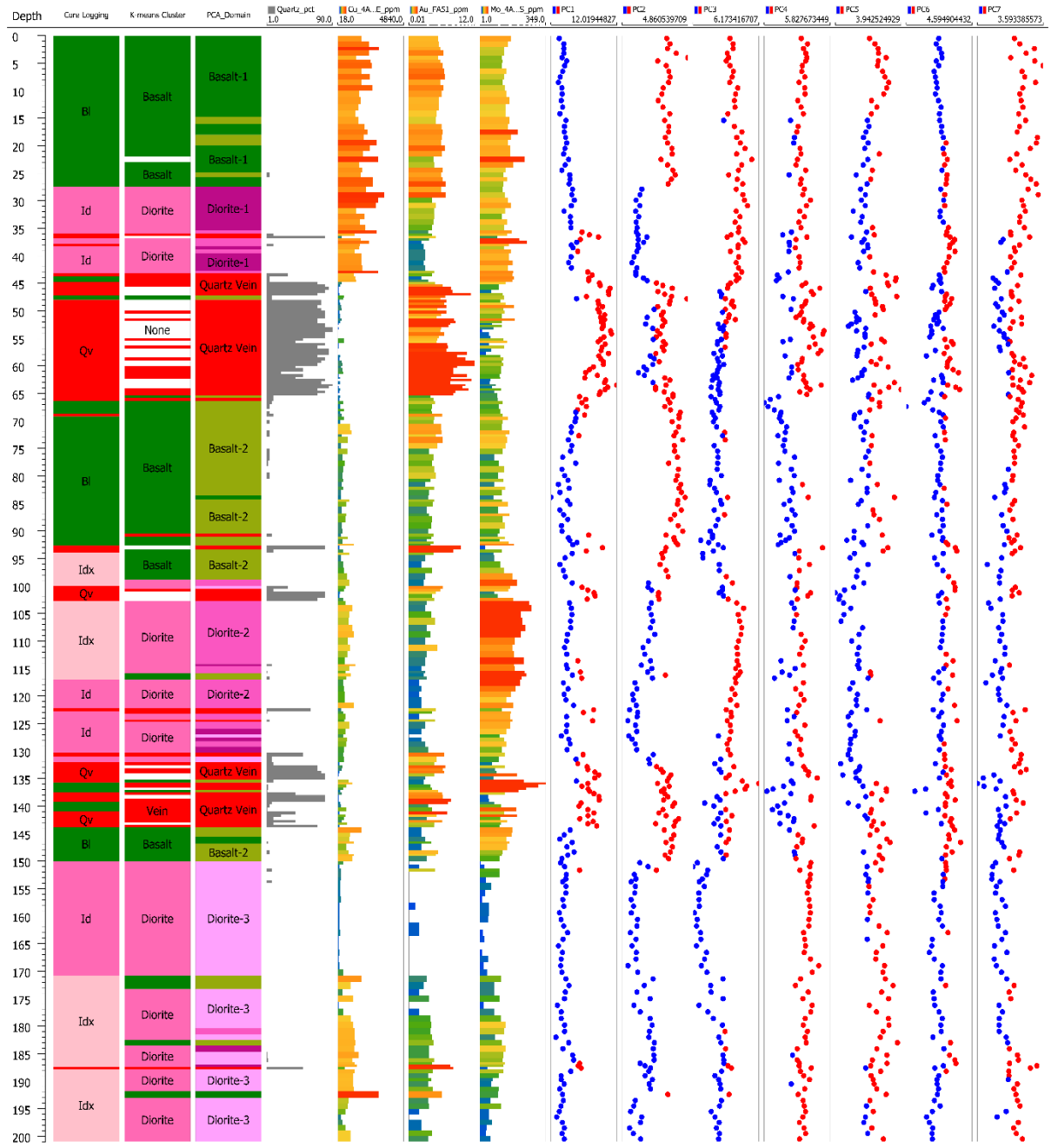
Selain melihat data geokimia, karakteristik fisik atau megaskopis seperti jenis dan tekstur batuan, mineral ubahan, intensitas dan tipe urat, serta tekstur kuarsa juga penting untuk dipahami, karena menjadi hal pertama yang akan diidentifikasi saat deskripsi *core* sebelum kita mengetahui hasil *assay* nya dari laboratorium.



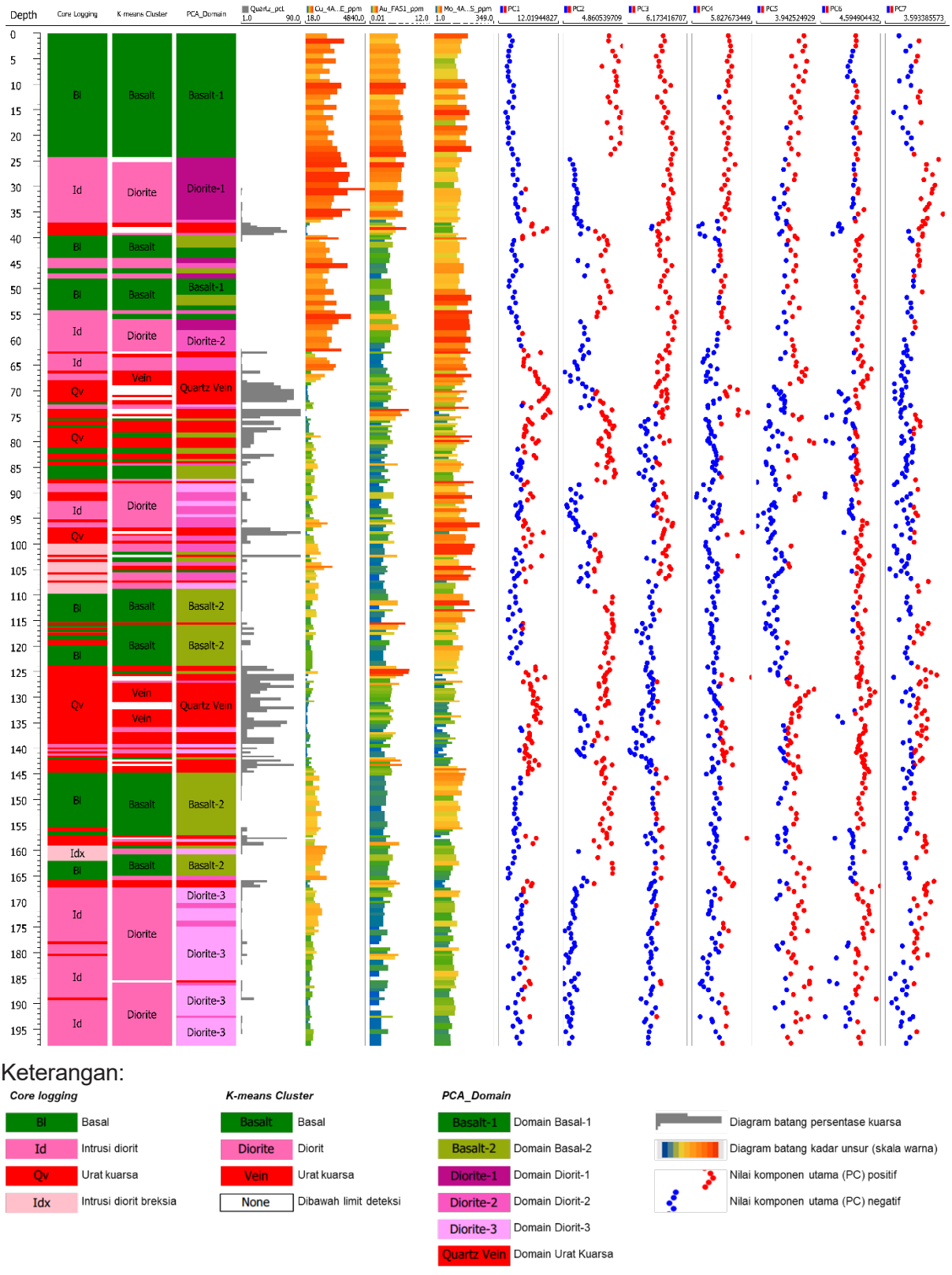
Gambar 17. Diagram pencar PC3 dan PC7 dengan atribut warna dari domain Diorit-1, Diorit-2 dan Diorit-3. **a)** Ukuran titik data dibuat mengikuti skala kadar Cu. **b)** Ukuran titik data dibuat mengikuti skala kadar Au. **c)** Ukuran titik data dibuat mengikuti skala kadar Mo.



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



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



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 epitermal 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.

Sulistyawan, 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

ESTIMASI SUMBER DAYA BAUKSIT MENGGUNAKAN METODE *ORDINARY KRIGING* DI KECAMATAN MELIAU, KALIMANTAN BARAT

ESTIMATION OF BAUXITE RESOURCES BASED ON ORDINARY KRIGING METHODS AT KECAMATAN MELIAU, WEST KALIMANTAN

Westia Alifah Surya Pratiwi[1], Denny Lumban Raja[1], Priatna[1], Sarah Mutia[2], dan Dedi Sunjaya[3]
[1]Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung
[2]Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
[3]Unit Geomin, PT. Aneka Tambang
alifahw21@gmail.com
DOI: https://doi.org/10.47599/bsdg.v19i2.492

ABSTRAK

Estimasi sumber daya mineral sangat penting dalam pertambangan khususnya dalam menentukan target produksi, *design pit* tambang, dan keputusan dalam investasi. Hasil estimasi sumber daya yang akurat akan memudahkan perencanaan tambang yang optimal. Objek pada penelitian ini ialah penerapan teknik estimasi yang memperhatikan geostatistik yaitu *ordinary kriging* dalam melakukan estimasi sumber daya endapan bauksit. Lokasi penelitian berada di busur laterit Kalimantan Barat. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui litologi pembentuk endapan bauksit, sebaran kadar, dan estimasi sumber daya bauksit serta jarak spasi sumur uji yang optimal sebagai dasar klasifikasi sumber daya di daerah penelitian. Data yang digunakan dalam melakukan estimasi berupa data eksplorasi dari 212 titik lokasi sumuran uji. Untuk mengetahui jenis litologi dilakukan analisis petrografi terhadap 4 empat sampel. Dari hasil penelitian diketahui litologi pembentuk endapan bauksit terdiri atas granodiorit, diorit kuarsa, dan granit. Endapan bauksit daerah penelitian dominan berasal dari granodiorit dengan kadar Al_2O_3 tinggi, oleh karena itu karakteristik bauksit merupakan *kaolinitic bauxite*. Hasil estimasi sumber daya bauksit berdasarkan *cut-off grade* Al_2O_3 >35%, $RSiO_2$ <8%, dan $TSiO_2$ ≤30% sebesar 722.720 ton *washed bauxite,* dengan kadar rerata 39,78% Al_2O_3, 3,73% $RSiO_2$ dan 25,05% $TSiO_2$, dengan faktor konkresi (*concretion factor)* 48,44%. Sumber daya *washed bauxite* dengan status tereka sebesar 146.962 ton, sumber daya tertunjuk sebesar 550.482 ton, dan sumber daya terukur 221.643 ton Berdasarkan perhitungan *sill* variogram diperoleh spasi jarak optimum sumur uji untuk eksplorasi bauksit di daerah penelitian dengan klasifikasi sumber daya tereka 100 m, tertunjuk 50 m dan terukur 25 m.

Kata kunci: Geostatistik, *Ordinary Kriging*, Bauksit, Estimasi Sumber Daya, *Cutoff Grade*

ABSTRACT

The estimation of mineral resources is crucial in mining, particularly in determining production targets, pit design, and investment decisions. Accurate resource estimation results will facilitate optimal mine planning. The objective of this study is the application of estimation techniques that consider geostatistics, namely ordinary kriging, in estimating bauxite deposit resources. The research location is in the laterite arc of West Kalimantan. The data used for estimation are exploration data from 212 test pit locations. The aim of this study is to identify the lithology of the bauxite deposit, distribution of grades, and estimate bauxite resources as

well as determine the optimal spacing of test pits as a basis for resource classification in the study area. Petrographic analysis was conducted on four samples to determine the lithology. The study results indicate that the lithology forming the bauxite deposit consists of granodiorite, quartz diorite, and granite. The bauxite deposits in the study area are predominantly derived from granodiorite with high Al_2O_3 content, thus characterizing the bauxite as kaolinitic bauxite. The bauxite resource estimation results, based on a cut-off grade of Al_2O_3 >35%, $RSiO_2$ <8%, dan $TSiO_2$ ≤30%, amounted to 722,720 tons of washed bauxite, with an average grade of 39,78% Al_2O_3, 3,73% $RSiO_2$ dan 25,05% $TSiO_2$, *with a concretion factor of 48.44%. The inferred washed bauxite resources are 146,962 tons, the indicated resources are 550,482 tons, and the measured resources are 221,643 tons. Based on the sill variogram calculation, the optimal spacing for test pits for bauxite exploration in the study area with resource classification is 100 m for inferred, 50 m for indicated, and 25 m for measured resources.*

***Keywords**: Geostatistic, Ordinary Kriging, Bauxite, Resources estimate, Cutoff Grade*

PENDAHULUAN

Pemodelan sumber daya adalah kegiatan yang harus dilakukan sebelum lanjut ke tahap penambangan. Perlu estimasi sumber daya dengan metode yang tepat untuk komoditas mineral tertentu. Hasil estimasi sumber daya yang akurat akan memudahkan perencanaan tambang yang optimal. Prinsip estimasi sumber daya adalah berdasarkan pendekatan dari kondisi yang sebenarnya yang dihasilkan dari kegiatan eksplorasi (Balfas dkk., 2021). Untuk mengetahui hal ini tentunya diperlukan estimasi sumber daya terukur pada suatu wilayah.

Eksplorasi dilakukan untuk mendapatkan data endapan bauksit dengan kualitas tinggi. Eksplorasi bauksit dilakukan di Kalimantan Barat, dimana merupakan daerah potensial terbentuknya sumber daya bauksit.

Tujuan penelitian adalah mengetahui sumber daya endapan laterit bauksit dengan metode *ordinary kriging*, serta mendapatkan jarak spasi titik lokasi sumur uji yang optimal dalam penentuan klasifikasi status sumber daya bauksit di lokasi penelitian.

Bauksit adalah suatu endapan laterit yang terdiri dari aluminium hidroksida murni yang merupakan bijih utama dari aluminium (Schellman, 1986). Bauksit akan terbentuk pada batuan yang terlapukkan. Batuan mengalami pelapukkan dapat disebabkan oleh pengaruh sifat fisik, kimia ataupun organisme. Faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan bauksit (Valeton, 1972):

1. Kandungan batuan induk yang kaya akan Al, rendah Fe, dan rendah SiO_2. Contohnya ialah anortosit, fonolit, basalt, andesit, diabas, gabro, hornfels, sabak, sekis, batu lanau, dan batu serpih. Selain itu batuan induk dengan kandungan feldspar yang tinggi seperti granit dan riolit.
2. Permeabilitas batuan yang memungkinkan terjadinya pergerakan air tanah sehingga mudah terjadi desilikasi.
3. Daerah subtropis–tropis, dengan intensitas penguapan yang tinggi dan kondisi iklim dengan curah hujan yang tinggi.
4. Topografi bergelombang yang mendukung terjadinya pergerakan muka air tanah.
5. Tingkat erosi lebih rendah dibandingkan tingkat pelapukan kimia.
6. Benua yang stabil secara tektonik (benua tua) sehingga mendapatkan waktu yang cukup dalam mengakumulasi material hasil pelapukan.
7. Pelapukan organisme atau vegetasi yang membantu proses pelapukan kimia.

Penelitian ini dilaksanakan di Kecamatan Meliau dengan luas daerah penelitian 723.456 m (Gambar 1). Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pemodelan sumber daya endapan bauksit dengan metode *ordinary kriging,* serta mendapatkan jarak spasi titik lokasi sumur uji yang optimal dalam penentuan klasifikasi status sumber daya bauksit di lokasi penelitian.

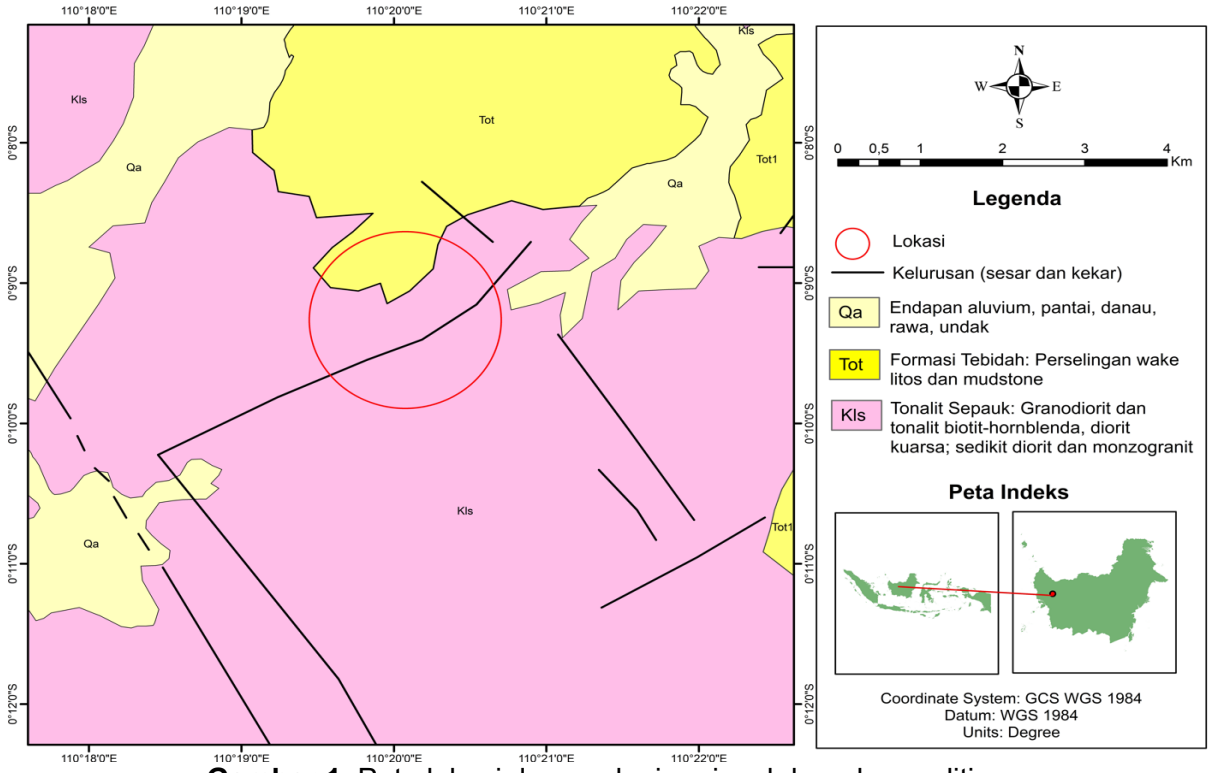
Geologi Regional

Kalimantan Barat merupakan bagian dari pertumbuhan *Sundaland* yang pada Kapur Akhir membentuk tanjung dari Lempeng Eurasia dan dipisahkan oleh lautan dalam dari India dan Australia, saat pada bagian barat dibatasi oleh zona subduksi dan kolisi (Hall dan Morley, 2004) dalam Sunjaya, 2022). Batolit Schwaner sebagai Tonalit Sepauk di daerah penelitian terjadi karena subduksi antara batas tenggara Sundaland dan Southwest Banda dengan lempeng Paleo-Pasifik pada Kapur Awal, sehingga menyebabkan peristiwa magmatisme. Setelah subduksi berhenti pada Kapur Akhir, terjadi kolisi antara blok Argo dengan batas Sundaland sehingga terjadi pensesaran ekstensional yang menyebabkan magmatisme di sepanjang tepi benua aktif sisa subduksi (Hennig dkk., 2017).

Berdasarkan peta geologi regional Lembar Pontianak, Kalimantan, skala 1:250.000 (Sanyoto, dkk.,1993), stratigrafi daerah penelitian terdiri atas kelompok batuan Malihan Pinoh (PzTRp), Tonalit Sepauk (Kls), Formasi Tebidah (Tot), dan Endapan Alluvial (Qa) (Gambar 1).

Ordinary Kriging

Ordinary Kriging merupakan metode interpolasi dari metode geostatistik. Teori geostatistik memberikan dasar untuk mengoptimalkan estimasi sesuai dengan kriteria yang diterima dengan baik (misalnya, kuadrat terkecil) dan menghasilkan ukuran kualitas (variansi kesalahan) dari estimasi tersebut (Sinclair dkk., 2006).



Gambar 1. Peta lokasi dan geologi regional daerah penelitian (modifikasi dari Sanyoto dkk.,1993)

Variogram

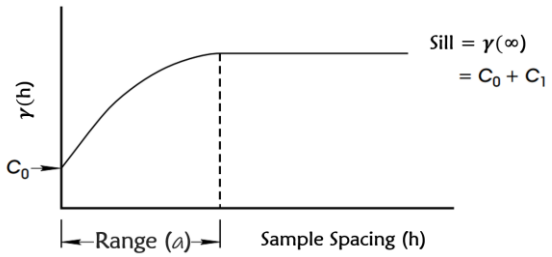
Instrumen penting dalam analisis geostatistik adalah variogram, yang tidak hanya digunakan untuk estimasi variansi (*mean squared error*) antara nilai Z(x+h) dan Z(x), tetapi juga dapat mengukur variansi dalam estimasi tersebut. Variogram oleh Journel and Hujibreight (1978) dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(xi) - Z(xi+h)]^2$$

Dimana:

$\gamma(h)$ = Nilai variogram untuk arah tertentu dan jarak h
h = 1d, 2d, 3d, 4d, (d=jarak k antar conto)
$Z(xi)$ = harga (data) pada titik xi
$Z(xi+h)$ = data pada titik yang berjarak h dari xi
N(h) : jumlah pasangan data

Variogram (atau dikenal sebagai semi-variogram) adalah plot perbedaan khas dalam kelas yang diplot terhadap jarak yang memisahkan sampel. Terdapat tiga model semivariogram teoritis yang sering digunakan sebagai pembanding dengan semivariogram eksperimental, yaitu model *spherical*, model gaussian, dan model eksponensial. Variogram memiliki tiga parameter yaitu *nugge*t (Co), *sill* (C_O+C_I), dan *range* (a) (Gambar 2) *Nugget* merupakan perbedaan nilai suatu karakteristik sampel pada jarak=0. Sill adalah ketika pemisahan antara sampel meningkat, maka perbedaan di antara mereka meningkat, sampai kita mencapai jarak di mana perbedaan antara nilai sampel tidak tergantung pada pemisahan mereka, tetapi sama dengan variabilitas latar belakang atau varians populasi. Dataran tinggi ini dalam nilai variogram disebut ambang. Sedangkan range adalah hubungan variansi spasial antar data, rentang adalah jarak di mana sampel tidak lagi berkorelasi secara spasial. *Range* adalah jarak di mana sill total tercapai. (Coombes, 2008).



Gambar 2. Variogram model *spherical* (Sinclair dkk, 2006)

Estimasi *Ordinary Kriging*

Kriging memberikan bobot lebih pada sampel dengan jarak terdekat dibandingkan sampel dengan jarak yang lebih jauh, Persamaan umum fungsi kriging (Armstrong, 1998):

$$Z(v) = \sum \boldsymbol{\lambda i} \; . \; Z(\boldsymbol{x_i})$$

Dimana:
Z(v) = Nilai estimasi pada blok v
$\boldsymbol{\lambda i}$ = Bobot pada lokasi i
$Z(\boldsymbol{x_i})$ = Nilai data pada lokasi i

Dengan:
$\sum \lambda i = 1$

Dalam *Ordinary kriging* untuk mendapatkan bobot $\boldsymbol{x_i}$ ditentukan persamaan matriks dalam persamaan matriks dari variogram antar titik dan variogram titik ke blok estimasi:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\gamma_{11}} & \cdots & \boldsymbol{\gamma_{1n}} & \mathbf{1} \\ \boldsymbol{\gamma_{n1}} & \cdots & \boldsymbol{\gamma_{nn}} & \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & \cdots & \mathbf{1} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda_i} \\ \boldsymbol{\lambda_n} \\ \boldsymbol{\mu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\gamma_{11}} \\ \boldsymbol{\gamma_{n1}} \\ \mathbf{1} \end{bmatrix}$$

Analisis Statistik

Statistik dalam bahasa artinya catatan angka-angka yang disajikan untuk memberikan informasi yang berarti. Analisis statistik berfungsi untuk menjelaskan hubungan antar data dan kecenderungan data sebelum memilih metode penaksiran. Statistik univarian adalah teknik analisis statistik yang hanya melibatkan satu variabel *dependent.* Berguna dalam menganalisis hubungan dari masing-masing data atau variabel dari

suatu populasi dengan tanpa memperlihatkan lokasi dari data-data yang ada. Parameter statistik untuk menggambarkan letak data antara lain rata-rata (mean), nilai tengah (median), nilai yang sering muncul (modus), nilai maksimum dan minimum, variansi, standar deviasi, *skewness, kurtosis*, koefisien variansi, dan *range.*

Cross Validation

Validasi berguna untuk menguji ketepatan hasil estimasi, kecocokan antara parameter estimasi dan variogram yang telah dibuat. Hal ini dilihat dalam regresi linear antara dua variabel yang mana terdapat parameter koefisien determinasi dan koefisien korelasi. Nilai koefisien determinasi (r^2) adalah ukuran statistik yang menunjukan seberapa baik data yang dapat diamati oleh model regresi. Sedangkan koefisien korelasi (r) ialah mengukur kekuatan dan arah hubungan linear antara dua variabel. Jika nilai r<0 menunjukan hubungan negatif antar dua variabel. Jika r mendekati 1 maka hasil estimasi dikatakan cukup baik karena menunjukan hubungan positif antar dua variabel. Selain itu dalam estimasi tak hanya melihat validasi silang dengan *scatter plot,* tetapi juga tingkat kepercayaan seperti *kriging variance. Kriging variance* mengukur tingkat keyakinan dari masing-masing blok model. Apabila didapati nilai *kriging variance* yang rendah maka artinya kualitas estimasinya baik.

Estimasi Sumber Daya

Tingkat sumber daya mineral terdiri dari sumber daya mineral tereka, sumber daya mineral tertunjuk, dan sumber daya mineral terukur (SNI 4726:2019). Sumber daya mineral tereka ialah estimasi berdasarkan bukti geologi dan sampel terbatas dan pengambilan sampel dengan spasi >50m. Sumber daya mineral tertunjuk ialah estimasi dengan sampel pada spasi 25-50m pada bijih tebal atau struktur jelas. Sumber daya mineral terukur adalah estimasi dengan sampel pada spasi 12.5-25m, memungkinkan perencanaan tambang dan evaluasi ekonomi cebakan.

Kriging efficiency (KE) adalah pengukuran efektifitas estimasi kriging secara akurat pada blok model hasil estimasi. Maka apabila didapatkan nilai KE yang tinggi, artinya efektifitas estimasi lebih baik dan akurat. Dari nilai ini dapat dikategorikan sebagai klasifikasi sumber daya tereka, tertunjuk, terukur (Tabel 1). Semakin dekat jarak antar data pada lokasi spasial maka semakin efektif pemodelan estimasi *kriging*. Rumus *Kriging Efficiency* yang bekerja pada *software* (Krige, 1997).

$$KE = \frac{Between\ block\ variance - kriging\ variance}{Between\ block\ variance}$$

Tabel 1. Klasifikasi Sumber Daya berdasarkan *Kriging Efficiency* (Krige, 1997)

Klasifikasi	***Kriging Efficiency***
Terukur	KE ≥ 0,50
Tertunjuk	0,30 < KE < 0,50
Tereka	KE ≤ 0,30

Dari geostatistik dapat diketahui jarak spasi sumur uji yang optimal untuk klasifikasi sumber daya. Jarak spasi sumur uji yang optimal, ditentukan berdasarkan model variogramnya, yaitu pada ordinatnya (sumbu y) terdapat nilai sill ditarik garis lurus mendatar yang akan memotong kurva variogramnya, kemudian dari titik potong tersebut ditarik garis vertikal ke bawah yang akan memotong absis (sumbu x) di titik h, yang menunjukkan a=*range variogram*, sebagai jarak spasi sumur uji untuk klasifikasi tertunjuk. Untuk nilai γ(h) sama dengan 2/3 *sill*-nya, maka h yang memotongnya sebagai jarak spasi sumur uji untuk klasifikasi sumber daya terukur (Tabel 2).

Tabel 2. Klasifikasi Sumber Daya Bauksit berdasarkan *sill* dan *range* variogram (Snowden, 1996)

Klasifikasi	γ(h)	Jarak Spasi Sumur Uji (h)
Terukur	2/3 sill	1/2 a
Tertunjuk	3/3 sill	a
Tereka	>3/3 sill	2 a

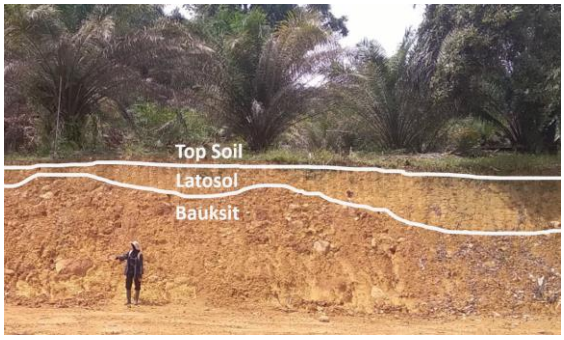
HASIL DAN PEMBAHASAN

Morfologi daerah penelitian terdiri atas empat satuan (Sunjaya, D., 2022), yaitu:

1. Satuan morfologi dataran aluvial dan litoral. Satuan ini terletak pada wilayah yang memiliki topografi rendah atau dataran rendah seperti rawa dan danau dangkal.
2. Satuan morfologi rendah dan berbukit tertoreh rapat. Satuan ini tersusun oleh batuan granit dan batuan vulkanik. Satuan ini cukup dominan ditemukan pada daerah penelitian.
3. Satuan morfologi perbukitan dan pegunungan. Satuan ini ditempati oleh kompleks pegunungan Schwaner yang terpotong-potong menjadi perbukitan terisolasi dan tidak menerus akibat sesar. Litologi yang ditemukan pada satuan ini ialah kelompok batuan Tonalit Sepauk dan Gabro Biwa.
4. Satuan morfologi lembah sungai Kapuas, satuan ini terletak di bagian utara dari daerah penelitian dan sekitar Sungai Kapuas yang relatif stabil tanpa perpindahan sistem sungai *meander* dan danau tapal kuda.

Sebagian besar daerah penelitian didominasi oleh kelompok batuan Tonalit Sepauk yang terdiri atas diorit kuarsa, sedikit diorit dan monzogranit, granodiorit, tonalit biotit-hornblenda, granit.

Zona profil laterit bauksit terdiri dari *top soil, latosol*, bauksit, dan kong yang terletak pada bagian paling bawah (Gambar 3).



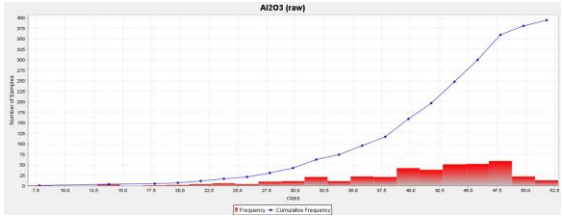
Gambar 3. Zona profil bauksit daerah penelitian

Analisis Statistik *Raw Data*

Hasil analisis univarian pada nilai komposit atau *raw* data kadar alumina (Al_2O_3) dilakukan terhadap 394 data (Tabel 3) yang menunjukan bahwa sebaran data terdistribusi secara normal (Gambar 4) dengan adanya pencilan (*outlier*).

Tabel 3. Analisis Statistik Al_2O_3

Parameter	Al_2O_3
Jumlah data sampel	394
Nilai minimum	6,79
Nilai maksimum	52,68
Mean	40,97
Median	42,82
Variansi	1,79
Standar deviasi	7,62
Skewness	-1,17
Kurtosis	4,60
Koefisien variansi	0,18
Range	45,89



Gambar 4. Histogram Data Al_2O_3

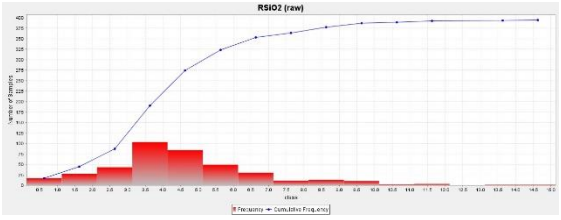
Berdasarkan histogram Al_2O_3 (Gambar 4) dapat diketahui bahwa nilai *skewness* sebesar -1,17 yang masih tergolong normal karena berada di antara -2 hingga +2 (George and Mallery, 2010) dengan nilai kurtosis sebesar 4,60 yang tergolong normal karena berada di antara -7 hingga +7 (Byrne, 2010). Sehingga masih data ini masih dikatakan normal. Namun data

kadar Al_2O_3 ini memiliki standar deviasi yang cukup besar yaitu 7,62 dan koefisien variansi sebesar 0,18. Hal ini berarti bahwa penyebaran data kadar Al_2O_3 cukup bervariasi dan tidak homogen. Terlihat pula *range* data memiliki jangkauan yang cukup jauh, yaitu 45,89 dengan kadar tertinggi 52,68 dan kadar terendah 6,79.

Analisis statistik data kadar/*raw* data $RSiO_2$ (Tabel 4) juga penting untuk diperhatikan dalam melakukan estimasi sumber daya untuk komoditas bauksit karena sebagai parameter *cut-off grade* yang dapat diterima. *Cut-off grade* (CoG) adalah batas kadar atau nilai minimum dari logam atau mineral yang terkandung dalam suatu volume batuan. Jika kadar atau nilai logam/mineral tersebut di bawah batas ini, maka nilai ekonomi yang terkandung tidak memenuhi persyaratan ekonomi tertentu yang telah ditetapkan dengan kata lain ekstraksi atau penambangannya tidak dianggap menguntungkan secara ekonomi (Sinclair dkk., 2006). Sehingga perlu dilakukan analisis statistik univarian terhadap nilai kadar komposit $RSiO_2$.

Tabel 4. Analisis Statistik $RSiO_2$

Parameter	$RSiO_2$
Jumlah data sampel	394
Nilai minimum	0,13
Nilai maksimum	14,15
Mean	4,58
Median	4,17
Variansi	2,76
Standar deviasi	2,19
Skewness	1,04
Kurtosis	5.14
Koefisien variansi	0,47
Range	14,15



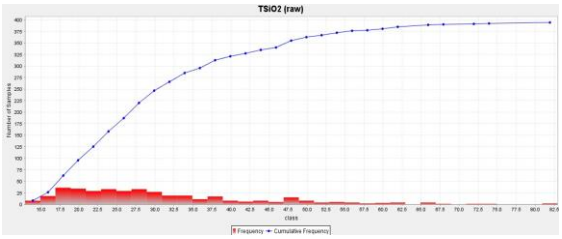
Gambar 5. Histogram Data $RSiO_2$

Berdasarkan data di atas diketahui bahwa nilai minimum dari kadar $RSiO_2$ ialah 0,13 dan maksimumnya 14,15 dengan nilai rata-rata 4,58. Hal ini menandakan terdapat lokasi yang cukup jauh dengan nilai rata-rata atau disebut sebagai *outlier.* Kemudian dapat diketahui bahwa nilai *skewness* sebesar 1,04 yang masih tergolong normal karena berada di antara -2 hingga +2 (George and Mallery, 2010) dengan nilai kurtosis sebesar 5,14 yang tergolong normal karena berada di antara -7 hingga +7 (Byrne, 2010). Sehingga data ini masih dikatakan terdistribusi normal. Data kadar $RSiO_2$ ini memiliki standar deviasi yaitu 2,19 dan koefisien variansi sebesar 0,47. Hal ini merupakan nilai yang kecil sehingga penyebaran data kadar $RSiO_2$ homogen. Nilai median yaitu 4,17 lebih kecil daripada nilai mean yaitu 4,58. Hal ini menjelaskan histogram memiliki ekor yang lebih memanjang ke kanan atau data cenderung condong ke kanan (Gambar 5)

Dari 394 jumlah data kadar $TSiO_2$ diketahui bahwa memiliki nilai minimum dan maksimum yang cukup jauh. Nilai minimum bernilai 12,91 sedangkan nilai maksimum bernilai 82,57 dengan rata-rata 30,63 sehingga hal ini menunjukan adanya pencilan (Tabel 5).

Tabel 5. Analisis Statistik $TSiO_2$

Parameter	$TSiO_2$
Jumlah data sampel	394
Nilai minimum	12,91
Nilai maksimum	82,57
Mean	30,63
Median	27,30
Variansi	3,57
Standar deviasi	12,74
Skewness	1,26
Kurtosis	4,51
Koefisien variansi	0,41
Range	69,66



Gambar 6. Histogram Data $TSiO_2$

Dapat diketahui bahwa nilai *skewness* sebesar 1,26 yang masih tergolong normal karena berada di antara -2 hingga +2 (George dan Mallery, 2010) dengan nilai kurtosis sebesar 4,51 yang tergolong normal karena berada di antara -7 hingga +7 (Byrne, 2010). Sehingga masih data ini masih dikatakan terdistribusi normal. Data kadar $TSiO_2$ ini memiliki standar deviasi yaitu 12,74 dan koefisien variansi yaitu 0,41. Hal ini merupakan nilai yang besar sehingga penyebaran data kadar $TSiO_2$ tidak homogen. Nilai median yaitu 27,20 lebih kecil daripada nilai mean yaitu 30,36. Hal ini menjelaskan histogram memiliki ekor yang lebih memanjang ke kanan atau data cenderung condong ke kanan (Gambar 6).

Penanganan Pencilan

Berdasarkan analisis statistik dasar di atas, dapat terlihat bahwa nilai pada data secara signifikan sangat tinggi atau rendah dari data umumnya. Banyaknya akan menyebabkan variansi yang tinggi atau *noise* pada saat analisis variogram. Hal ini haruslah ditangani karena akan mengakibatkan kesalahan pada saat melakukan proses estimasi dan menghindari nilai yang tidak realistis. Penangan dampak adalah dengan menerapkan *topcut* pada data anomali tinggi. Teknik *topcut* yang dilakukan pada penelitian ini ialah dengan *confidence interval* (CI) atau interval kepercayaan. Perhitungan CI dengan batas atas 95% CI ialah sebagai berikut:

95%CI = Mean + (1.96 x *Standard Deviation*)

Tabel 6. Nilai *Topcut Data Assay*

Parameter	$TSiO_2$	$RSiO_2$	Al_2O_3
Mean	30.63093	4.580198	40.96973
Std Dev	12.74504	2.197243	7.626415
Max Grade	55.61	4.58	40.97

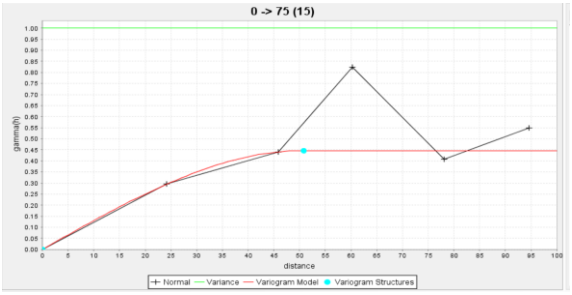
Dari nilai maksimum yang didapatkan berdasarkan 95% CI, merupakan landasan untuk mengubah nilai kadar pada data *assay* yang akan dilakukan estimasi. Misalnya pada data kadar Al_2O_3, apabila nilainya lebih dari 40.97% nilai kadar maka akan diratakan menjadi 40.97%.

Analisis Geostatistik

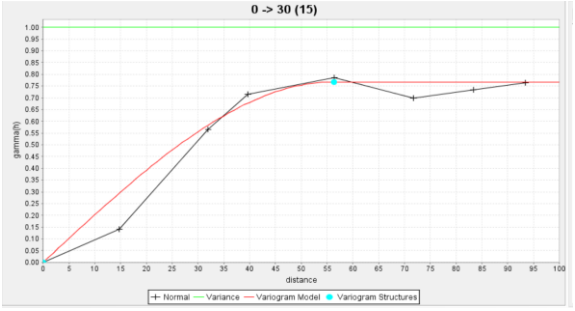
Dalam penelitian ini, maksimum daerah pencarian 100 m karena jarak spasi titik sumur uji paling jauh 100 m. Kemudian jarak *lag* yang digunakan juga 100 m agar mendapatkan grafik perbedaan data dengan jarak yang lebih optimal sehingga diketahui variabilitas suatu data. Dalam komputerisasi, perhitungan variogram dilakukan pada berbagai arah, namun dalam *fitting* variogram dapat memilih hasil variogram yang cocok dengan model yang diinginkan. Adapun hasil parameter-parameter model variogram ditunjukan pada Tabel 7. Sedangkan model variogram untuk kadar Al_2O_3, $TSiO_2$, dan $RSiO_2$ ditunjukkan pada (Gambar 7 s.d 9).

Tabel 7. Parameter Model Variogram Kadar Al_2O_3, $RSiO_2$, $TSiO_2$

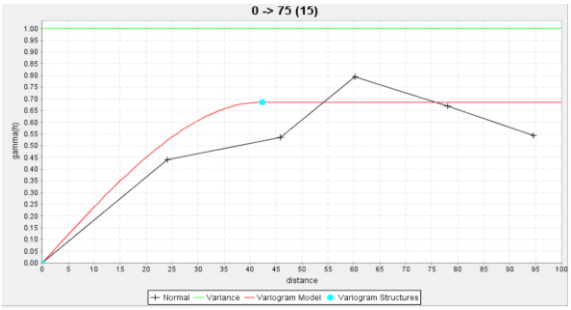
Variabel	Arah	*Nugget*	*Sill*	*Range*
Al_2O_3	75˚	0	0.447	50.79
$RSiO_2$	60˚	0	0.768	56.32
$TSiO_2$	75˚	0	0.686	42.36



Gambar 7. Model Variogram Kadar Al_2O_3



Gambar 8. Model Variogram Kadar $TSiO_2$



Gambar 9. Model Variogram Kadar $RSiO_2$

Dalam melakukan *fitting,* ditetapkan nilai *nugget* 0 karena endapan bauksit merupakan komoditas laterit yang nilai karakteristik sampelnya tidak jauh berbeda pada jarak. Berdasarkan hasil analisis statistik univarian, ketiga kadar ini memiliki nilai *coefficient of variation* kurang dari 1 atau dapat dikatakan variabilitas rendah. Nilai *range* (α) pada data kadar Al_2O_3, $RSiO_2$, dan $TSiO_2$ berbeda-beda, hal ini menyatakan seberapa jauh data saling memiliki korelasi. Misalnya pada data kadar Al_2O_3 yang memiliki range 50,80 m artinya data memiliki korelasi antar data sejauh 50,80 m. Sehingga dapat dikatakan bahwa kadar Al_2O_3 memiliki kontinuitas yang tinggi dan variabilitas yang lebih rendah. Sedangkan pada data kadar $TSiO_2$ memiliki *range* yang lebih rendah artinya variabilitas data lebih tinggi karena jarak korelasi antar data yang lebih rendah.

Analisis Statistik Data Hasil Estimasi

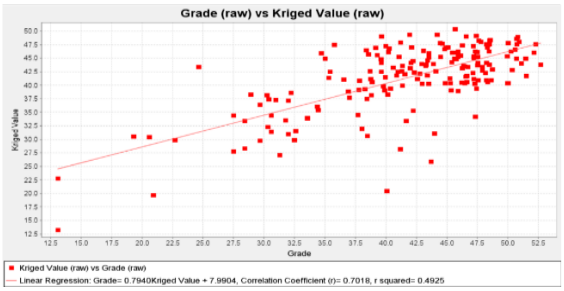
Setelah dilakukan estimasi terdapat perubahan pada hasil statistik univarian masing-masing kadar. Perubahan signifikan terjadi pada menurunnya nilai *coefficient of variation* (Tabel 8).

Tabel 8. Analisis Statistik Univarian Data Estimasi Kadar Al_2O_3, $RSiO_2$, $TSiO_2$

Parameter	Hasil
Al_2O_3	
Jumlah Blok	6.756
Mean	38
Median	40.97
Coefficient of Variation	0.14
Standar Deviation	5.44
Skewness	0.33
Kurtosis	1.15
$RSiO_2$	
Jumlah Blok	6.756
Mean	3.78
Median	4.17
Coefficient of Variation	0.28
Standar Deviation	1.93
Skewness	0.42
Kurtosis	1.29
$TSiO_2$	
Jumlah Blok	6.756
Mean	30.15
Median	27.30
Coefficient of Variation	0.37
Standar Deviation	11.44
Skewness	0.80
Kurtosis	1.60

Validasi Model

Validasi hasil estimasi dilakukan dalam berbagai metode yaitu dengan *scatter plot* antara data *assay* dengan hasil interpolasi, dan berdasarkan validasi blok model (Gambar 10).



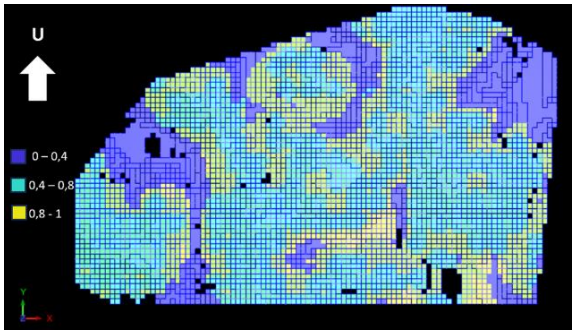
Gambar 10. *Scatter* Plot Hasil Validasi

Dapat diperoleh bahwa koefisien korelasi ialah 0,70 yang merupakan korelasi positif karena mendekati 1. Hal ini berarti bahwa hasil estimasi memiliki kemiripan dengan hasil titik sumur uji yang ada. Setiap kenaikan variabel kadar Al_2O_3 setiap titik sumur uji akan diikuti dengan kenaikan nilai variabel hasil kriging begitupun sebaliknya. Tampak pada gradien garis yang terbentuk menandakan nilai yang positif. Dalam persamaan grafik yaitu: y= 0.7940x + 7.9904, nilai *plus* pada variabel x memperlihatkan hubungan yang searah. Berdasarkan *scatter plot* di atas, nilai hasil regresi koefisien determinasi r^2= 0,49 yang menunjukan korelasi yang sedang.

Dilakukan validasi secara manual yaitu membandingkan antara hasil estimasi

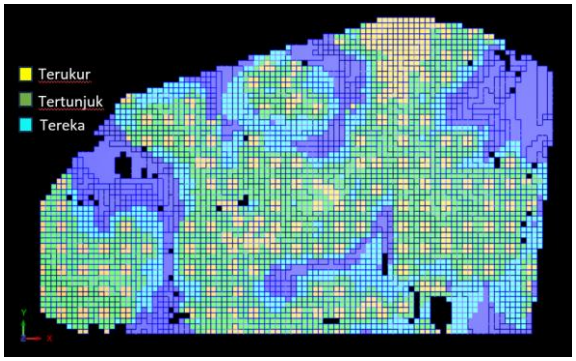
dengan kadar Al_2O_3 di titik sumur uji pada 162 titik yang dilihat dari penampang berarah utara-selatan. Diketahui bahwa rata-rata penyimpangan nilai sebesar 3,21 yang mana tergolong rendah di bawah standar deviasi Al_2O_3 sebelumnya (Tabel 3).

Pada blok model diketahui bahwa nilai *kriging variance* berada pada kisaran 0 - 1. Nilai ini tergolong rendah sehingga dapat dikatakan kualitas estimasinya baik (Gambar 11).



Gambar 11. Hasil *Kriging Variance Block Model*

Pada *kriging efficiency*, nilai yang mendekati 1 maka hasil estimasinya baik. Pada blok model, nilai *kriging efficiency* didominasi oleh nilai 0,80 yang berarti hasil estimasinya baik (Gambar 12).



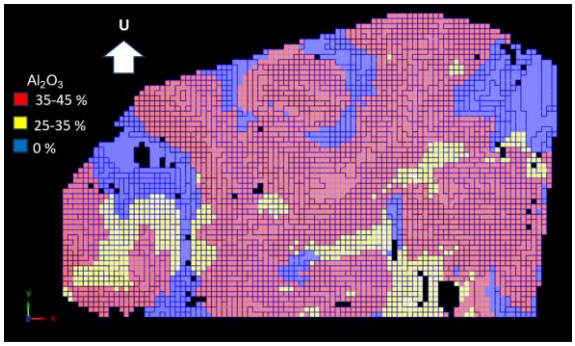
Gambar 12. *Kriging efficiency pada blok model*

Estimasi Sumber Daya

Blok model yang merupakan alat bantu dalam estimasi taksiran kadar dalam penelitian ini berukuran 12,5 x 12,5 x 1 m yang mempertimbangkan ½ dari jarak spasi titik sumur uji terkecil. Berikut ialah hasil dari estimasi sumber daya endapan bauksit yang terklasifikasi *unwashed bauxite* menggunakan metode *ordinary kriging*. Untuk mendapatkan tonnase perhitungannya dikalikan dengan densitas, dalam penelitian ini digunakan asumsi densitas sebesar 1,8 ton/m^3. Tonnase bauksit berdasarkan Kelas Al_2O_3 dengan interval 10 (Tabel 9). Sedangkan blok model klasifikasi kadar Al_2O_3 ditunjukan pada Gambar 13.

Tabel 9. Sumber Daya Bauksit Berdasarkan Kelas Al_2O_3

Kelas Al_2O_3 (%)	Volume (m^3)	Tonnase (Ton)
15-25	2.671	4.808
25-35	172.190	309.942
35-45	890.188	1.602.338
Total	1.065.049	1.917.088



Gambar 13. Blok model klasifikasi Al_2O_3

Estimasi sumber daya *washed bauxite* dengan rata-rata *concretion factor* 48,44%. Nilai ini didapatkan dari dari hasil perkalian antara tonase *unwashed bauxite* dengan *concretion factor* sehingga menghasilkan nilai tonase *washed bauxite.* Hal ini merupakan representasi apabila sumber daya bauksit di lokasi penelitian tersebut ditambang kemudian dilakukan pencucian maka telah diketahui estimasi tonase bauksit. (Tabel 10)

Tabel 10. Sumber Daya *Washed Bauxite*

Kelas Al_2O_3 (%)	*Unwashed bauxite* (Ton)	*Washed bauxite* (Ton)	*Concretion Factor*
15-25	4.808	2.328	**48,44%**
25-35	309.942	150.135	**48,44%**
35-45	1.602.338	776.172	**48,44%**
Total	1.917.088	928.635	

Klasifikasi sumber daya berdasarkan hasil *kriging efficiency* digunakan untuk mencari kelas sumber daya berdasarkan data yang ada. Selain itu, dapat digunakan untuk mengetahui seberapa banyak tonase bauksit yang memiliki klasifikasi sumber daya yang dapat dikonversi menjadi cadangan. Apabila menggunakan klasifikasi *kriging efficiency* maka hasil tonase dapat lebih besar atau lebih kecil tergantung banyaknya data titik sumur uji. Semakin banyak data titik sumur uji akan semakin besar nilai tonase berdasarkan *kriging efficiency* (Tabel 11).

Tabel 11. Tonnase Bauksit Berdasarkan *Kriging Efficiency*

Klasifikasi	Tonnase *unwashed bauxite* (Ton)	Tonnase *washed bauxite* (Ton)
Tereka	303.391	146.962
Tertunjuk	1.136.421	550.482
Terukur	457.563	221.643

Hasil estimasi sumber daya berdasarkan asumsi CoG bahwa Al_2O_3 >35%, $RSiO_2$ <8%, dan $TSiO_2$ ≤30% ditunjukan pada Tabel 12 dan blok model ditunjukkan pada Gambar 14.



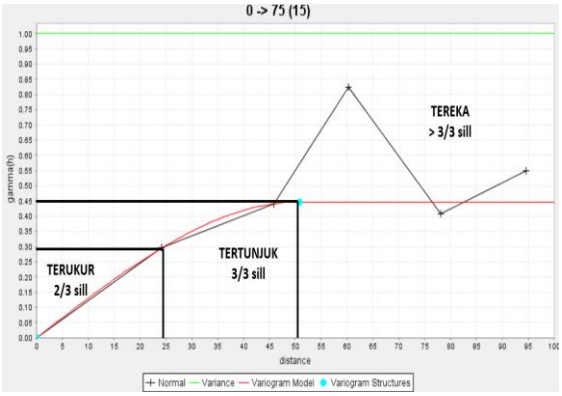
Gambar 14. Blok model estimasi sumber daya berdasarkan *CoG* bauxite Al_2O_3 >35%, $RSiO_2$ <8%, dan $TSiO_2$ ≤30%

Tabel 12. Sumber Daya Bauksit Berdasarkan CoG

Volume (m^3)	Tonnase (Ton)	Tonnase *washed bauxite* (Ton)
828.885	1.491.992	722.720

Dari blok model tersebut dapat diketahui bahwa luas area CoG 498.237 m^2 yang merupakan 68% bagian dari total luas daerah penelitian sebesar 723.456 m².

Berdasarkan hasil analisis variogram, diperoleh nilai optimal spasi jarak sumur uji dalam eksplorasi komoditas bauksit. Nilai ini didapatkan dengan perhitungan *range* variogram yang ditarik garis berdasarkan *sill*. Pada 2/3 *sill*, garis jatuh pada *range* 25 m, artinya pada klasifikasi sumber daya terukur jarak optimum sumur uji 25 meter. Sedangkan untuk klasifikasi tertunjuk 50 m, dan tereka 100 m (Gambar 15).



Gambar 15. Klasifikasi sumber daya berdasarkan range variogram

KESIMPULAN

Hasil estimasi sumber daya bauksit berdasarkan CoG Al_2O_3 >35%, $RSiO_2$ <8%, dan $TSiO_2$ ≤30%, sebesar 722.720 ton *washed bauxite,* dengan kadar rata-rata 39,78% Al_2O_3, 3,73% $RSiO_2$ dan 25,05% $TSiO_2$, dan faktor konkresi (*concretion factor)* 48,44%. Sumber daya *washed bauxite dengan* status tereka sebesar 146.962 ton, sumber daya tertunjuk sebesar 550.482 ton, dan sumber daya terukur 221.643 ton.

Berdasarkan perhitungan *range variogram* diperoleh spasi jarak optimum sumur uji untuk eksplorasi bauksit di daerah penelitian dengan klasifikasi sumber daya tereka 100 m, tertunjuk 50 m, dan terukur 25 m.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada tim eksplorasi bauksit Unit Geomin, PT Aneka Tambang yang telah memberikan ilmunya mengenai bauksit dan mengizinkan penulis melakukan penelitian dan menerbitkan dalam jurnal ilmiah. Terima kasih kepada pihak PSDMBP yang membantu proses analisis sampel sayatan tipis sehingga penelitian ini lebih baik lagi.

DAFTAR PUSTAKA

Aleva, G. J. (1994). Laterites, Concept, Geology, Morphology, and Chemistry. *ISRIC, Wageningen.*

Armstrong, M. (1998). Basic linear geostatistics. Springer Science & Business Media.

Balfas, M, D., Anjarwati, R., Sasmito, K., Zaenal, M., Muthadin., Oviandari, Y, G. (2021). Estimasi Sumber Daya Batubara Seam 1 Menggunakan Metode Circular 891 USGS Daerah Tanah Merah, Kota Samarinda Provinsi Kalimantan Timur. *Jurnal Geocelebes Vol. 5 No. 1, April 2021, 63-71.*

Byrne, B. M. (2010). Structural equation modeling with AMOS: Basic concepts, applications, and programming. *New York: Routledge.*

Coombes, J. (2008). The art and science of resource estimation: a practical guide for geologists and engineers. Coombes Capability.

George, D. & Mallery, M. (2010). SPSS for Windows Step by Step: A Simple Guide and Reference, 17.0 update (10a ed.). *Boston: Pearson.*

Hall, Robert & Morley, Christopher. (2004). Sundaland Basins. *AGU Geophysical Monograph.* 149. 55-85. 10.1029/149GM04.

Hennig, J., dkk. (2017). The Mesozoic tectonic-magmatic evolution at the Paleo-Pacific subduction zone in West Borneo. *Gondwana Research, 292-310.*

Journel, A.G. and Huijbregts, C.J. (1978). Mining Geostatistics. *Academic Press, London.*

Krige, D.G. (1997). A Practical Analysis of the Effects of Spatial Structure and of Data Available and Accessed, on Conditional Biases in Ordinary Kriging.

Matheron, G. (1963). Principle of Geostatistics. *Economic Geology,* 58 (8): 1246–1266.

Sanyoto, dkk. (1993). Geology of the Pontianak/Nangataman Sheet Area, Kalimantan. Map at 1:250,000 scale. *Bandung, Indonesia: Geological Research and Development Centre.*

Sinclair, A. J., & Blackwell, G. H. (2006). Applied mineral inventory estimation. *Cambridge University Press.*

Schellmann, W. (1986). A new definition of laterite; In: Lateritization Processes. (ed.) *Banerjee P K, Geol. Surv. India Memoir 120 1–7.*

Sunjaya, D. (2022). Studi Petrogenesis Bauksit Dan Mineralisasi Skandium Daerah Tayan, Kalimantan Barat. *Tesis Magister, Institut Teknologi Bandung.*

SNI 4726-2019. (2019). Pedoman Pelaporan, Sumber daya, dan Cadangan Mineral. *Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.*

Snowden, D.V. (1996). Practical Interpretation of Resource Classification Guidelines. *Perth: AusIMM*

Valeton, I. (1972). Bauxite. *London: Elsevier Publishing Company.*

Diterima : 6 Mei 2024
Direvisi : 5 Juni 2024
Disetujui : 22 Agustus 2024

EVALUASI KELAYAKAN PROYEK DAN PERANKINGAN AREA PROSPEK PANAS BUMI KANDIDAT LOKASI PROGRAM GOVERNMENT DRILLING

EVALUATION OF FEASIBILITY AND RANKING OF GEOTHERMAL PROSPECT AREA CANDIDATES FOR GOVERNMENT DRILLING PROGRAM LOCATIONS

Husin Setia Nugraha[1], Dadan Wildan[2], dan Rina Wahyuningsih[1]
[1]Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi,
[2]Politeknik Energi dan Pertambangan (PEP) Bandung
dadan.wildan@esdm.go.id
DOI: https://doi.org/10.47599/bsdg.v19i2.431

ABSTRAK

Government drilling merupakan program pengeboran sumur eksplorasi panas bumi yang dilakukan menggunakan dana pemerintah. Untuk perencanaan program tersebut, perlu dilakukan pemilihan lokasi dengan membuat perangkingan kandidat lokasi-lokasi area prospek yang akan dikembangkan. Studi ini melakukan perangkingan dua puluh kandidat lokasi dalam program tersebut dengan menggunakan metode *incremental internal rate of return* atau IRR inkremental hasil perhitungan *discounted cash flow* (DCF). Tahapan dalam metode ini adalah penghitungan nilai dan kelayakan proyek berdasarkan parameter profitabilitas pada masing-masing area prospek; dan perhitungan dan perangkingan berdasarkan IRR inkremental. Hasil evaluasi kelayakan proyek, empat lokasi dinyatakan layak secara ekonomi berdasarkan nilai BCR>1, yaitu Area Nage, Gunung Galunggung, Bittuang dan Gunung Papandayan. Sedangkan berdasarkan nilai IRR (IRR≥MARR; dengan MARR=13,5%) dan NPV (NPV>0), dari keempat lokasi tersebut hanya dua lokasi yang dinyatakan layak secara finansial yaitu Area Nage dan Gunung Galunggung. Jadi dua lokasi yaitu Area Nage dan Gunung Galunggung dinyatakan layak secara ekonomi maupun secara finansial. Sedangkan berdasarkan implementasi metode IRR inkremental hasil perhitungan *discounted cash flow* (DCF), peringkat pertama sampai dengan peringkat keempat secara berturut-turur adalah Area Nage, Gunung Galunggung, Gunung Papandayan dan Bittuang. Berdasarkan hasil studi ini, direkomendasikan untuk melakukan evaluasi ulang kandidat lokasi-lokasi area prospek untuk program *government drilling* ini. Hal ini karena dari dua puluh kandidat lokasi tersebut, hanya empat lokasi (20%) yang dinyatakan layak secara ekonomi dan dua lokasi (10%) yang dinyatakan layak secara ekonomi dan finansial. Pemilihan lokasi yang tepat akan menjadi salah satu kunci keberhasilan dalam menjalankan program ini.

Kata kunci: Keekonomian Proyek Panas Bumi, Kelayakan Proyek Panas Bumi, IRR Inkremental, Program *Government Drilling*, Perhitungan *Discounted Cash Flow* (DCF)

ABSTRACT

Government drilling is a geothermal exploration well drilling program carried out using government funds. To plan the program, it is necessary to select locations by ranking candidate locations for prospective areas that will be developed. The aim of the research is to rank twenty candidate locations for the program using the incremental internal rate of return (incremental IRR) method resulting from discounted cash flow (DCF) calculations. The stages in this method are assessing feasibility of the project based on profitability parameters in each prospect area; and ranking based on the incremental IRR. As a result of the project feasibility evaluation, there are four locations that were asserted economically feasible based on a BCR value of >1, namely Nage, Galunggung, Bittuang and Papandayan. Meanwhile, based on the IRR value (IRR≥MARR; with MARR=13.5%) and NPV (NPV>0), there are only two locations of the four

location were assessed financially feasible, namely Nage Area and Galunggung. Therefore, two locations, Nage and Mount Galunggung, were confirmed feasible both economically and financially. Meanwhile, based on the implementation of the incremental IRR method, the results of discounted cash flow (DCF) calculations, the first to fourth places respectively are the Nage Area, Mount Galunggung, Mount Papandayan and Bittuang. Based on the results of this study, it is recommended to re-evaluate candidate locations for prospect areas for the program. It is because there are only four locations (20%) of the twenty candidate locations were declared economically viable, and two locations (10%) were declared economically and financially feasible. Choosing the right location will be one of the keys to success in running the program.

***Keywords**: Geothermal Project Economics, Geothermal Project Feasibility, Incremental IRR, Government Drilling Program, Discounted Cash Flow (DCF) Calculation*

PENDAHULUAN

Undang-undang nomor 21 tahun 2014 tentang panas bumi mendefinisikan studi kelayakan sebagai kajian untuk memperoleh informasi secara terperinci terhadap seluruh aspek yang berkaitan untuk menentukan kelayakan teknis, ekonomis, dan lingkungan atas suatu rencana usaha dan/atau kegiatan pemanfaatan Panas Bumi yang diusulkan (Pemerintah Indonesia, 2014). Kegiatan ini merupakan bagian terakhir dari tahap kegiatan eksplorasi panas bumi. Dari hasil studi kelayakan ini akan ditentukan keberlanjutan suatu proyek panas bumi.
Indonesia telah memiliki master plan pengembangan panas 2007 - 2025 untuk mencapai target pengembangan 9.500 MW_e. Masterplan tersebut diluncurkan pada tahun 2007 diikuti dengan *road-map* untuk mencapai target tersebut (Kementerian ESDM, 2007). *Roadmap* ini pun tercantum dalam lampiran Peraturan Presiden 5/2006 tentang Kebijakan Energi Nasional (Pemerintah Indonesia, 2006). Untuk mengikuti perubahan kebijakan dan peraturan yang ada, masterplan tersebut direvisi pada tahun 2017 dengan menggunakan data per tahun 2015 (Kementerian ESDM, 2017). Namun, karena perubahan kebijakan dan regulasi yang begitu cepat dan signifikan, revisi master plan tersebut sudah tidak bisa diacu lagi secara langsung. Untuk digunakan dibutuhkan penyesuaian-penyesuaian baik dari sisi teknis maupun non teknis.

Dalam rentang waktu 2016 - 2022, beberapa regulasi dan data teknis geosain telah banyak berubah dengan dikeluarkannya beberapa peraturan pemerintah (PP) dan peraturan menteri (permen) serta penambahan survei di beberapa lokasi. Dalam rentang waktu tersebut, pemerintah setidaknya paling sedikit telah mengeluarkan 2 PP dan 7 permen tentang panas bumi atau yang berhubungan (Direktorat Panas Bumi, 2022). Setidaknya terdapat penambahan data geosain pada 25 lokasi prospek. Hasil evaluasi menghasilkan penurunan nilai kuantitatif total sumber daya sebesar 5.222 MW_e atau 18% dari total sumber daya data tahun 2016 (Badan Geologi, 2022, 2016). Namun secara kualitas, sumber daya panas bumi tersebut meningkat dengan penambahan data-data geofisika seperti survei *magneto telluric* (MT) dan gaya berat yang mampu memperkirakan dimensi sumber daya tersebut.

Jadi untuk perencanaan program pengembangan panas bumi yang baru seperti program *government drilling* ini tidak dapat menggunakan data informasi dalam *masterplan* secara langsung. *Government drilling* merupakan program pengeboran sumur eksplorasi panas bumi yang dilakukan menggunakan dana pemerintah. Saat ini, program ini dilakukan oleh dua institusi yaitu Kementerian ESDM dan Kementerian Keuangan. Untuk perencanaan kegiatan tersebut, perlu dilakukan perangkingan kembali lokasi-lokasi prospek yang akan dikembangkan.

Untuk menentukan lokasi yang diperuntukkan program *government drilling*, Badan Geologi telah melakukan perankingan 20 (dua puluh) lokasi kandidat lokasi program ini menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Dengan didasari pada tujuh kriteria teknis dan non teknis yaitu status wilayah, kelengkapan data, kondusivitas sosial, suhu reservoir, kualitas infrastruktur, *supply & demand*, dan *heat source*, didapatkan ranking lokasi kegiatan sebagaimana tercantum pada **Tabel 1** (Pusat Sumber Daya Mineral Batubara Panas Bumi, 2021).

Tabel 1. Lokasi Kegiatan Eksplorasi Panas Bumi Oleh Pemerintah (Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, 2021)

No	Area Prospek	Prop.	Stat. Wil.
1	Cisolok-Cisukarame	Jabar	WKP
2	Nage	NTT	WKP
3	Bittuang	Sulsel	WT
4	Tampomas	Jabar	WKP
5	Ciremai	Jabar	WKP
6	Marana	Sulteng	WKP
7	Gn. Endut	Banten	WKP
8	Sembalun	NTB	WKP
9	Guci	Jateng	WKP
10	Banda Baru	Maluku	WT
11	Sipoholon Ria-Ria	Sumut	WKP
12	Bora Pulu	Sulteng	WKP
13	Sumani	Sumbar	WKP
14	Gn. Galunggung	Jabar	WKP
15	Gn. Papandayan	Jabar	WT
16	Gn. Batur-Kintamani	Bali	WT
17	Lokop	Aceh	WT
18	Maritaing	NTT	WT
19	Sajau	Kaltara	WT
20	Limbong	Sulsel	WPSE

Keterangan:
WKP = Wilayah Kerja Panas Bumi;
WT = Wilayah Terbuka; dan
WPSE = Wilayah Penugasan Survei & Eksplorasi.

Kriteria untuk perangkingan belum mempertimbangkan nilai keekonomian proyek panas bumi secara langsung. Beberapa parameter dimasukan dengan pertimbangan dapat mempengaruhi besar biaya yang akan dikeluarkan. Nilai keekonomian ini sangat berperan untuk menentukan kelayakan proyek untuk dikembangkan selain faktor teknis dan lingkungan. Terdapat beberapa lokasi prospek yang dinilai secara teknis dan lingkungan dikategorikan sebagai proyek layak namun belum menarik untuk dikembangkan karena belum mencapai nilai keekonomiannya.

Studi ini melakukan perangkingan dua puluh kandidat lokasi pengeboran berdasarkan pendekatan anggaran biaya (*capital budget approach*) menggunakan metode *incremental internal rate of return* atau metode IRR inkremental hasil perhitungan *discounted cash flow* (DCF). Metode ini dipilih karena dianggap metode sederhana dan mudah dimengerti oleh pemangku kepentingan baik sisi teknis dan manajemen.

Untuk perhitungan DCF ini digunakan kebijakan harga jual energi panas bumi yang baru, yaitu harga yang tertuang dalam peraturan presiden (perpres) nomor 112 tahun 2022 (Pemerintah Indonesia, 2022). Studi ini ingin memberikan gambaran bagaimana kedua puluh lokasi program *government drilling* ini jika dipilih oleh pengembang swasta berdasarkan nilai keekonomian proyek. Hasil studi ini dapat diintegrasikan menjadi salah satu kriteria dalam perankingan lokasi dalam program government drilling ini. Namun jika digabungkan menjadi salah satu kriteria, maka diperlukan evaluasi terhadap beberapa kriteria yang juga digunakan baik langsung maupun tidak langsung dalam perhitungan DCF ini.

METODOLOGI

Metodologi pada studi ini dibagi menjadi dua tahap yaitu tahap perhitungan nilai dan kelayakan proyek berdasarkan parameter profitabilitas pada masing-masing area

prospek, dan tahap perhitungan dan perangkingan berdasarkan nilai IRR inkremental.

Tahap Pertama – Perhitungan Parameter Profitabilitas dan Kelayakan Proyek Area Prospek

Parameter *Internal Rate of Return* (IRR) merupakan salah satu indikator profitabilitas yang paling sering pakai selain *Net Present Value* (NPV), *Benefit Cost Ratio* (BCR) dan *Payback Period* (PBP) dalam pendekatan anggaran dan biaya. Nilai IRR merupakan nilai laju diskonto pada saat NPV bernilai nol dengan menggunakan **Formula 1**. Dua jenis IRR yang akan dihitung yaitu IRR Proyek dan IRR Ekuiti. Project IRR adalah IRR dengan asumsi pembiayaan tanpa pinjaman, jadi semua pembiayaan menggunakan ekuitas atau modal sendiri, sedangkan IRR Ekuiti adalah IRR dengan asumsi ada proporsi pembiayaan menggunakan dana pinjaman dan ekuitas.

$$\sum_{t=0}^{t=n} \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} = 0 \qquad \text{.....(1)}$$

Kriteria kelayakan suatu proyek berdasarkan *IRR* adalah sebagai berikut:

- Jika *IRR* ≥ *MARR*, maka suatu proyek dinyatakan layak untuk dilaksanakan;
- Jika *IRR* < *MARR,* maka suatu proyek dinyatakan tidak layak untuk dilaksanakan.

Minimum Acceptable Rate of Return (MARR) adalah adalah tingkat pengembalian minimum suatu proyek yang dapat diterima oleh suatu perusahaan sebelum memulai suatu proyek berdasarkan tingkat risiko dan biaya yang akan dikeluarkan suatu proyek. Nilai MARR proyek yang dipergunakan dalam studi ini adalah 13,5%. Nilai tersebut didapat dari nilai MARR untuk proyek pembangkit batubara adalah 12% ditambah 150 basis poin karena proyek panas bumi masih memiliki risiko tambahan yaitu risiko sumber daya atau risiko *sub-surface*(Direktorat Panas Bumi, 2016)

Sedangkan nilai NPV adalah jumlah rangkaian *present value* dari *cash flow* dari awal sampai akhir proyek. Perhitungannya menggunakan **Formula 2**. Nilai BCR merupakan perbandingan antara pendapatan yang diperoleh dan biaya yang dikeluarkan dengan perhitungannya menggunakan **Formula 4.** Terakhir, PBP adalah waktu yang dibutuhkan suatu proyek untuk mengembalikan seluruh biaya dan kewajiban yang telah dikeluarkan. Perhitungan berapa lama PBP menggunakan **Formula 5.**

$$NPV = \sum_{t=0}^{t=n} \frac{CF_t}{(1+r)^t} \qquad \text{.....(2)}$$

dengan

CF_t : cash flow pada tahun ke-t
r : laju diskonto
n : umur proyek

$$CF_t = CI_t - CO_t \qquad \text{.....(3)}$$

Dengan

CI_t : cash inflow pada tahun ke-t
CO_t : cash outflow pada tahun ke-t

Kriteria kelayakan suatu proyek berdasarkan *NPV* adalah sebagai berikut:

- Jika *NPV* > 0, maka suatu proyek dinyatakan layak untuk dilaksanakan;
- Jika *NPV* ≤ 0, maka suatu proyek dinyatakan tidak layak untuk dilaksanakan.

$$BCR = NPV\left(\frac{Pendapatan}{Investasi}\right) \qquad \text{.....(4)}$$

Kriteria kelayakan suatu proyek berdasarkan *BCR* adalah sebagai berikut:

- Jika *BCR* > 1, maka suatu proyek dinyatakan layak untuk dilaksanakan;
- Jika *BCR* ≤ 1, maka suatu proyek dinyatakan tidak layak untuk dilaksanakan.

$$PBP = m + \frac{0 - CCF_m}{CCF_{m+1} - CCF_m} \quad \text{.....(5)}$$

dengan

PBP	:	*payback period*, tahun
m	:	tahun dengan *CCF* negatif sebelum *CCF* positif
m+1	:	tahun dengan *CCF* positif setelah *CCF n*egatif
CCF_m	:	cash flow kumulatif pada tahun *m*
CCF_{m+1}	:	*cash flow* kumulatif pada tahun *m+1*

Aplikasi DCF Proyek Panas Bumi

Untuk mendapatkan nilai parameter profitabilitas digunakan aplikasi *spreadsheet* DCF proyek panas bumi kondisi Indonesia yang digunakan oleh Nugraha et al. (2017) dengan beberapa penyesuaian. Terdapat lima penyesuaian yang dilakukan terhadap aplikasi tersebut, yaitu antara lain untuk harga jual listrik, biaya kapital dan operasi, biaya pengeboran sumur, dan pajak penghasilan (PPh) perusahaan.

Penyesuaian Harga Jual Listrik

Nugraha *et al.* (2017) menggunakan aplikasi tersebut untuk menghitung pada harga jual ~~berapa~~ suatu proyek panas bumi bisa mencapai nilai keekonomian. Peraturan yang diacu oleh aplikasi tersebut adalah Permen ESDM Nomor 17 Tahun 2014 tentang Pembelian Tenaga Listrik dari PLTP dan Uap Panas Bumi untuk PLTP oleh PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) yang membagi harga berdasarkan pembagian tiga wilayah dan waktu *Commercial Operation Date* (COD) (**Tabel 2**). Peraturan ini didasarkan pada kajian Bank Dunia yang menentukan harga jual listrik tidak secara langsung namun berdasarkan tujuh nilai biaya terhindarkan, biaya eksternalitas atau manfaat yang didapat jika energi panas bumi dikembangkan di suatu wilayah. Berikut adalah ketujuh hal tersebut, yaitu (1) biaya terhindarkan dari biaya tetap pembangkit termal, (2) biaya terhindarkan dari biaya tidak tetap pembangkit termal, (3) biaya eksternalitas global kapital dan operasional pembangkit termal, (4) biaya eksternalitas lokal kapital dan operasional pembangkit termal, (5) biaya terhindarkan untuk Kementerian Keuangan akibat perubahan harga bahan bakar fosil, (6) biaya terhindarkan transmisi pembangkit termal, dan (7) penambahan manfaat bagi ekonomi lokal dan regional. Pembangkit termal yang dimaksud adalah pembangkit berbahan bakar batubara, minyak dan gas bumi yang akan tergantung pada masing-masing wilayah (Asian Development Bank, 2015).

Tabel 2. Harga Patokan Tertinggi Listrik dari PLTP berdasarkan Permen ESDM 17/2014

Waktu COD	Wil. 1	Wil. 2	Wil.3
2015	11,8	17,0	25,4
2016	12,2	17,6	25,8
2017	12,6	18,2	26,2
2018	13,0	18,8	26,6
2019	13,4	19,4	27,0
2020	13,8	20,0	27,4
2021	14,2	20,6	27,8
2022	14,6	21,3	28,3
2023	15,0	21,9	28,7
2024	15,5	22,6	29,2
2025	15,9	23,3	29,6

Keterangan:

Wilayah 1	:	wilayah Sumatra, Jawa dan Bali;
Wilayah 2	:	wilayah Sulawesi, Nusa Tenggara Barat, Nusa Tenggara Timur, Halmahera, Maluku, Papua dan Kalimantan; dan
Wilayah 3	:	wilayah yang berada pada wilayah I atau Wilayah II yang terisolasi dan pemenuhan tenaga listriknya sebagian besar diperoleh dari pembangkit listrik dengan bahan bakar minyak.

Penyesuaian yang dilakukan adalah dengan mengikuti aturan terbaru tentang harga panas bumi yaitu peraturan presiden (perpres) nomor 112 tahun 2022 tentang percepatan pengembangan energi terbarukan untuk penyediaan tenaga listrik (Pemerintah Indonesia, 2022). Pada perpres tersebut harga dibagi menjadi dua tahap yaitu 10 tahun pertama dan dua puluh tahun selanjutnya setelah waktu COD. Pada perpres tersebut harga dibagi menjadi dua jenis harga pembelian, yaitu untuk tenaga listrik (**Tabel 3**) dan tenaga uap setara listrik (**Tabel 4**). Berdasarkan waktu, harga pembelian tersebut terbagi menjadi dua tahap yaitu harga untuk sepuluh tahun pertama dan dua puluh tahun selanjutnya setelah COD. Harga untuk sepuluh tahun pertama tersebut akan dikalikan dengan faktor lokasi F (**Tabel 5**).

Tabel 3. Harga Pembelian Tenaga Listrik berdasarkan Perpres 112/2022

No	Kapasitas	Harga Patokan Tertinggi (sen USD/kWh)	
		Tahun ke-1 s.d. 10	Tahun ke-11 s.d. 30
1.	s.d. 10 MW	(9,76 x F)*	8,30
2.	>10 MW s.d. 50 MW	(9,41 x F)*	8,00
3.	>50 MW s.d. 100 MW	(8,64 x F)*	7,35
4.	>100 MW	(7,65 x F)*	6,50

Keterangan:
* Harga patokan tertinggi merupakan harga setelah dikalikan faktor F.

Tabel 4. Harga Pembelian Tenaga Uap Panas Bumi Setara Listrik berdasarkan Perpres 112/2022

No	Kapasitas	Harga Pembelian Uap setara Listrik (cent USD/kWh)	
		Tahun ke-1 s.d. 10	Tahun ke-11 s.d. 30
1.	s.d. 10 MW	(6,60 x F)*	5,60
2.	>10 MW s.d. 50 MW	(6,25 x F)*	5,31
3.	>50 MW s.d. 100 MW	(5,48 x F)*	4,,65
4.	>100 MW	(4,48 x F)*	3,81

Keterangan:
* Harga patokan tertinggi merupakan harga setelah dikalikan faktor F.

Tabel 5. Besaran Angka Faktor Lokasi F berdasarkan Perpres 112/2022

No	Wilayah	Semua Kapasitas
1.	Jawa, Madura, Bali	1,00
	- Pulau Kecil	1,00
2.	Sumatra	1,10
	- Kepulauan Riau	1,20
	- Mentawai	1,20
	- Bangka Blitung	1,10
	- Pulau Kecil	1,15
3.	Kalimantan	1,10
	- Pulau Kecil	1,15
4.	Sulawesi	1,10
	- Pulau Kecil	1,15
5.	Nusa Tenggara	1,20
	Pulau Kecil	1,25
6.	Maluku Utara	1,25
	- Pulau Kecil	1,30
7.	Maluku	1,25
	- Pulau Kecil	1,30
8.	Papua Barat	1,50
9.	Papua	1,50

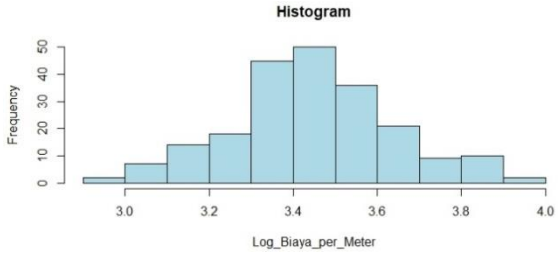
Penyesuaian Biaya Kapital dan Operasi

Penyesuaian lain adalah pada penentuan biaya kapital dan operasi. Sebelumnya biaya-biaya tersebut didasarkan pada studi Quinlivan (2009), sedangkan penyesuaiannya adalah dengan menggunakan nilai-nilai dari studi Sinclair Knight Merz (2013). Nilai biaya pada studi Sinclair Knight Merz (2013) ini lebih baik karena menunjukkan harga untuk kondisi lapangan-lapangan di Indonesia dibandingkan studi Quinlivan et al. (2009) yang mangacu pada biaya lapangan di Selandia Baru. Dalam Sinclair Knight Merz (2013), terdapat biaya perkiraan dari pertamina dan konsultan itu sendiri. Biaya perkiraan dari konsultan lebih besar dari perkiraan biaya pertamina dengan persentase yang berbeda tergantung pada lokasi dan jenis biayanya. Studi ini mengambil 75% dari biaya perkiraan biaya konsultan tersebut. Nilai tersebut dianggap nilai diantara perkiraan biaya pertamina dan konsultan.

Penyesuaiannya adalah bahwa besar biaya tersebut tidak hanya tergantung pada besarnya kapasitas (MW_e) atau total produksi tahunan (MW_{th}/tahun) namun juga pada faktor-faktor lain. Sebagai contoh, besar biaya infrastruktur juga akan dihubungkan dengan empat parameter lain seperti akses menuju area prospek, infrastruktur yang sudah ada, kesulitan topografi dan cuaca. Kesulitan infrastruktur ini juga akan mempengaruhi biaya pembangunan pembangkit (*power plant*) dan *steamfield above ground system* (SAGS). Biaya pembangunan SAGS sendiri tergantung pada nilai rata-rata entalpi sumur dan kerapatan energi suatu prospek (MW/km^2). Kerapatan energi merupakan pembagian antara besarnya sumber daya atau cadangan per satuan luas pada suatu area prospek.

Penyesuaian Biaya Pengeboran Sumur

Biaya lain yang disesuaikan adalah biaya pengeboran sumur. Sebelumnya biaya pengeboran hanya tergantung pada lokasi, kemudian ditambah dengan parameter kedalaman sumur. Biaya pengeboran dibedakan antara lokasi Jawa-Sumatra-Bali dan lokasi di luar Jawa-Sumatra-Bali. Selain lokasi, biaya pengeboran sumur dihubungkan dengan total kedalaman dicerminkan dengan nilai biaya per kedalaman (USD/meter). Nilai yang diambil adalah USD 2.848 per meter yang merupakan nilai rata-rata hasil pengolahan ulang dari data-data yang digunakan Purwanto et al. (2020). Nilai tersebut adalah rata-rata biaya pengeboran sumur per meter di Jawa-Sumatra-Bali dengan data terdistribusi normal (**Gambar 1**). Untuk lokasi di luar Jawa dan Sumatra, biaya pengeboran ditambah dengan biaya tambahan sebesar 48% dari biaya di Jawa-Sumatra-Bali. Persentase tersebut merupakan perbedaan antara biaya pengeboran di Jawa-Sumatra-Bali dan biaya pengeboran di luar ketiga pulau tersebut menurut Sinclair Knight Merz (2013).



Gambar 1. Histogram Distribusi Biaya Pengeboran Sumur Panas Bumi di Pulau Jawa dan Sumatra

Penyesuaian Pajak Penghasilan (PPh)

Penyesuaian pada Pajak Penghasilan (PPh) perusahaan yang akan diterapkan pada studi ini adalah sebesar 22%. Besar PPh ini mengacu pada undang-undang perpajakan terbaru (Pemerintah Indonesia, 2021). Besaran PPh perusahaan ini lebih kecil dari ketentuan pajak sebelumnya pada angka 25% (Direktorat Panas Bumi, 2023).

Penentuan Kelayakan Proyek

Kegiatan selanjutnya adalah penentuan kelayakan proyek panas bumi dan peringkatnya. Penentuan kelayakan

proyek panas bumi ditentukan dengan menggunakan nilai IRR proyek. Jika nilai IRR proyek ≥ MARR proyek. Perangkingan dilakukan berdasarkan urutan nilai IRR proyek paling besar ke nilai paling kecil. Pada tahap ini masih belum mempertimbangkan valuasi proyek berdasarkan nilai investasi pada proyek. Jadi perangkingan pada tahap ini masih bersifat independen belum ada perbandingan dengan portofolio proyek panas bumi yang lain. Perangkingan juga masih ada bias karena belum mempertimbangkan nilai valuasi proyek. Nilai kelayakan suatu proyek bisa saja akan lebih tinggi pada suatu proyek yang memiliki nilai persentase IRR kecil namun valuasi proyek bisa lebih besar dibandingkan dengan suatu proyek dengan persentase IRR besar namun valuasi proyek yang kecil.

Tahap Kedua – Perhitungan IRR Inkremental dan Perankingan Final

IRR inkremental (ΔIRR) adalah nilai IRR dari selisih *net cash flow* antara dua proyek dalam perhitungan DCF. Perhitungan *incremental* IRR (ΔIRR) ini dilakukan setelah dilakukan pengurutan berdasarkan besar nilai investasi (Partowidagdo, 2001). Jadi masing-masing proyek yang layak akan dibandingkan dengan masing-masing proyek layak lainnya.

Kegiatan pertama yang dilakukan adalah pengurutan nilai investasi terbesar ke nilai investasi terkecil untuk proyek yang dikategorikan layak. Selanjutnya dihitung IRR inkremental dari selisih *net cash flow* dua proyek yang dibandingkan. Untuk menentukan proyek mana yang lebih baik untuk dipilih akan mengikuti aturan dibawah ini:

- ΔIRR > MARR; maka proyek yang lebih baik adalah proyek yang membutuhkan investasi lebih besar; dan

- ΔIRR < MARR; maka proyek yang lebih baik adalah proyek yang membutuhkan investasi lebih kecil.

HASIL & PEMBAHASAN

Parameter yang dijadikan sebagai input pada aplikasi perhitungan DCF proyek panas bumi dapat dikategorikan menjadi parameter utama dan tambahan. Parameter utama antara lain besar kapasitas pengembangan, suhu, jenis pembangkit dan harga jual listrik **(Tabel 6)**. Jenis pembangkit panas bumi akan tergantung pada suhu reservoir. Pada suhu diatas 225°C (>225°C) akan menggunakan pembangkit konvensional (*flash power plant*) sedangkan dibawah sama dengan 225°C akan menggunakan pembangkit jenis binari (≤225°C). Parameter tambahan antara lain akses menuju area prospek, infrastruktur yang ada, topografi, cuaca, puncak reservoir, dan kerapatan energiyang akan dipergunakan untuk menentukan penyesuaian biaya infrastruktur, SAGS dan pembangkit **(Tabel 7)**.

Maksud dari program *government drilling* adalah untuk mengurangi resiko hulu bisnis panas bumi yang tinggi. Program ini merupakan salah satu insentif fiskal yang diberikan oleh pemerintah untuk dapat mempercepat pengembangan panas bumi untuk listrik di Indonesia. Program ini merupakan pilihan insentif terbaik yang mampu menurunkan harga jual paling besar (Nugraha, 2017). Program ini diharapkan mampu meningkatkan kelayakan suatu proyek panas bumi. Kelayakan proyek panas bumi dapat dikategorikan menjadi proyek yang secara finansial dan secara ekonomi. Minimum program ini dapat meningkatkan menjadi proyek yang layak secara ekonomi. Hal ini karena apabila suatu proyek secara ekonomi sudah tidak layak maka akan sangat sulit untuk mengangkat proyek tersebut menjadi layak secara finansial. Untuk meningkatkan kelayakan diperlukan insentif fiskal pada proyek tersebut.

Dalam studi ini, kelayakan proyek secara finansial direpresentasikan dengan nilai IRR dan NPV, sedangkan kelayakan secara ekonomi bisa diperlihatkan dengan nilai BCR. Biasanya suatu proyek yang

dinyatakan layak secara finansial akan layak juga secara ekonomi. Namun tidak sebaliknya, proyek yang layak secara ekonomi belum tentu menjadi proyek yang layak secara finansial.

Berdasarkan data pada **Tabel 6**, kandidat area prospek untuk program *government drilling* ini tidak terlalu menarik secara teknis dari dua sisi. Sisi pertama adalah suhu reservoir. Area prospek ini berada pada suhu reservoir menengah-menengah berdasarkan kategori Nugraha *et al.* (2022) untuk sumber daya panas bumi kategori suhu menengah. Dengan suhu tersebut maka dibutuhkan pembangkit jenis binari dan produkstivitas sumur yang lebih kecil. Sisi kedua adalah kapasitas pembangkit yang akan dan dapat dikembangkan dikategorikan sebagai kapasitas kecil. Ketidakmenarikan pada kedua hal tersebut tersebut akan bertambah apabila terjadi *overestimate* perhitungan sumber daya pada kategori suhu menengah ini seperti yang dijelaskan Nugraha *et al.* (2022). Perkiraan *over-estimate* dalam perhitungan sumber daya ini juga dibahas dalam rencana usaha penyediaan tenaga listrik (RUPTL) 2020-2030 yang mengacu pada beberapa kajian (PT PLN, 2021).

Program *government drilling* bertujuan untuk meningkatkan tingkat keekonomian suatu proyek panas bumi untuk pembangkitan listrik. Dengan asumsi bahwa apabila suatu wilayah kerja panas bumi (WKP) telah mencapai keekonomian maka apabila dilakukan lelang WKP maka area tersebut dapat diminati beberapa pengembang. Dengan adanya beberapa pengembang diharapkan adanya kompetisi dalam memberikan komitmen eksplorasi paling besar yang akan memastikan WKP tersebut dikembangkan. Semakin besar komitmen eksplorasi tersebut artinya semakin besar keseriusan pengembang tersebut untuk mengembangkan WKP tersebut. Namun, jika dalam lelang WKP area hasil program *government drilling* ini hanya dapat menarik satu pengembang maka kompetisi tersebut masih belum tercapai. Lebih jauh lagi apabila satu investor tersebut merupakan pengembang BUMN maka akan lebih mudah, murah dan cepat untuk memberikan izin panas bumi (IPB) secara langsung pada BUMN melalui mekanisme Penugasan pada BUMN tanpa melalui proses tender terbuka. Keadaan akan lebih buruk apabila pengembang BUMN pun tidak tertarik pada WKP hasil *government drilling* ini karena bukan hanya tujuan program tidak tercapai namun bisa saja dianggap program ini memboroskan anggaran APBN. Salah satu penyebabnya adalah metode dan/atau kriteria dalam penentuan area prospek dalam program ini masih belum tepat untuk tujuan diatas.

Dasar pemilihan dua puluh lokasi kandidat program *government drilling* ini masih perlu dikaji kembali karena proses pemilihan yang tidak memiliki dasar yang kuat. Penulis tidak menemukan dokumen yang bisa diacu untuk mengetahui dasar metode dan/atau kriteria apa yang dipergunakan dalam memilih 20 lokasi dari 356 lokasi area prospek yang ada. Metode AHP ini dipergunakan hanya untuk meranking atau prioritisasi 20 area prospek yang sudah ditentukan sebelumnya.

Tabel 6. Nilai Parameter Input Utama Aplikasi DCF Proyek Panas Bumi

No	Area Prospek	Cadangan (MW_e)	Suhu (°C)	Rencana Kapasitas (MW_e)	Keterangan Dalam RUPTL
1	Cisolok-Cisukarame	45	200	20 MWe	Rencana COD @20 MW_e di 2030
2	Nage	46	284	40	Perlu dikaji lebih lanjut
3	Bittuang	24	230	20	Perlu dikaji lebih lanjut

No	Area Prospek	Cadangan (MW_e)	Suhu (°C)	Rencana Kapasitas (MW_e)	Keterangan Dalam RUPTL
4	Tampomas	32	175	45	Rencana COD @45 MW_e di 2030
5	Ciremai	27	200	2x55	Perlu dikaji lebih lanjut
6	Marana	28	160	20	Perlu dikaji lebih lanjut
7	Gn. Endut	38	180	40	Perlu dikaji lebih lanjut
8	Sembalun	11	140	2x10	Perlu dikaji lebih lanjut
9	Guci	20	210	2x55	Rencana COD @55 MW_e di 2030
10	Banda Baru	20	190	10	Perlu dikaji lebih lanjut
11	Sipoholon Ria-Ria	35	180	10	Perlu dikaji lebih lanjut
12	Bora Pulu	123	220	40	Perlu dikaji lebih lanjut
13	Sumani	52	190	20	Perlu dikaji lebih lanjut
14	Gn. Galunggung	220	225	2x55	Perlu dikaji lebih lanjut
15	Gn. Papandayan	21	290	40	Perlu dikaji lebih lanjut
16	Gn. Batur-Kintamani	18	230	40	Perlu dikaji lebih lanjut
17	Lokop	20	210	20	Perlu dikaji lebih lanjut
18	Maritaing	12	200	10*	Tidak ada keterangan
19	Sajau	6	190	5*	Tidak ada keterangan
20	Limbong	12	220	5	Potensi yang dapat dikembangkan

*) analisis penulis
Sumber: diolah dari (Pusat Sumber Daya Mineral Batubara Panas Bumi, 2021) dan (PT PLN, 2021)

Tabel 7. Nilai Parameter Input Tambahan Aplikasi DCF Proyek Panas Bumi

No	Area Prospek	Akses	Infrastruktur	Topo-grafi	Cuaca	Puncak Reservoir	Kerapatan Energi

1	Cisolok-Cisukarame	Baik	Baik	Cukup	Cukup	1.500	2,3
2	Nage	Baik	Baik	Cukup	Cukup	800	5,8
3	Bittuang	Cukup	Kurang	Kurang	Cukup	500	4,8
4	Tampomas	Baik	Baik	Kurang	Cukup	1.000	4,0
5	Ciremai	Baik	Baik	Kurang	Cukup	1.500	5,4
6	Marana	Baik	Baik	Baik	Baik	750	1,6
7	Gn. Endut	Baik	Kurang	Kurang	Kurang	1.000	2,3
8	Sembalun	Baik	Baik	Kurang	Baik	1.000	2,2
9	Guci	Baik	Cukup	Kurang	Kurang	1.300	5,0
10	Banda Baru	Baik	Baik	Baik	Baik	1.250	3,3
11	Sipoholon Ria-Ria	Baik	Baik	Kurang	Baik	800	1,1
12	Bora Pulu	Baik	Baik	Baik	Baik	600	3,7
13	Sumani	Baik	Baik	Cukup	Baik	1500	5,2
14	Gn. Galunggung	Baik	Baik	Cukup	Baik	1000	9,0
15	Gn. Papandayan	Cukup	Cukup	Kurang	Cukup	1500	4,2
16	Gn. Batur-Kintamani	Baik	Baik	Baik	Baik	1000	9,0
17	Lokop	Kurang	Kurang	Cukup	Cukup	900	3,3
18	Maritaing	Baik	Cukup	Cukup	Baik	750	4,0
19	Sajau	Baik	Baik	Baik	Baik	750	1,2
20	Limbong	Kurang	Cukup	Kurang	Cukup	750	2,0

Hasil Tahap Pertama - Perhitungan Parameter Profitabilitas dan Kelayakan Proyek Area Prospek

Hasil perhitungan IRR, NPV, BCR dan PBP dari masing-masing lapangan ditunjukkan pada **Tabel 8**. Nilai IRR dengan variasi nilai dari 17,82% sampai dengan -7,63%. Valuasi proyek berdasarkan nilai NPV bervariasi dari positif USD 510 juta sampai dengan negatif USD 606 juta. Sedangkan nilai BCR paling besar bernilai 1,48 dan nilai BCR terkecil pada angka 0,44.

Empat lokasi dinyatakan sebagai proyek yang layak secara ekonomi dan dua diantaranya juga dinyatakan layak secara finansial. Berdasarkan nilai BCR>1, area prospek yang layak adalah Area Nage, Gunung Galunggung, Bittuang dan Gunung Papandayan. Keempatnya dinyatakan layak secara ekonomi. Sedangkan berdasarkan nilai IRR (IRR≥MARR; dengan MARR=13,5%) dan NPV (NPV>0), dari keempat lokasi tersebut hanya dua lokasi yang juga dikategorikan sebagai lapangan layak secara finansial untuk dikembangkan yaitu Area Nage dan Gunung Galunggung. Jadi dua lokasi (Area Nage dan Gunung Galunggung) dinyatakan layak secara ekonomi maupun secara finansial.

Untuk meningkatkan kelayakan proyek dibutuhkan tambahan insentif yang lain. Insentif ini diharapkan dapat meningkatkan nilai parameter profitabilitas. Insentif dapat berupa insentif teknis dan/atau insentif ekonomi. Contoh insentif teknis misalnya dapat berupa pembangunan infrastruktur menuju area prospek yang dapat mengurangi biaya infrastruktur. Program *government drilling* ini juga bisa dikategorikan sebagai insentif teknis. Contoh insentif ekonomi antara lain pemberian pinjaman lunak dengan bunga rendah (*softloan*). Beberapa pilihan insentif fiskal telah dipaparkan oleh Nugraha et al. (2017).

Keempat area prospek yang dinyatakan layak secara ekonomi memiliki persamaan yaitu memiliki suhu reservoir yang dikategorikan sebagai sistem bersuhu

tinggi (>225°C). Selain itu, faktor biaya dan harga pembelian tenaga listrik juga menjadi faktor yang penting. Area prospek Gunung Galunggung dan Gunung Papandayan yang terletak di Jawa Barat yang memiliki infrastruktur dikategorikan baik, sehingga diasumsikan biaya yang dibutuhkan lebih rendah. Sedangkan Area Nage dan Bittuang yang terletak di Pulau Flores dan Sulawesi memiliki harga pembelian tenaga listrik yang cukup tinggi yaitu pada angka USD 11,29 sen untuk 10 tahun pertama dan USD 10,35 sen untuk dua puluh tahun selanjutnya.

Hasil perankingan area prospek berdasarkan nilai IRR proyek, ditunjukkan pada **Tabel 9**. Urutan tersebut sangat berbeda dengan hasil urutan menggunakan metode AHP (**Tabel 1**). Area-area prospek panas bumi yang terletak di Pulau Jawa mendominasi urutan 10 besar. Sedangkan area prospek panas bumi yang termasuk dalam 10 besar yang terletak di luar Jawa memiliki suhu reservoir dengan kategori suhu tinggi.

Tabel 8. Kelayakan Proyek Lokasi Program Government Drilling Berdasarkan Parameter Profitabilitas

No	Area Prospek	Kapasitas (MW)	Investasi (USD Juta)	IRR Proyek (%)	NPV (USD Juta)	BCR	Kelayakan Proyek
1	Cisolok-Cisukarame	20	96	5,69	-169	0,89	Belum Layak
2	Nage	40	119	17,82	510	1,48	Layak
3	Bittuang	20	80	9,69	-12	1,05	Layak
4	Tampomas	30	130	7,66	-135	0,96	Belum Layak
5	Ciremai	20	97	5,53	-176	0,88	Belum Layak
6	Marana	20	102	5,18	-198	0,86	Belum Layak
7	Gn. Endut	20	134	7,41	-155	0,95	Belum Layak
8	Sembalun	10	113	-7,63	-545	0,5	Belum Layak
9	Guci	10	95	6,35	-146	0,91	Belum Layak
10	Banda Baru	10	56	-6,35	-264	0,69	Belum Layak
11	Sipoholon Ria-Ria	10	66	TDH*)	-626	0,44	Belum Layak
12	Bora Pulu	40	140	2,72	-453	0,84	Belum Layak
13	Sumani	20	102	TDH*)	-606	0,62	Belum Layak
14	Gn. Galunggung	110	285	13,64	554	1,28	Layak
15	Gn. Papandayan	20	76	9,74	-18	1,05	Layak
16	Gn. Batur-Kintamani	15	52	4,83	-123	0,88	Belum Layak
17	Lokop	20	102	TDH*)	-606	0,62	Belum Layak

No	Area Prospek	Kapasitas (MW)	Investasi (USD Juta)	IRR Proyek (%)	NPV (USD Juta)	BCR	Kelayakan Proyek
18	Maritaing	10	56	3,03	-143	0,81	Belum Layak
19	Sajau	5	44	-5,11	-198	0,57	Belum Layak
20	Limbong	5	47	-6,63	-215	0,54	Belum Layak

Keterangan:
*TDH : Tidak dapat dihitung oleh aplikasi.

Tahap Kedua – Perhitungan IRR Inkremental dan Perankingan Final

Tabel 9. Urutan Area Prospek Berdasarkan Nilai IRR Proyek

Ranking	No	Area Prospek	IRR Proyek (%)
1	2	Nage	17,82*)
2	14	Gn. Galunggung	13,64*)
3	15	Gn. Papandayan	9,74
4	3	Bittuang	9,69
5	4	Tampomas	7,66
6	7	Gn. Endut	7,41
7	9	Guci	6,35
8	1	Cisolok-Cisukarame	5,69
9	5	Ciremai	5,53
10	6	Marana	5,18
11	16	Gn. Batur-Kintamani	4,83
12	18	Maritaing	3,03
13	12	Bora-Pulu	2,72
14	19	Sajau	-5,11
15	10	Banda Baru	-6,35
16	20	Limbong	-6,63
17	8	Sembalun	-7.63
18	17	Lokop	TDH*)
19	11	Sipoholon Ria-Ria	TDH*)
20	13	Sumani	TDH*)

Hal pertama yang dilakukan adalah pengurutan area prospek berdasarkan nilai investasi yang dibutuhkan. **Tabel 10** adalah hasil pengurutan tersebut untuk area prospek yang layak. Urutan tersebut ini sangat tergantung pada rencana kapasitas terpasang dan lokasi area prospek. Semakin besar kapasitas terpasang semakin besar investasinya. Lokasi area prospek panas bumi diluar Pulau Jawa membutuhkan investasi lebih besar.

Selanjutnya dilakukan perhitungan IRR inkremental sesuai dengan urutan nilai investasi pada **Tabel 10**. MARR proyek yang diambil adalah 13,5%. Pada Tahap I pada perhitungan pertama adalah perbandingan Area Gunung Galunggung dan Nage menghasilkan ΔIRR < 13,5% maka pilihan terbaiknya adalah proyek dengan investasi lebih kecil, yaitu Area Nage. Namun pada perhitungan selanjutnya menghasilkan ΔIRR > 13,5%, maka pilihan terbaiknya adalah investasi lebih besar, yaitu Area Nage. Pada Tahap selanjutnya merupakan perhitungan IRR inkremental untuk urutan nilai investasi lebih kecil selanjutnya.

Tabel 10. Urutan Area Prospek Yang Layak Berdasarkan Nilai Investasi

No	Area Prospek	Investasi (USD Juta)
1.	Gn. Galunggung	285
2.	Nage	119
3.	Bittuang	80
4.	Gn. Papandayan	76

Tabel 11. Perhitungan IRR Inkremental dan Perankingan Area Prospek Yang Layak

Tahap I	**1-2*)**	**2-3*)**	**2-4*)**
IRR	11%	34%	30%
Keputusan	2*)	2*)	2*)

Tahap II	**1-3*)**	**1-4*)**
IRR	15%	15%
Keputusan	1*)	1*)

Tahap III	**3-4*)**
IRR	12%
Keputusan	4*)

Keterangan:
*urutan sesuai **Tabel 10**

Tabel 12. Urutan Area Prospek Yang Layak Berdasarkan IRR Inkremental

Ranking	No	Area Prospek	Investasi (USD Juta)
1.	2.	Nage	119
2.	1.	Gn. Galunggung	285
3.	4.	Gn. Papandayan	76
4.	3.	Bittuang	80

Hasil akhir perankingan berdasarkan IRR inkremental pada **Tabel 12** menunjukkan bahwa terjadi perubahan peringkat dibandingkan peringkat berdasarkan besarnya investasi (**Tabel 10**). Namun jika dibandingkan dengan ranking berdasarkan IRR, ranking berdasarkan IRR inkremental hasilnya sama untuk empat besar atau proyek yang layak secara ekonomi. Tidak adanya perubahan dalam peringkat ini karenakan jenis proyek yang homogen yaitu proyek panas bumi. Perbedaannya hanya pada parameter-parameter input yang sudah dijelaskan.

Perangkingan Metode IRR Inkremental vs AHP

Kelebihan dari perangkingan IRR inkremental ini dibandingkan metode AHP adalah hasil perangkingan IRR inkremental bisa melihat kelayakan proyek dari proyek-proyek yang akan dilakukan perangkingan. Jadi dengan metode perangkingan tersebut tidak hanya melihat kualitas relatif antar prospek yang diwujudkan dalam ranking, juga bisa melihat bahwa kualitas absolut proyek dengan menilai kelayakannya berdasarkan parameter kelayakan proyek baik sisi ekonomi dan finansial. Metode ini dianggap lebih objektif karena menggunakan nilai-nilai kuantitatif dibandingkan AHP yang mengkuantifikasi parameter kualitatif.

Jika dilakukan integrasi dengan kriteria-kriteria lain untuk perangkingan dengan metode AHP, maka harus dilakukan evaluasi terhadap parameter yang akan digunakan. Empat kriteria parameter seperti suhu reservoir, kualitas infrastruktur, *supply & demand*, dan *heat source* sebaiknya dikeluarkan sebagai kriteria karena sudah masuk ke dalam perhitungan DCF. Parameter suhu menjadi dasar dalam perhitungan perkiraan kapasitas per sumur. Parameter kualitas infrastruktur sudah dipergunakan dalam penentuan biaya infrastruktur yang juga mempengaruhi biaya SAGS. Untuk hasil dari perkiraan *heat source* direpresentasikan dengan kualitas tingkat kerapatan energi dan entalpi. Tingkat *supply & demand* menjadi salah satu faktor dalam penentuan kapasitas yang akan dikembangkan.

Kelemahan metode IRR inkremental ini adalah adanya faktor-faktor seperti faktor non ekonomi dan non teknis yang tidak dapat diakomodir secara langsung dalam analisis ini. Sebagai contoh, ada beberapa parameter kriteria dalam metode AHP (Pusat Sumber Daya Mineral Batubara Panas Bumi, 2021) yang tidak dapat diakomodasi dalam analisis. Parameter

tersebut antara lain parameter status lahan, kelengkapan data, dan kondusivitas sosial. Parameter-parameter tersebut merupakan parameter penting. Bahkan parameter status lahan dan kondusivitas sosial tersebut bisa menjadi menyebabkan suatu proyek dilanjutkan atau tidak (*go or no-go*). Sebagai contoh, Proyek Area Waesano, merupakan lokasi yang menjadi prioritas pertama untuk program *government drilling* yang dilakukan Kementerian Keuangan, telah dimulai sejak 2017 sampai saat ini belum ada kegiatan di lapangan yang berarti. Proyek ini terkendala dengan penolakan masyarakat di sekitar lokasi proyek. Untuk contoh faktor lokasi adalah Proyek Area Graho Nyabu, sejak kegiatan Penugasan Survei Pendahuluan (PSP) yang selesai dilaksanakan dan dilanjutkan ke kegiatan Penugasan Survei Pendahuluan dan Eksplorasi (PSPE), sama seperti Proyek Waesano, tidak nampak ada kegiatan riil di lapangan.

Jadi, menggabungkan hasil perangkingan IRR incremental dengan kriteria non ekonomi bisa menjadi pilihan yang lebih ideal. Dari gabungan kriteria tersebut, kita dapat mengeliminir beberapa lokasi yang sebaiknya tidak direkomendasikan sebagai lokasi untuk program *government drilling*.

KESIMPULAN

Empat lokasi yang dinyatakan layak secara ekonomi berdasarkan nilai BCR>1, yaitu Area Nage, Gunung Galunggung, Bittuang dan Gunung Papandayan. Sedangkan berdasarkan nilai IRR (IRR≥MARR; dengan MARR=13,5%) dan NPV (NPV>0), dari keempat lokasi tersebut hanya dua lokasi yang dinyatakan layak secara finansial yaitu Area Nage dan Gunung Galunggung. Jadi dua lokasi yaitu Area Nage dan Gunung Galunggung dinyatakan layak secara ekonomi maupun secara finansial .

Berdasarkan implementasi metode IRR inkremental hasil perhitungan *discounted cash flow* (DCF), peringkat pertama sampai dengan peringkat keempat secara berturut-turur adalah Area Nage, Gunung Galunggung, Gunung Papandayan dan Bittuang.

Berdasarkan hasil studi ini, direkomendasikan untuk melakukan evaluasi ulang kandidat lokasi-lokasi area prospek untuk program *government drilling* ini. Hal ini karena dari dua puluh kandidat lokasi tersebut, hanya empat lokasi (20%) yang dinyatakan layak secara ekonomi dan dua lokasi (10%) yang dinyatakan layak secara ekonomi dan finansial. Pemilihan lokasi yang tepat akan menjadi salah satu kunci keberhasilan dalam menjalankan program ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi c.q. Koordinator Panas Bumi Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP) atas izin penggunaan data untuk penulisan makalah ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada tim editor yang telah memberikan koreksi serta saran dalam perbaikan tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

Asian Development Bank, 2015. *Unlocking Indonesia's Geothermal Potential*. Asian Development Bank.

Badan Geologi, 2022. *Peta Distribusi dan Sumber Daya Panas Bumi Indonesia 2022*. Bandung.

Badan Geologi, 2016. *Peta Distribusi dan Sumber Daya Panas Bumi Indonesia 2016*. Bandung.

Direktorat Panas Bumi, 2023. *Pengembangan Panas Bumi di Indonesia*. Jakarta.

Direktorat Panas Bumi, 2022. *Pengembangan Panas Bumi di Indonesia*. Jakarta.

Direktorat Panas Bumi, 2016. *Proposed Methodology for Determining Fixed Tariffs for Geothermal Power Projects in Indonesia*. Jakarta

Kementerian ESDM, 2017. *Review of the Target of Geothermal Development Plan*. Jakarta.

Kementerian ESDM, 2007. *Master Plan Study for Geothermal Power Development in the Republic of Indonesia*. Jakarta.

Nugraha, H., Saefulhak, Y., Pangaribuan, B., 2017. *A Study on the Impacts of Incentives to the Geothermal Energy Electricity Price in Indonesia using Production-based Cost Approach*. The 5th Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition (IIGCE). Jakarta.

Pemerintah Indonesia, 2022. *Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik.* Jakarta.

Pemerintah Indonesia, 2021. *Undang-Undang Nomor 7 Tahun 2021 tentang Harmonisasi Peraturan Perpajakan*. Pemerintah Indonesia. Jakarta

Pemerintah Indonesia, 2014. *Undang-Undang Nomor 21 tahun 2014 tentang Panas Bumi*. Pemerintah Indonesia. Jakarta

Pemerintah Indonesia, 2006. *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional*. Jakarta.

PT PLN, 2021. *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2021 sampai dengan Tahun 2030*. Jakarta.

Purwanto, E.H., Suwarno, E., Hakama, C., Pratama, A.R., Herdiyanto, B., 2020. *An Updated Statistic Evaluation of Drilling Performance, Drilling Cost and Well Capacity of Geothermal Fields in Indonesia*. Proceedings World Geothermal Congress.

Pusat Sumber Daya Mineral Batubara Panas Bumi, 2021. *Penentuan Lokasi Untuk Program Pengeboran Sumur Eksplorasi Panas Bumi Oleh Pemerintah*. Bandung.

Quinlivan, P., 2009. *Assessment of Current Costs of Geothermal Power Generation in New Zealand (2007 Basis)*. New Zealand Geothermal Association.

Sinclair Knight Merz, 2013. *Geothermal Tariff Study*. Jakarta.

Partowidagdo, W., 2001. *Pengelolaan Lapangan Minyak dan Gas Bumi*. ITB, Bandung.

Diterima : 29 September 2023
Direvisi : 7 Maret 2024
Disetujui : 31 Agustus 2024

GEOLOGI, MINERALOGI, DAN GEOKIMIA ENDAPAN BAUKSIT LATERIT DI DESA MUKTI JAYA, KABUPATEN SANGGAU, KALIMANTAN BARAT

GEOLOGY, MINERALOGICAL, AND GEOCHEMICAL LATERITE BAUXITE DEPOSITS IN MUKTI JAYA VILLAGE, SANGGAU DISTRICT, WEST KALIMANTAN

Aisha Permatasari[1], S J Suprapto[1], Priatna[1], Tatik Handayani[2], dan Dedi Sunjaya[3]
[1]Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung
[2]Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
[3]PT Aneka Tambang
aishapermatasari19@gmail.com
DOI: https://doi.org/10.47599/bsdg.v19i2.477

ABSTRAK

Geologi Kalimantan Barat khususnya Kabupaten Sanggau terhampar luas batuan asam hingga intermediet yang berumur Kapur Bawah dengan kondisi tektonik yang stabil sehingga memenuhi persyaratan terbentuknya bauksit dengan skala yang ekonomis. Daerah penelitian berada di Desa Mukti Jaya, Kabupaten Sanggau, Provinsi Kalimantan Barat. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik geologi, mineralogi, dan geokimia endapan bauksit. Metodologi penelitian meliputi pemetaan geologi, sumuran uji (*test pit*), dan analisis laboratorium menggunakan metode XRF, XRD, petrografi, dan mineragrafi, serta analisis korelasi dan regresi kandungan unsur Al_2O_3, $RSiO_2$, dan $TSiO_2$. Sebanyak 390 sampel bauksit dianalisis XRF, lima sampel bauksit dianalisis XRD, empat sampel batuan dasar dan dua sampel bauksit dianalisis petrografi, dan dua sampel konkresi bauksit dianalisis mineragrafi. Berdasarkan hasil pemetaan geologi ditemukan batuan granodirit, diorit kuarsa, dan tonalit. Bauksit tersusun oleh mineral kuarsa, gibbsit, kaolinit, hematit, biotit, boehmit, goetit, diaspor, muskovit, plagioklas, klorit, dan magnetit. Dari hasil analisis XRF didapatkan kadar 16,63% s.d. 52,56% Al_2O_3; 14,5% s.d. 66,69% $TSiO_2$; 0,47% s.d. 10,2% $RSiO_2$; dan 3,56% s.d. 32,92% Fe_2O_3. Hasil analisis korelasi diperoleh tingkat hubungan yang sangat kuat dan berkorelasi negatif antara Al_2O_3 dengan $TSiO_2$, serta tingkat hubungan sangat rendah antara Al_2O_3 dengan $RSiO_2$. Dari hasil analisis regresi diperoleh $TSiO_2$ berpengaruh terhadap Al_2O_3, serta $RSiO_2$ tidak berpengaruh terhadap Al_2O_3.

Kata kunci: bauksit, reaktif silika, konkresi, oolitik, pisolitik, Mukti Jaya, Sanggau

ABSTRACT

The geology of West Kalimantan, especially Sanggau Regency, contains a wide range of acidic to intermediate rocks of Lower Cretaceous age with stable tectonic conditions that meet the requirements for the formation of bauxite on an economical scale. The research area is in Mukti Jaya Village, Sanggau Regency, West Kalimantan Province. This research aims to determine the geology, mineralogical, and geochemical characteristics of bauxite deposits. The research methodology includes geological mapping, test pits, and laboratory analysis using XRF, A total of 390 bauxite samples were analyzed by XRF, 5 bauxite samples were analyzed by XRD, 4 bedrock samples and 2 bauxite samples were analyzed petrographically, and 2 bauxite concretion samples were analyzed mineragraphically. Based on the results of geological mapping, granodirite, quartz diorite and tonalite rocks were found. Bauxite is composed of the minerals quartz, gibbsite, kaolinite, hematite, biotite, boehmite, goethite, diaspor, muscovite, plagioclase, chlorite, and magnetite. From the results of XRF analysis content obtained 16.63% – 52.56% Al_2O_3; 14.5% – 66.69% $TSiO_2$; 0.47% – 10.2% $RSiO_2$; and 3.56% – 32.92% Fe_2O_3. The results of the correlation analysis showed a very strong and negatively correlated level of relationship between Al_2O_3 and $TSiO_2$, as well as a very low level

of relationship between Al_2O_3 and $RSiO_2$. From the results of the regression analysis, it was found that $TSiO_2$ had an effect on Al_2O_3 and $RSiO_2$ had no effect on Al_2O_3.

***Keywords**: bauxite, reactive silica, concretion, oolitic, pisolithic, Mukti Jaya, Sanggau*

PENDAHULUAN

Bauksit adalah lapisan konkresi yang mengandung sekelompok mineral kaya alumina, mengandung besi, sejumlah kecil silika dan mineral lempung lainnya, digunakan untuk produksi logam aluminium (Kurniasih, drr. 2010). Bauksit terbentuk dari hasil pelapukan batuan dasar, yang umumnya dapat berlangsung secara intensif pada daerah tropis-subtropis.

Untuk dapat terbentuk bauksit dalam jumlah ekonomis memerlukan kurun waktu 100.000 hingga beberapa juta tahun (Gow dan Lozej, 2008). Oleh karena itu, kondisi tektonik yang stabil berkelanjutan dalam kurun waktu yang lama sangat penting dalam proses pembentukkan bauksit.

Bauksit terbentuk dari pelapukan batuan yang mempunyai kadar aluminium tinggi, kadar besi rendah dan sedikit kadar kuarsa bebas. Pada saat batuan mengalami pelapukan kimiawi, unsur kimia silika (Si) terlarut dan terlepas dari ikatan kristal begitu juga sebagian unsur besi, alumina, titanium, dan mineral oksida terkonsentrasi sebagai endapan residu. Sebagai bijih alumina, bauksit mengandung sedikitnya 35% Al_2O_3 dan ≤5% SiO_2. Mineral utamanya yang mengandung Al_2O_3 yaitu gibbsit, boehmit, dan diaspor.

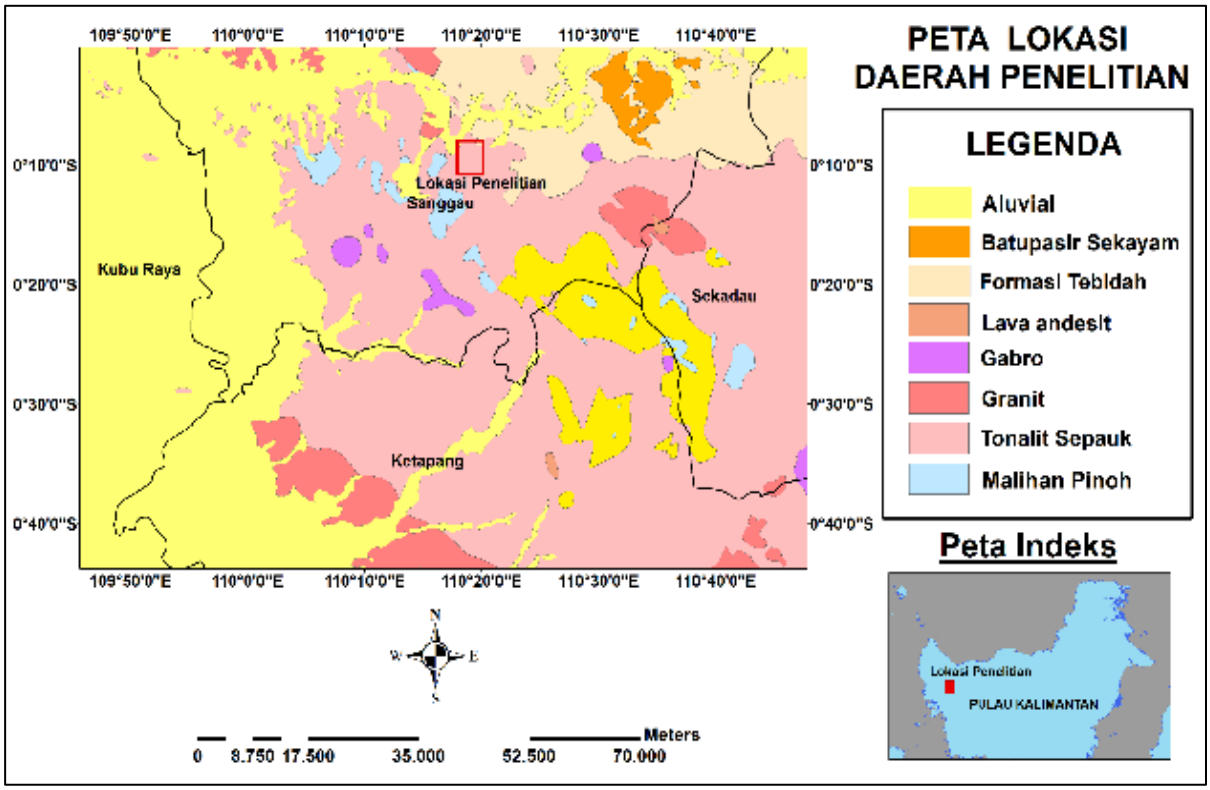
Kandungan silika pada bauksit dibagi menjadi dua jenis, yaitu total silika dan silika reaktif. Silika total, yaitu total keseluruhan silika yang ada di bijih bauksit, termasuk silika reaktif dan non-reaktif. Batas toleransi total silika untuk produksi alumina adalah ≤20%. Silika reaktif, yaitu silika yang mudah larut dalam proses *Bayer* (proses ekstraksi bijih bauksit menjadi alumina) sehingga kadarnya cukup penting untuk diketahui. Kadar tinggi silika reaktif mengganggu proses pemurnian alumina. Umumnya silika reaktif terkandung dalam mineral lempung.

Menurut Symposium (1952) bauksit terdiri tiga bentuk, yaitu pissolitik atau oolitik, *sponge*, dan amorfous. Pisolitik berdiameter >2 milimeter dan oolitik berdiameter <2 milimeter. *Sponge ore* bersifat *porous* merupakan sisa dari batuan asal dengan komposisi utama gibbsit. *Amorfous* umumnya berupa lempung.

Menurut Valeton (1972) pembentukan endapan laterit bauksit dikontrol oleh beberapa faktor yaitu batuan asal yang kaya akan unsur Al, daerah tropis-subtropis dengan curah hujan yang tinggi, temperatur harian lebih besar dari 20°C, topografi bergelombang, terbentuk di atas muka air tanah, serta pada lingkungan tektonik stabil.

Profil endapan laterit bauksit dengan zona lengkap terdiri dari lima zona lapisan tanah (Sunjaya, drr. 2018), yaitu lapisan organik (*top soil*) mengandung humus organik hitam merupakan bagian atas dari lapisan, laterit paleosol (latosol) terdapat lempung kaolinitik berwarna kuning kecoklatan, zona bauksit dicirikan oleh kehadiran konkresi yang dikelilingi oleh lempung, boulder sisa pecahan batuan yang mengalami pelapukan, dan zona pucat atau 'kong' lapisan lempung dengan komposisi kaolinit putih kemerahan.

Wilayah Kalimantan Barat khususnya Kabupaten Sanggau terhampar luas batuan asam hingga intermediet yang berumur Kapur Bawah dengan kondisi tektonik yang stabil sehingga berpotensi untuk terbentuknya endapan bauksit dengan skala ekonomis. Secara administratif lokasi penelitian berada di Desa Mukti Jaya, Kecamatan Meliau, Kabupaten Sanggau, Provinsi Kalimantan Barat. Lokasi penelitian masuk ke dalam wilayah Izin Usaha Pertambangan Meliau PT Aneka Tambang Tbk, Kalimantan Barat (Gambar 1).



Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian

METODOLOGI

Data pada penelitian ini terdiri dari data sekunder dan data primer. Data sekunder berupa geologi regional dan tektonik daerah penelitian. Data primer didapatkan dari hasil pemetaan geologi, sumur uji (*test pit)*, dan analisis laboratorium.

Pelaksanaan *test pit* berdasarkan instruksi kerja PT Aneka Tambang ketentuan penggalian *test pit* panjang 80 cm hingga 100 cm dengan arah utara-selatan dan sisi lebar 40 cm hingga 60 cm dengan arah barat–timur.

Pemetaan geologi dilakukan untuk mengetahui batuan dasar yang berpotensi menghasilkan endapan bauksit. Untuk mendapatkan data sebaran vertikal dilakukan pembuatan 226 sumur uji dan terkumpul 390 sampel. Sampel sumur uji diambil dalam interval kedalaman masing-masing dua meter dengan metode *channel sampling*. Analisis petrografi dilakukan terhadap empat sampel batuan dasar untuk mengetahui komposisi dan jenis batuan menggunakan mikroskop polarisasi dengan merk Zeiss. Analisis mineragrafi dilakukan terhadap dua sampel konkresi menggunakan mikroskop refleksi dengan merk Zeiss untuk mengetahui struktur dan komposisi batuan. Analisis petrografi dan mineragrafi dilakukan di Laboratorium mikroskop Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung. Analisis XRD dilakukan untuk mengetahui komposisi mineral dari lima sampel bauksit menggunakan alat XRD MAXima di Laboratorium Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas bumi (PSDMBP). Analisis geokimia dilakukan terhadap 226 sampel untuk mengetahui kandungan unsur oksida Al_2O_3, $TSiO_2$, $RSiO_2$, dan Fe_2O_3 menggunakan metode XRF di Laboratorium PT Aneka Tambang. Analisis korelasi dan regresi dilakukan terhadap kandungan unsur Al_2O_3, $RSiO_2$, dan $TSiO_2$, menggunakan aplikasi Ms. Excel dan IBM SPSS Statistic 25.

X-Ray Fluoresence (XRF) digunakan untuk menentukan kandungan unsur dan persentasenya dalam sampel. *X-Ray*

Diffraction (XRD) adalah analisis yang dilakukan untuk mengidentifikasi material kristalit (Hakim, drr. 2019).

Korelasi

Korelasi adalah metode untuk menentukan eratnya hubungan antara dua variabel atau lebih yang digambarkan dengan besarnya koefisien korelasi. Ukuran keeratan hubungan antara dua variabel atau lebih ditentukan oleh besar kecilnya nilai koefesien korelasi. Besar kecilnya koefisien korelasi tidak menggambarkan hubungan sebab akibat antara dua variabel atau lebih, melainkan hubungan linier antar variabel (Subandriyo, 2020).

Regresi Linear

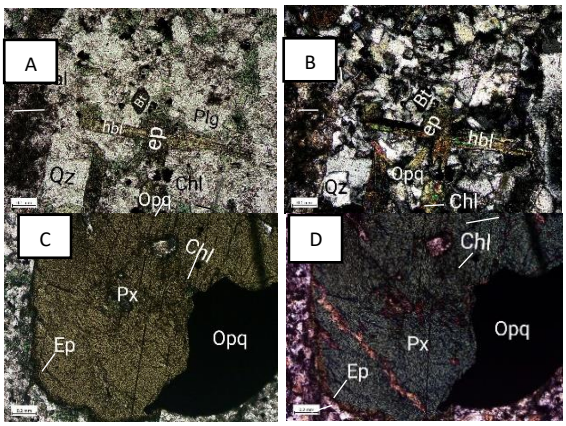
Analisis regresi untuk mengetahui hubungan antar variabel, yang didefinisikan oleh satu atau dua variabel. Jika hanya ada satu variabel bebas disebut analisis regresi sederhana dan bila lebih dari satu maka analisis regresinya disebut regresi linier berganda. Disebut berganda karena memperhitungkan pengaruh beberapa variabel bebas dan variabel tak bebas. Regresi linier berganda adalah model linier yang mencakup lebih dari satu barisan variabel bebas. Analisis regresi linear berganda dilakukan untuk mengetahui arah dan besarnya pengaruh terhadap variabel bebas satu dengan variabel bebas yang lain (Yuliara, 2016).

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

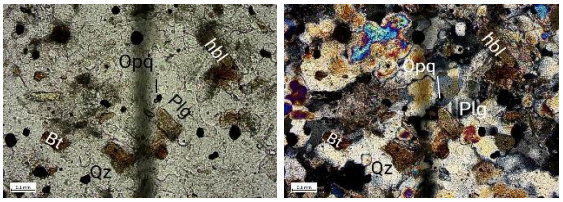
Petrografi

Hasil analisis petrografi menunjukkan bahwa batuan dasar di area penelitian terdiri dari andesit, tonalit, granodiorit, dan diorit kuarsa. Sampel dari satuan litologi andesit (AA1) tidak berwarna, hijau hingga kecoklatan; bentuk kristal subhedral hingga anhedral; holokristalin; ukuran butir 0,05-4 milimeter komposisi mineral tersusun oleh 67% plagioklas, 7% hornblende, 5% biotit, 5% klorit dan 5% mineral opak 4%, kuarsa, 2% kalsit, 2% muskovit, 2% piroksen, 1% epidot (Gambar 2). Berdasarkan klasifikasi Streckeisen (1978) sampel ini adalah andesit.



Gambar 2. Fotomikrograf sampel andesit (AA1) pengamatan nikol sejajar (A dan C) nikol silang (B dan D). Keterangan: Cal = kalsit, Bt = biotit, hbl = hornblende, ep = epidot, Plg = plagioklas, Qz = kuarsa, Chl = klorit, Ms = muskovit, Px = piroksen, dan Opq = opak

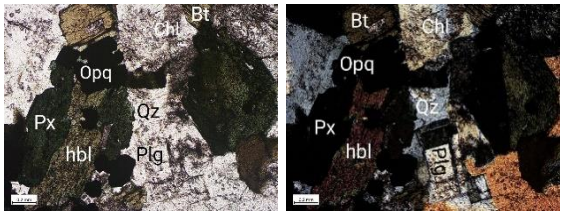
Sampel dari satuan litologi tonalit (TA2) tidak berwarna, kecoklatan hingga biru; bentuk euhedral hingga anhedral; holokristalin; ukuran butir 0,1-0,7 milimeter dengan komposisi mineral tersusun oleh 40% kuarsa, 33% plagioklas, 15% biotit, 5% hornblende, 4% muskovit, dan 3% opak. (Gambar 3). Berdasarkan klasifikasi Streckeisen (1976) sampel ini adalah jenis batuan tonalit.



Gambar 3. Fotomikrograf sampel tonalit (TA2), pengamatan nikol sejajar (kiri), nikol silang (kanan). Keterangan: Bt = biotit, hbl = hornblende, Plg = plagioklas, Qz = kuarsa, Ms = muskovit, dan Opq = opak

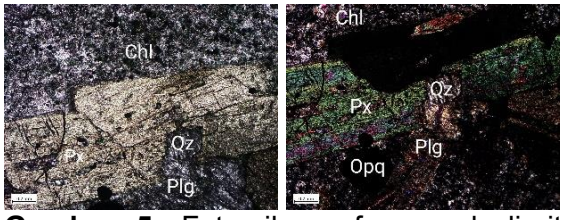
Sampel dari satuan litologi granodiorit (GA3) tidak berwarna hingga kecoklatan; bentuk kristal subhedral hingga anhedral; holokristalin; ukuran butir 0,2-2,4 milimeter komposisi mineral 55% plagioklas, 35% kuarsa, 5% biotit, 2% hornblende, 2% opak,

dan 1% klorit. (Gambar 4). Berdasarkan klasifikasi Streckeisen (1976) sampel ini adalah jenis batuan granodiorit.



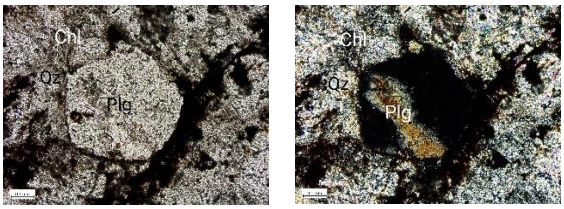
Gambar 4. Fotomikrograf sampel granodiorit (GA3), pengamatan nikol sejajar (kiri) nikol silang (kanan). Keterangan: Bt = biotit, hbl = hornblende, Plg = plagioklas, Qz = kuarsa, Chl = klorit, Px = piroksen, dan Opq = opak

Sampel dari satuan litologi diorit kuarsa (DKA4) tidak berwarna hingga kecoklatan; bentuk kristal subhedral hingga anhedral; holokristalin; ukuran butir 0,1-5 milimeter komposisi mineral 53% plagioklas, 15% hornblende, 10% kuarsa, 10% klorit, 5% piroksen, dan 5% opak. (Gambar 5). Berdasarkan klasifikasi Streckeisen (1976) sampel ini adalah jenis batuan diorit kuarsa.

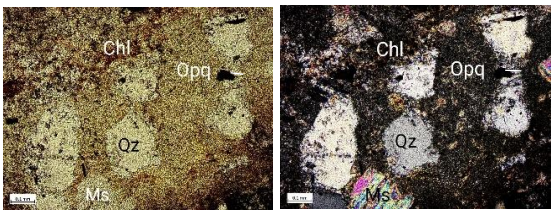


Gambar 5. Fotomikrograf sampel diorit kuarsa (DKA4), pengamatan nikol sejajar sampel (kiri) nikol silang (kanan). Keterangan: Plg = plagioklas, Qz = kuarsa, Chl = klorit, Px = piroksen, dan Opq = opak

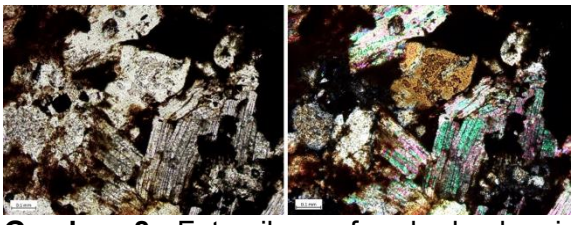
Pada pengamatan petrografi sampel bauksit dengan bentuk konkresi oolitik (OA5) komposisi mineral 10% klorit, 5% kuarsa, dan 2% plagioklas (Gambar 6). Pada sampel bauksit dengan bentuk konkresi pisolitik (PA6) komposisi mineral 15% muskovit, 10% klorit, dan 7% kuarsa. (Gambar 7), serta terlihat pola konkresi pisolitik dimana terdapat kumpulan mineral muskovit yang membentuk pola melingkar, kuarsa berada di luar lingkaran tersebut (Gambar 8).



Gambar 6. Fotomikrograf sampel konkresi oolitik (OA5), pengamatan nikol sejajar (kiri), nikol silang (kanan). Keterangan: Plg = plagioklas, Qz = kuarsa, dan Chl = klorit



Gambar 7. Fotomikrograf sampel konkresi pisolitik (PA6), pengamatan nikol sejajar sampel (kiri)nikol silang (kanan). Keterangan: Qz = kuarsa, Chl = klorit, Ms = muskovit, dan Opq = opak

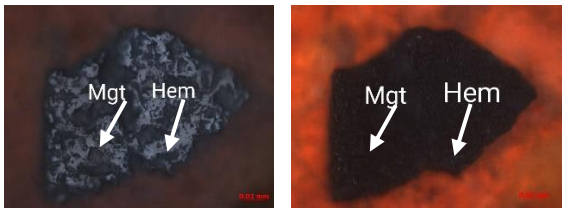


Gambar 8. Fotomikrograf pola konkresi pisolitik (PA6), pengamatan nikol sejajar sampel dan nikol silang

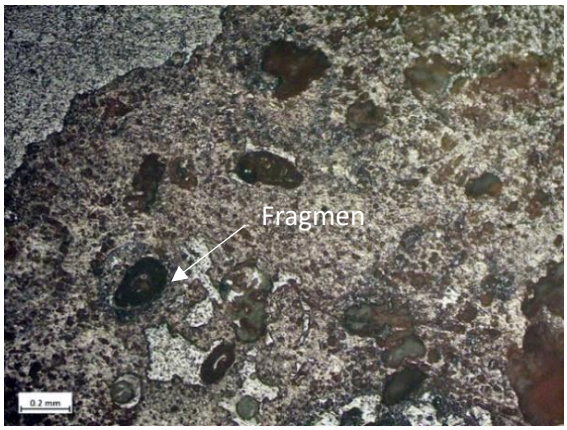
Mineragrafi

Berdasarkan hasil pengamatan mikroskopis sayatan poles, pada sampel oolitik (OP1) teridentifikasi mineral magnetit sebagian tergantikan oleh hematit, dan dikelilingi oleh *hydrous iron oxide*. Persentase magnetit yang tergantikan oleh hematit ±5% (Gambar 9). Serta dijumpai fragmen berbentuk membulat berukuran <2mm di antara lempung (Gambar 10). Pada sampel oolitik (PP2) teridentifikasi mineral magnetit sebagian tergantikan oleh hematit, dan dikelilingi oleh hydrous iron oxide.

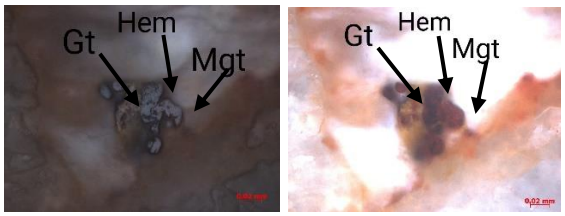
Persentase magnetit yang tergantikan oleh hematit ±3% (Gambar 11).



Gambar 9. Fotomikrograf sampel konkresi oolitik (OP1), pengamatan nikol sejajar sampel (kiri) nikol silang (kanan). Keterangan: Hem = hematit dan Mgt = Magnetit



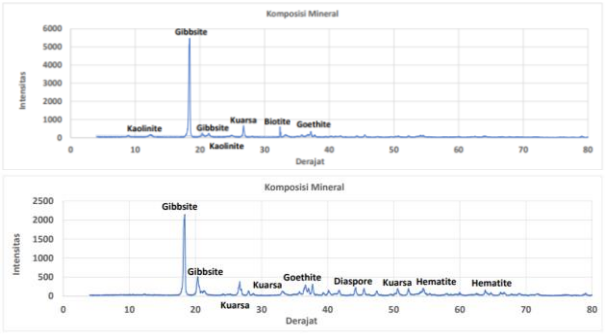
Gambar 10. Fotomikrograf pola konkresi oolitik (OP1)



Gambar 11. Fotomikrograf sampel konkresi pisolitik (PP2), pengamatan nikol sejajar sampel (kiri) dan nikol silang (kanan). Keterangan: Hem = hematit, Gt = Goethit, dan Mgt = Magnetit

X-ray Diffraction (XRD)

Berdasarkan hasil analisis XRD, endapan bauksit laterit di daerah penelitian tersusun oleh mineral kuarsa, gibbsit, kaolinit, hematit, biotit, boehmit, goetit, dan diaspor (Gambar 12).



Gambar 12. Grafik hasil analisis XRD

X-ray Fluoresence (XRF)

Pada Blok Y yang seluruh batuan dasarnya adalah granodiorit, dilakukan test pit sebanyak 225 titik dengan 390 sampel. Perhitungan statistik hasil analisis XRF sebanyak 390 sampel dibuat komposit sehingga dihasilkan 225 data.

Tabel 1. Analisis statistik $TSiO_2$

$TSiO_2$	
Mean	29,0822381
Standard Error	0,680099185
Median	26,105
Mode	28,58
Standard Deviation	9,85557352
Sample Variance	97,13232942
Kurtosis	1,449612907
Skewness	1,250618452
Range	52,19
Minimum	14,5
Maximum	66,69
Sum	6107,27
Count	210

Tabel 2. Analisis statistik $RSiO_2$

$RSiO_2$	
Mean	76,23995556
Standard Error	42,49311029
Median	4,38
Mode	4,61
Standard Deviation	637,3966543
Sample Variance	406.274,4949
Kurtosis	90,04006283
Skewness	9,332208469
Range	7.124,53
Minimum	0,47
Maximum	7125
Sum	17153,99
Count	225

Tabel 3. Analisis statistik Al_2O_3

Al_2O_3	
Mean	41,54742222
Standard Error	0,396376052
Median	43,1
Mode	44,6
Standard Deviation	5,945640774
Sample Variance	35,35064422
Kurtosis	1,336793105
Skewness	-1,067033741
Range	35,93
Minimum	16,63
Maximum	52,56
Sum	9348,17
Count	225

Tabel 4. Analisis statistik Fe_2O_3

Fe_2O_3	
Mean	7,070904762
Standard Error	0,236891395
Median	6,27
Mode	6,6
Standard Deviation	3,432882455
Sample Variance	11,78468195
Kurtosis	28,45762771
Skewness	4,626976633
Range	29,36
Minimum	3,56
Maximum	32,92
Sum	1484,89
Count	210

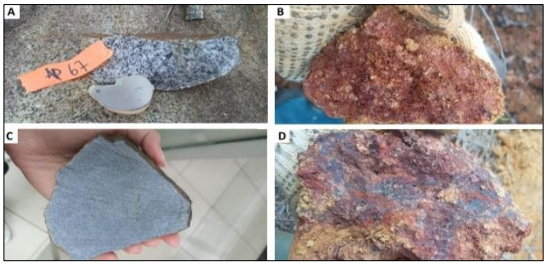
PEMBAHASAN

Geologi Daerah Penelitian

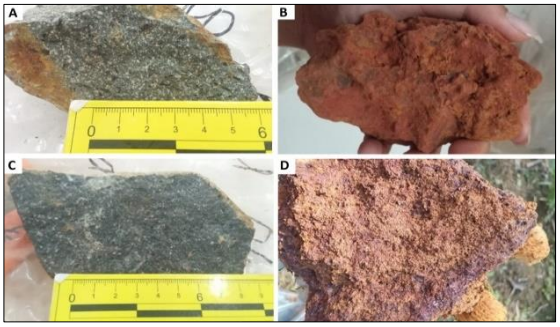
Berdasarkan peta geologi lembar Pontianak/Nangataman, geologi daerah penelitian masuk ke dalam kelompok batuan Tonalit Sepauk meliputi luasan 2 km x 3 km di Desa Mukti Jaya, Kabupaten Sanggau, Provinsi Kalimantan Barat. Litologi di daerah penelitian berdasarkan hasil pemetaan geologi (Gambar 13) dan analisis petrografi, terdiri dari granodiorit, tonalit, diorit kuarsa, andesit dan endapan aluvial.

Litologi yang dominan di daerah penelitian adalah granodiorit, meliputi ±70% luas area. Selebihnya masing-masing litologi memiliki luas sebaran hampir sama, yakni terdiri dari tonalit, diorit kuarsa, andesit, dan endapan aluvial.

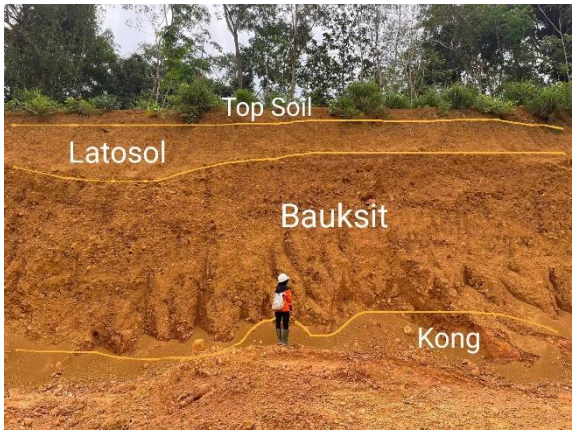
Pelapukan batuan dasar (Gambar 15) akan mempengaruhi kenampakan megaskopis dari bauksit antara lain warna, ukuran butir mineral kuarsa, dan tekstur konkresi. Berdasarkan hasil pengamatan pada *test pit* terdapat perbedaan kenampakan megaskopis bauksit dari masing-masing batuan dasar, antara lain warna, ukuran butir dan kelimpahan kuarsa, serta tekstur konkresi. Bauksit dengan batuan dasar tonalit dan granodiorit mempunyai kelimpahan kuarsa 20% hingga 30%, bauksit dengan batuan dasar diorit kuarsa dan andesit mempunyai kelimpahan kuarsa 5% hingga 15% (Gambar 14).



Gambar 13. Batuan dasar dan bauksit yang dihasilkan. Granodiorit (A) dengan bauksit warna merah kecoklatan, kuarsa berukuran 1-3 mm kelimpahan 20-30%, berbintik-bintik berwarna ungu (B). Tonalit (C) dengan bauksit warna merah-orange, kuarsa berbutir halus <1 mm kelimpahan 20-30% (D)



Gambar 14. Batuan dasar dan bauksit yang dihasilkan. Diorit (A) dengan bauksit warna merah kecoklatan, persebaran kuarsa tidak merata kelimpahan 5-15%. (B). Andesit (C) dengan bauksit warna coklat kemerahan, konkresi rapuh, kelimpahan kuarsa 5-15%. (D)



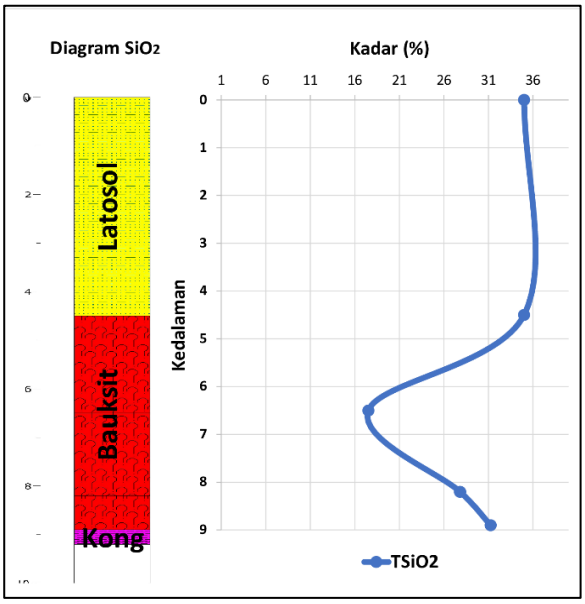
Gambar 15. Profil endapan bauksit laterit

Karakteristik Mineralogi

Laterit merupakan produk hasil lapukan batuan, pada saat batuan mengalami pelapukan kimiawi, unsur kimia silika (Si) terlarut dan terlepas dari ikatan kristal begitu juga sebagian unsur besi, alumina, titanium, dan mineral oksidasi terkonsentrasi sebagai endapan residu. Sedangkan kristal kuarsa akan tertinggal di bagian atas (Harraz, 2013).

Kualitas bauksit di daerah penelitian dapat diinterpretasikan berdasarkan kelimpahan kuarsa pada zona latosol. Pengamatan kelimpahan kuarsa dilakukan terhadap singkapan dinding latosol dan hasil penggalian sedalam 20 cm untuk mendapatkan data kelimpahan kuarsa pada zona latosol dengan klasifikasi <10% kuarsa adalah *low silica*, >10-<35% kuarsa adalah *medium silica*, dan >35% kuarsa adalah *high silica*. Berdasarkan kelimpahan kuarsa tersebut dapat diinterpretasikan jenis batuan dasar yang mengacu pada klasifikasi QAPF batuan plutonik (Streckeisen, 1976) dan klasifikai QAPF (Streckeisen, 1978). Berdasarkan hasil pemetaan laterit tersebut digunakan untuk dasar penentuan titik *test pit* dan kelimpahan $TSiO_2$ pada zona bauksit (Gambar 16).

Berdasarkan hasil analisis XRD sampel bauksit dari *test pit* di daerah penelitian, mineral penyusun terdiri dari kuarsa, gibbsit, kaolinit, hematit, biotit, boehmit, goetit, dan diaspor. Pada bauksit dengan batuan dasar granodiorit terdapat mineral kuarsa, gibbsit, kaolinit, hematit, biotit, goetit, dan diaspor. Pada bauksit dengan batuan dasar tonalit terdapat mineral kuarsa, gibbsit, kaolinit, hematit, biotit, boehmit, goetit, dan diaspor. Pada bauksit dengan batuan dasar diorit kuarsa terdapat mineral kuarsa, gibbsit, dan goetit.



Gambar 16. Diagram sebaran vertikal SiO_2.

Karakteristik Geokimia

Berdasarkan hasil analisis XRF pada blok Y 16,63% s.d.52,56% Al_2O_3; 14,5% s.d.66,69% $TSiO_2$; 0,47% s.d.10,2% $RSiO_2$; dan 3,56% s.d.32,92% Fe_2O_3. Batas kadar layak yang ditetapkan pihak perusahaan untuk daerah penelitian yaitu <25% $TSiO_2$; >41% Al_2O_3; <4% $RSiO_2$; dan <9% Fe_2O_3. Sehingga area dengan luas ± 21.700 hektar memenuhi batas kadar layak yang ditetapkan oleh pihak perusahaan. Berdasarkan hasil analisis statistik $TSiO_2$ memiliki nilai rata-rata 29,08% dengan data yang dimiliki adalah 210 data (Tabel 1). $RSiO_2$ memiliki nilai rata-rata 76,24% dengan data yang dimiliki adalah 225 data (Tabel 2). Al_2O_3 memiliki nilai rata-rata 41,55% dengan data yang dimiliki adalah 225 data (Tabel 3). Fe_2O_3 memiliki nilai rata-rata 7,07% dengan data yang dimiliki adalah 210 data (Tabel 4).

Analisis XRF dilakukan pada sampel konkresi bauksit yang sudah dicuci

sehingga berdasarkan diagram *scatter plot* menunjukkan bahwa Al_2O_3 memiliki korelasi negatif dengan $TSiO_2$ yang ditunjukkan oleh kecenderungan menurun dengan nilai koefisien korelasi yang didapatkan sebesar 0,91 atau mempunyai tingkat hubungan sangat kuat. Al_2O_3 dan $RSiO_2$ memiliki nilai koefisien korelasi sebesar 0,38 atau mempunyai tingkat hubungan rendah (Gambar 17).

Al adalah unsur dengan mobilisasi rendah sehingga cenderung akan tertinggal di tempatnya saat proses pelarutan, sedangkan Si adalah unsur dengan mobilisasi tinggi sehingga akan terbawa saat proses pelarutan. Berdasarkan konsep tersebut jika Al memiliki kadar tinggi maka kadar Si akan rendah. Reaktif silika adalah silika yang mudah larut keterdapatannya pada lempung. Sebelum analisis XRF, bauksit dicuci terlebih dahulu untuk menghilangkan lempung yang menempel pada konkresi bauksit sehingga ketika dianalisis kadar reaktif silika tidak memiliki hubungan dengan kadar Al_2O_3. Korelasi unsur dapat digunakan untuk acuan dalam eksplorasi bauksit agar didapatkan bauksit dengan kadar alumina yang tinggi.

Regresi linear ini dilakukan antara unsur Al_2O_3 dengan $TSiO_2$ dan $RSiO_2$ untuk mengetahui pengaruh antara unsur tersebut. Analisis regresi dilakukan dengan dua cara yaitu, analisis simultan dan analisis parsial. Kadar $TSiO_2$ dan $RSiO_2$ secara bersama-sama berpengaruh terhadap kadar Al_2O_3. Kadar $TSiO_2$ secara parsial berpengaruh terhadap kadar Al_2O_3. Kadar $RSiO_2$ secara parsial tidak berpengaruh terhadap kadar Al_2O_3.

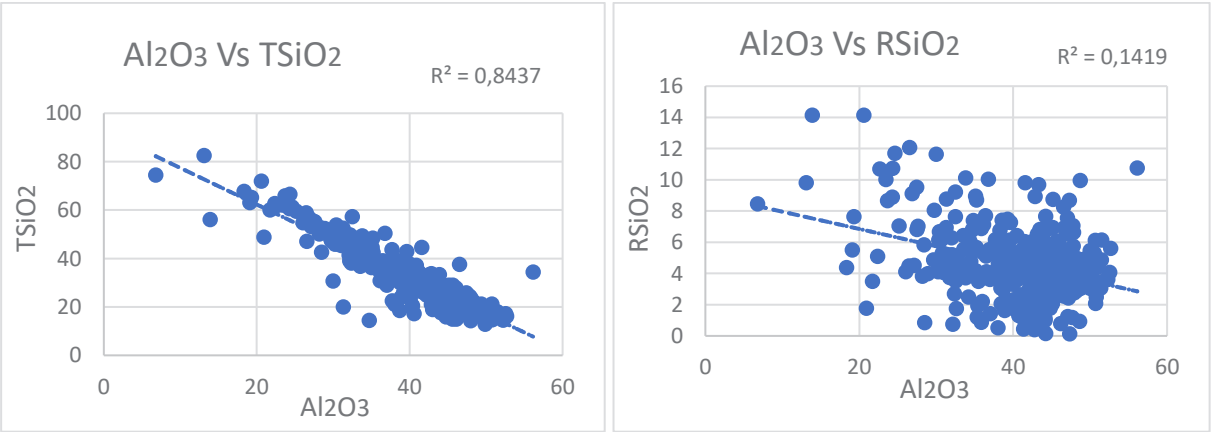
KESIMPULAN

Batuan dasar di area penelitian yang menghasilkan endapan laterit bauksit terdiri dari granodiorit, tonalit, diorit kuarsa, dan andesit yang masing-masing menghasilkan karakteristik mineralogi bauksit yang berbeda. Bauksit pada batuan dasar tonalit dan granodiorit mempunyai kelimpahan kuarsa 20 s.d. 30%, bauksit dengan batuan dasar diorit kuarsa dan andesit mempunyai kelimpahan kuarsa 5 s.d. 15%.

Endapan bauksit tersusun oleh mineral kuarsa, gibbsit, kaolinit, hematit, biotit, boehmit, goetit, diaspor, muskovit, dan klorit.

Pada sampel konkresi bauksit yang sudah dicuci menunjukkan bahwa Al_2O_3 memiliki korelasi negatif dan tingkat hubungan sangat kuat dengan $TSiO_2$. Kemudian Al_2O_3 dengan $RSiO_2$ mempunyai tingkat hubungan sangat rendah atau tidak memiliki hubungan.

Kadar $TSiO_2$ dan $RSiO_2$ secara bersama-sama berpengaruh terhadap kadar Al_2O_3. Kadar $TSiO_2$ secara parsial berpengaruh terhadap kadar Al_2O_3. Kadar $RSiO_2$ secara parsial tidak berpengaruh terhadap kadar Al_2O_3.



Gambar 17. Diagram korelasi unsur Al_2O_3 dengan $TSiO_2$ dan $RSiO_2$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Manajemen PT Aneka Tambang, yang telah memberikan izin untuk melakukan penelitian dan mempublikasikan hasil penelitian di area IUP MCU PT ANTAM. Terima kasih kepada Manajemen Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP) yang telah memberikan izin melakukan preparasi dan analisis sampel. Terima kasih juga kepada Manajemen Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung yang telah membantu dalam proses penulisan.

DAFTAR PUSTAKA

ANTAM (2022). Mencapai Hasil Terbaik dan Melampaui Ekspektasi. *Annual Report*, 327.

Gow, N. N., & Lozej, G. P. (2008). *Bauxite.* Ontario: Geoscience Canada Reprint Series 6.

Hakim, L., Dirgantara, M., & Nawir, M. (2019). Karakterisasi Struktur Material Pasir Bongkahan Galian Golongan C Dengan Menggunakan X-Ray Difraction (X-RD) Di Kota Palangkaraya. *Jurnal Jejaring Matematika dan Sains*, 44.

Harraz, H. Z. (2013). Introduction to sedimentary ore deposits, 10-14..

Kurniasih, D., Purwoko, B., & Meilasari, F. (2022). Estimasi Perhitungan Sumberdaya Bauksit Menggunakan Luas Area Pengaruh Metode Poligon Pada Blok Sungai Ronggas PT.KALBAR Bui Perkasa Kecamatan Tayan Hilir Kabupaten Sanggau Provinsi Kalimantan Barat. 1-2.

Moss, S. J., & Wilson, M. E. 1998. Biogeographic implications of the Tertiary palaeogeographic evolution of Sulawesi and Borneo. *Biogeography and geological evolution of SE Asia*, 138.

Pieters, P. E., & Sanyoto, P. (1993). Geology of the Pontianak/Nangataman Sheet area, Kalimantan: 1: 250,000. *Geological Research and Development Centre, Bandung, Indonesia.* 1-2.

Streckeisen, A. (1976). To each plutonic rock its proper name. *Earth-science reviews*, 12(1), 1-33.

Streckeisen, A. (1978). IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Classification and Nomenclature of Volcanic Rocks, Lamprophyres, Carbonatites and Melilite Rocks. Recommendations and Suggestions. Neues Jahrbuch fur Mineralogie. Stuttgart. *Abhandlungen*, 143, 1-14.

Subandriyo, B. (2020). Analisis Korelasi dan Regresi. *Bahan Ajar*, 1.

Sunjaya, D., Nugraheni, R., Hindarto, A., & Semedie, T. (2018). Characteristics of Bauxite at the Quartz Diorite Laterite in Tayan, West Kalimantan. *MGEI Southwest Pacific Resources*, 93-95.

Suwarna, N., de Keyser, F., Langford, R. P., & Trail, D. S. (1993). Geologi Lembar Singkawang, Kalimantan.

Symposium, C. (1952). *Problem of Clay and Laterit Genesis.* New York: The America Institute of Mining and Metallurgical Engineers.

Valeton. (1972). *Bauxites.* Elsevie: Developments in Soil Science.

Yuliara, I. M. (2016). Regresi Linier Berganda. 1-2.

Diterima : 16 Mei 2024
Direvisi : 25 Juli 2024
Disetujui : 31 Agustus 2024

IDENTIFIKASI KANDUNGAN LITIUM PADA BATUAN FILIT KOMPLEKS LUK ULO, JAWA TENGAH

LITHIUM IDENTIFICATION ON PHYLLITE FROM THE LUK ULO COMPLEX, CENTRAL JAVA

Isyqi[1], Nugroho Imam Setiawan[2], dan Ferian Anggara[2]
[1]Pusat Riset Sumber Daya Geologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional
[2]Departemen Teknik Geologi, Universitas Gadjah Mada
Isyq001@brin.go.id
DOI: https://doi.org/10.47599/bsdg.v19i2.470

ABSTRAK

Produksi baterai litium-ion di Indonesia akan lebih praktis jika Indonesia juga memiliki cadangan litium. Batuan metapelitik dapat menjadi salah satu material alternatif penghasil litium yang cukup potensial. Batuan filit yang termasuk dalam batuan metapelitik ditemukan tersingkap di Kompleks Luk Ulo, Jawa Tengah. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kandungan litium dan mineralogi batuan filit Kompleks Luk Ulo sebagai model analogi keterdapatan litium pada batuan sejenis. Metode yang digunakan meliputi survei lapangan, analisis petrografi, analisis XRD, dan analisis ICP AES/MS. Filit Kompleks Luk Ulo tersingkap pada beberapa lokasi, memiliki skitositas yang berkembang cukup baik dengan komposisi mineral utama berupa kuarsa, grafit, klorit, dan mika putih. Litium dalam filit Komplek Luk Ulo memiliki konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan konsentrasi rata-rata litium dalam kerak bumi yaitu merentang antara 18,2 *ppm* sampai dengan 84,7 *ppm*. Kandungan litium dalam batuan tersebut diinterpretasikan berkaitan dengan mineral mika putih karena litium dalam batuan filit berkorelasi positif dengan unsur-unsur pembentuk mineral mika putih yaitu unsur utama K_2O, CaO, Na_2O, MgO, dan Al_2O_3. Pengkayaan litium dalam batuan filit Kompleks Luk Ulo mencapai lima kali dibanding konsentrasi litium dalam kerak bumi. Sumber pengkayaan tersebut diperkirakan berasal dari *protolith* filit berupa batuan sedimen pelitik asal benua. Kandungan litium dalam batuan filit Kompleks Luk Ulo memungkinkan batuan tersebut menjadi bahan baku sumber litium, namun batuan tersebut tidak untuk dieksploitasi karena terletak di Kawasan Cagar Alam Geologi Karangsambung.

Kata kunci: Litium, Filit, Kompleks Luk Ulo, ICP AES/MS, Mika Putih

ABSTRACT

Production of lithium-ion batteries in Indonesia will be more feasible if Indonesia has its own lithium resources. Metapelitic rocks have the potential to serve as an alternate raw material for lithium. Phyllite, a type of metapelitic rock, was found in the Luk Ulo Complex, Central Java. The objective of this study is to determine the mineral composition and lithium concentration of the phyllite rocks from the Luk Ulo Complex. This will serve as a representative model for understanding the occurrence of lithium in similar rock types. The techniques employed to accomplish this objective include field surveys, petrographic, XRD, and ICP-AES/MS analysis. Phyllite in the Luk Ulo Complex is found in several locations and exhibits well-developed schistosity, characterized by a predominant mineral composition of quartz, graphite, chlorite, and white mica. The concentration of lithium in the phyllite from the Luk Ulo Complex exceeds the average concentration of lithium in the earth's crust, which typically ranges from 18.2 to 84.7 ppm. The presence of lithium in the phyllite rock is believed to be associated with the white mica minerals in the rock because the principal component analysis reveals a significant correlation between the lithium level in phyllite and the major elements K_2O, CaO, Na_2O, MgO, and Al_2O_3, which are responsible for the formation of the white mica. The phyllite rocks in the

Luk Ulo Complex have a lithium enrichment that is five times more than the concentration of lithium in the earth's crust. It is believed that this enrichment is generated from the protoliths of the phyllite rocks, which are pelitic sedimentary rocks of continental origin. The presence of lithium in the phyllite rocks of the Luk Ulo Complex makes them suitable as lithium sources. However, due to their location within the Karangsambung Geological Reserve Area, these rocks are not to be exploited.

***Keywords**: Lithium, Phyllite, Luk Ulo Complex,* ICP AES/MS, *White Mica*

PENDAHULUAN

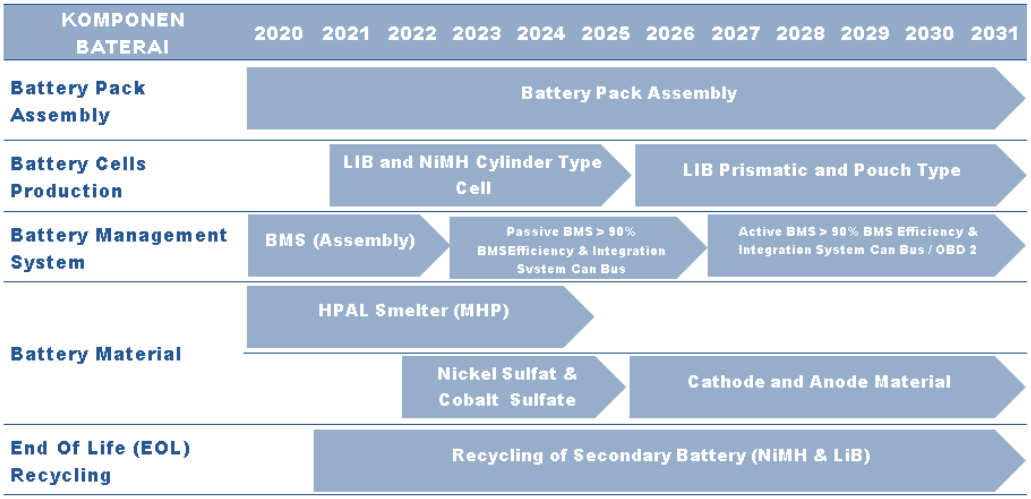
Pengembangan baterai litium ion menjadi salah satu prioritas investasi nasional seiring terbitnya perpres No. 55 tahun 2019 tentang percepatan program kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (*battery electric vehicle*) untuk transportasi jalan. Berdasarkan peta jalan industri kendaraan bermotor listrik berbasis baterai yang tertuang dalam peraturan menteri perindustrian No. 6 Tahun 2022, produksi baterai litium dilakukan mulai tahun 2021 hingga tahun 2031 (Gambar 1).

Kebijakan pemerintah untuk melakukan produksi baterai litium di Indonesia merupakan hal yang sangat realistis mengingat melimpahnya cadangan bahan baku baterai seperti nikel, kobal, tembaga, dan mangan di negara ini. Menurut PSDMBP (2022) pada tahun 2021 Indonesia memiliki cadangan logam nikel sebesar 57 juta ton, kobal sebesar 0,48 juta ton, tembaga 19 juta ton, dan mangan 57 juta ton. Produksi baterai litium ion di Indonesia akan lebih praktis jika negara ini juga memiliki cadangan litium yang digunakan sebagai katoda pada baterai tersebut.

Konsentrasi litium yang bersifat ekonomis umumnya ditemukan dalam batuan pegmatit, dalam air asin *(brines)* dan dalam mineral seperti *hectorite* dan *jaderite* (Evans, 2014). Namun demikian, penelitian terbaru juga mengungkapkan potensi litium dalam batuan metapelitik fasies sekis hijau yang lebih tinggi dari kandungan litium dalam kerak bumi yaitu 17 *ppm*. Keterdapatan litium dalam batuan metamorf fasies Sekis hijau dilaporkan oleh Qiu et al., (2011) dan Barnes et al., (2019) dengan kadar litium mencapai 25 *ppm* sampai dengan 107 *ppm*, sedangkan Pesquera et al., (2020) menemukan sumber daya litium mencapai 112,2 juta ton dengan rata-rata kandungan LiO_2 sebesar 0,61% yang berasosiasi dengan batuan metapelitik.

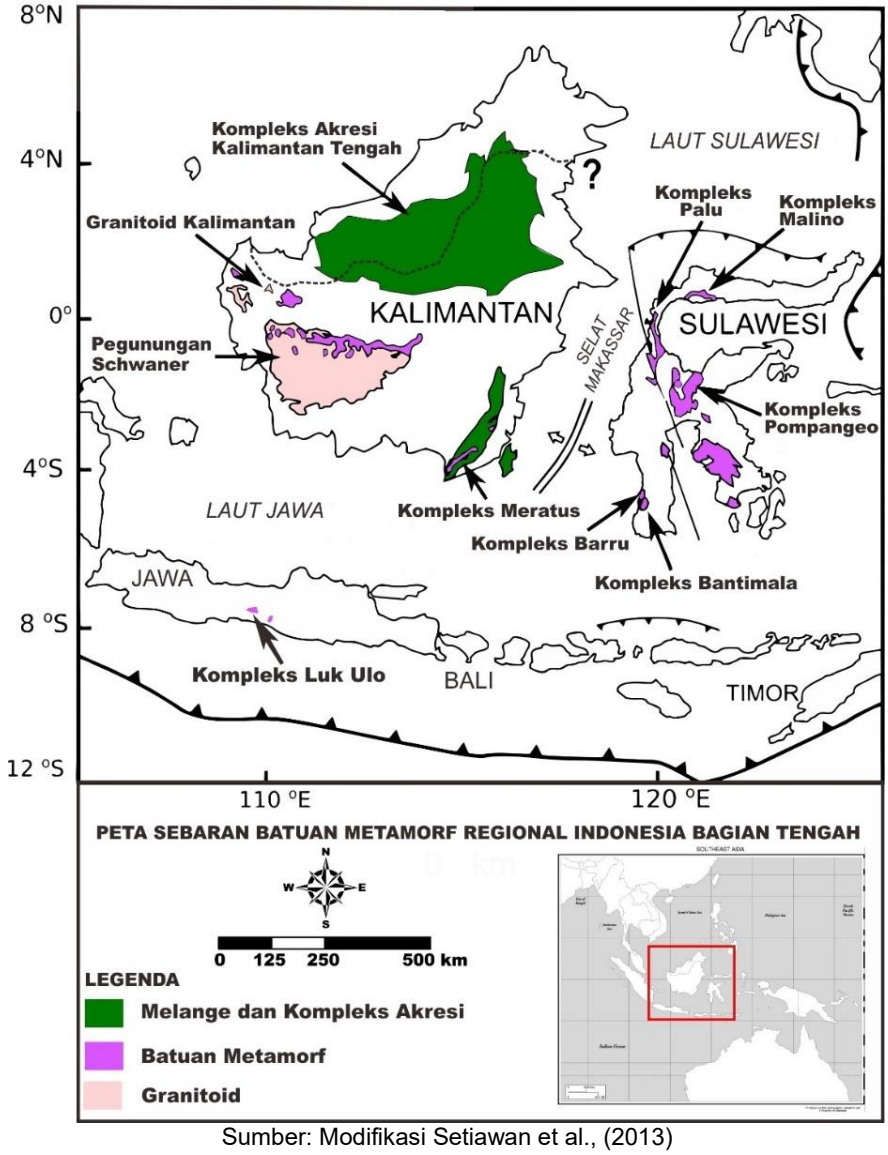
Di Indonesia, keterdapatan litium-aluminosilikat dalam batuan metamorf terdapat pada batuan sekis Kompleks Mekongga, Sulawesi Tenggara (Florena et al, 2016) dan dalam batuan sekis mika Kompleks Luk Ulo, Kebumen dengan kadar 45,28 ppm (Natasha et al., 2021).

Identifikasi litium dalam batuan metamorf lainnya di Indonesia semestinya perlu dilakukan, karena Indonesia memiliki beragam jenis batuan metamorf di sepanjang jalur metamorfisme yang terletak di Indonesia bagian tengah (Gambar 2). Kompleks Luk Ulo, Jawa Tengah merupakan bagian dari jalur metamorfisme tersebut sehingga memiliki keragaman jenis batuan metamorf seperti batuan metabasit dan metapelitik. Batuan metapelitik yang melimpah di Kompleks Luk Ulo adalah sekis mika (Miyazaki et al., 1998; Soesilo et al., 2010) dan filit (Ketner et al., 1976; Asikin et al., 1992). Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi komposisi mineralogi dan kandungan litium dalam batuan filit Kompleks Luk Ulo sebagai model analogi keterdapatan litium pada batuan sejenis.



Sumber: Peraturan Menteri Perindustrian No. 6 Tahun 2022 (Kementerian Perindustrian Indonesia, 2002)

Gambar 1. Peta jalan industri kendaraan bermotor listrik berbasis baterai



Sumber: Modifikasi Setiawan et al., (2013)

Gambar 2. Peta sebaran batuan metamorf regional di Indonesia bagian tengah

METODOLOGI

Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi pengamatan lapangan, analisis laboratorium, serta analisis komponen utama (*principal component analysis*). Survei lapangan dilakukan pada Kompleks Luk Ulo yang terletak di Kabupaten Kebumen dan Banjarnegara untuk mendapatkan sebaran dan sampel batuan filit. Sampel batuan tersebut selanjutnya dilakukan analisis laboratorium yang meliputi analisis petrografi, analisis XRD, dan analisis geokimia ICP MS/AES. Analisis petrografi dan XRD bertujuan untuk mengetahui komposisi mineralogi serta tekstur batuan filit, sedangkan analisis geokimia ICP MS/AES bertujuan untuk mengetahui komposisi unsur utama, unsur jejak, unsur tanah jarang, serta kandungan litium dalam batuan filit. Preparasi dan analisis petrografi dilakukan di Laboratorium optik Kawasan Koleksi Ilmiah (KKI) Geodiversitas-BRIN (Karangsambung), analisis XRD dilakukan di laboratorium Pusat Jurusan Teknik Geologi Fakultas Teknik UGM (Yogyakarta), sedangkan analisis geokimia ICP MS/AES dilakukan di Laboratorium ALS *Geochemistry* (Kanada). Selain analisis laboratorium, dilakukan pula analisis komponen utama (*principal component analysis*) menggunakan Ms. Excel untuk mengetahui hubungan antara litium dengan unsur utama dan unsur jejak lainnya.

GEOLOGI

Kompleks Luk Ulo merupakan Melange/bancuh yang terbentuk akibat konvergensi lempeng Indo-Australia dan Eurasia pada masa Kapur Akhir – Paleosen (Asikin et al., 1992). Kompleks tersebut tersingkap di daerah Karangsambung dan sekitarnya dan terdiri dari beragam bongkah tektonik batuan beku (basa-ultrabasa, riolitik), batuan sedimen (pelagis, silisiklastik) serta batuan metamorf (metapelitik, metabasit tekanan tinggi-sedang-rendah) yang tercampur dalam lempung hitam bersisik (Ketner et al., 1976; Suparka, 1988; Asikin et al., 1992; Wakita et al., 1994; Miyazaki et al., 1998; Kadarusman et al., 2007; Setiawan et al., 2013). Pada bagian utara Kompleks, bongkah batuan lebih dominan dan disebut sebagai Melange Seboro, sedangkan pada bagian selatan Kompleks masa dasar lebih dominan dan disebut sebagai Melange Jatisamit. Batuan filit yang menjadi objek dalam penelitian ini ditemukan di bagian utara dan selatan Kompleks Luk Ulo.

Pengukuran umur batuan penyusun Kompleks Luk Ulo yang dilakukan oleh beberapa peneliti secara umum menunjukkan kisaran umur Kapur Akhir – Paleosen Tengah seperti pengukuran umur absolut menggunakan metode K-Ar pada batuan beku basaltik dan riolitik yang dilakukan (Suparka, 1988) dan menghasilkan kisaran umur 81,26 ± 4,06 jtl (Kapur Akhir) dan 67,71 ± 3,39 jtl (Kapur Akhir). Kandungan fosil radiolaria pada batuan rijang yang menunjukkan kisaran umur Kapur Awal-Kapur Akhir (Wakita et al., 1994) dan kandungan fosil foraminifera plantonik pada matriks lempung hitam menunjukkan kisaran umur Kapur Akhir – Paleosen Tengah (Asikin et al., 1992). Pengukuran umur menggunakan metode Rb-Sr pada batuan sekis garnet-fengit juga menunjukkan kisaran umur 118,0 ± 0,8 jtl (Kapur Akhir) dan 114,7 ± 1,3 jtl (Kapur Akhir) (Alfing et al., 2021). Beberapa studi terbaru (Ansori et al., 2019; Isyqi et al., 2019; Tuakia et al., 2024) menunjukkan umur batuan penyusun Kompleks Luk Ulo yang lebih muda. Pengukuran absolut K-Ar yang dilakukan oleh (Ansori et al., 2019) pada batuan granodiorit menunjukkan kisaran umur 48,1 ± 1,1 jtl (Eosen Awal), sedangkan pengukuran K-Ar pada batuan dasit yang dilakukan oleh (Isyqi et al., 2019) menunjukkan kisaran umur 48 ± 1,7 jtl (Eosen Awal). Tuakia et al., (2024) melakukan pengukuran umur Calcareous nannofossil pada batulempung bersisik dan menghasilkan kisaran umur Eosen Tengah – Oligosen Awal.

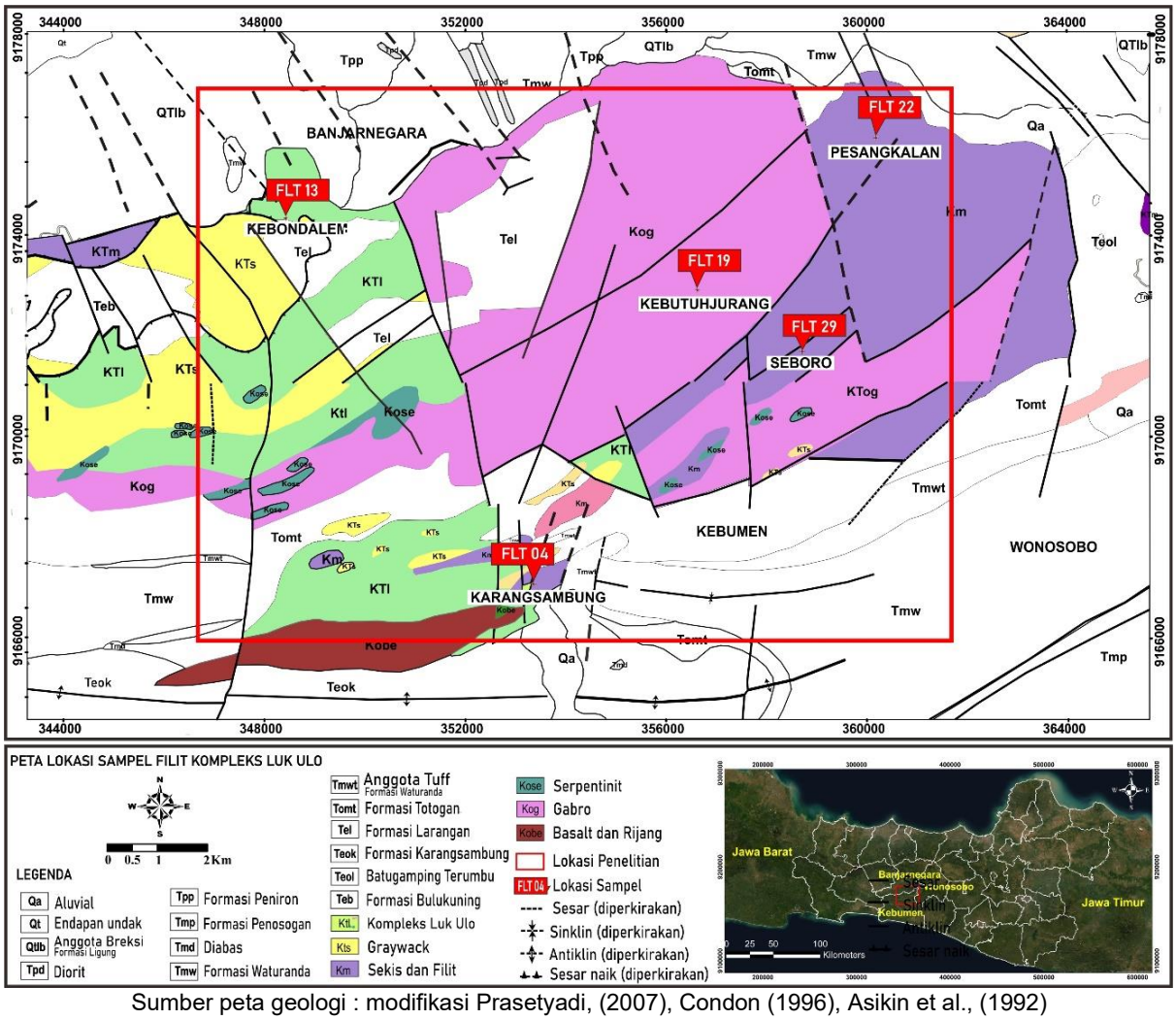
Kompleks Luk Ulo ditindih secara tidak selaras oleh sekuen Kenozoikum seperti Formasi Bulukuning, Formasi Karangsambung, Kompleks Larangan, Formasi Totogan, Intrusi Diabas Dakah,

Formasi Waturanda, Formasi Penosogan, dan Formasi Halang (Asikin et al., 1992; Prasetyadi, 2007) seperti ditunjukkan pada gambar 3.

HASIL DAN PEMBAHASAN

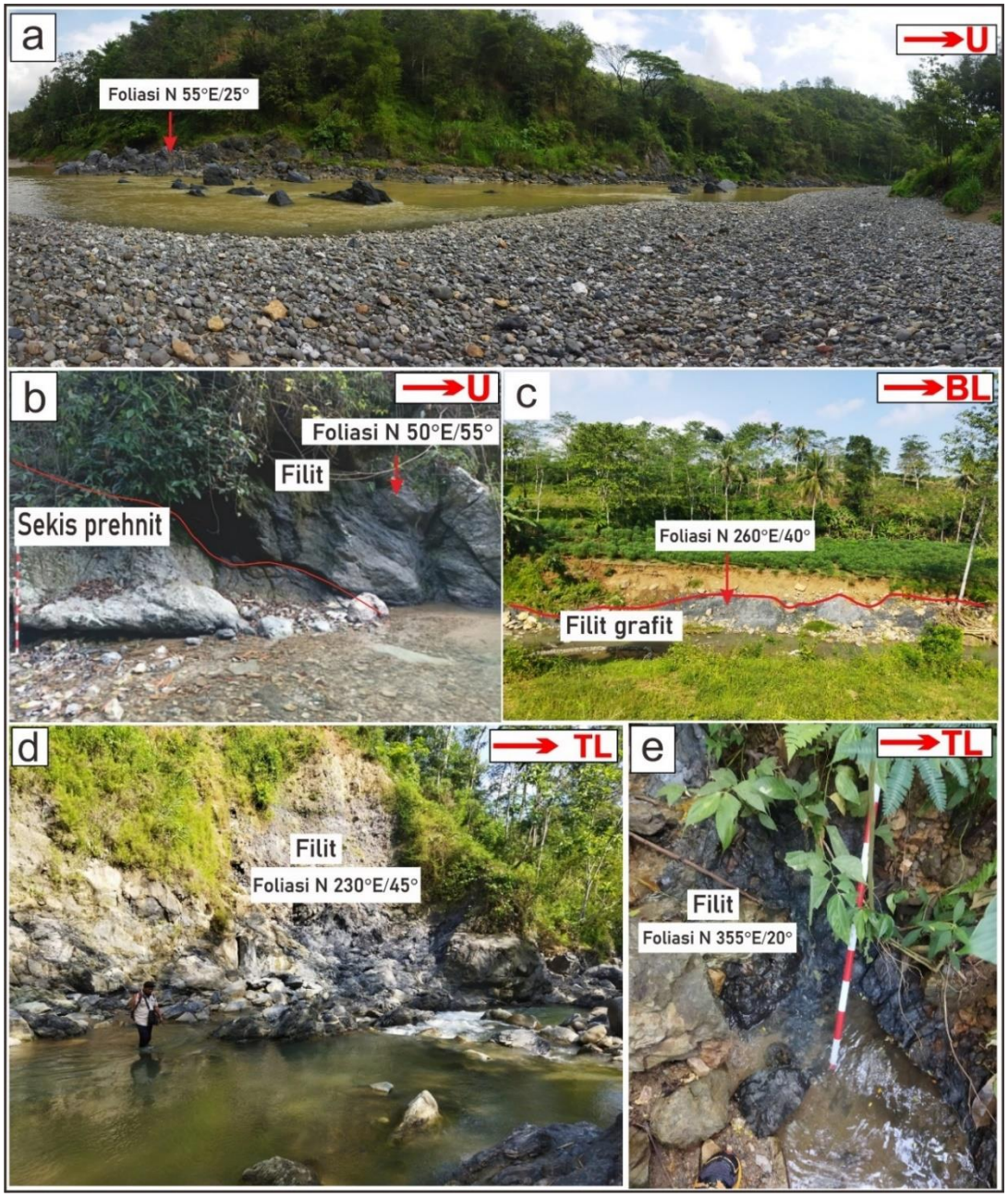
Hasil Pengamatan Lapangan

Berdasarkan survei lapangan yang dilakukan batuan filit ditemukan di beberapa lokasi seperti Desa Karangsambung dan Seboro Kabupaten Kebumen, serta Desa Kebondalem, Kebutuhjurang, dan Pesangkalan Kabupaten Banjarnegara (Gambar 3). Filit Kompleks Luk Ulo tersingkap sebagai batuan dasar sungai maupun sebagai bukit dengan dimensi beberapa meter hingga mencapai 500 m (Gambar 4). Singkapan tersebut dalam kondisi segar-lapuk, dengan warna segar abu-abu gelap, dan memiliki struktur foliasi filitik. Secara umum foliasi yang terdapat pada filit Kompleks Luk Ulo memiliki arah timur laut-barat daya. Arah tersebut sesuai dengan salah satu pola struktur Pulau Jawa yaitu pola meratus dan juga searah dengan sesar mendatar sinistral Muria-Kebumen. Hal ini dapat diinterpretasikan bahwa *differential stress* yang membentuk foliasi pada filit Kompleks Luk Ulo kemungkinan berkaitan dengan pembentukan Sesar Meratus pada Kapur Akhir dan dan Sesar Muria-Kebumen pada Kapur Akhir–Paleosen (Satyana and Purwaningsih, 2002).



Sumber peta geologi : modifikasi Prasetyadi, (2007), Condon (1996), Asikin et al., (1992)

Gambar 3. Peta pengambilan sampel filit Kompleks Luk Ulo

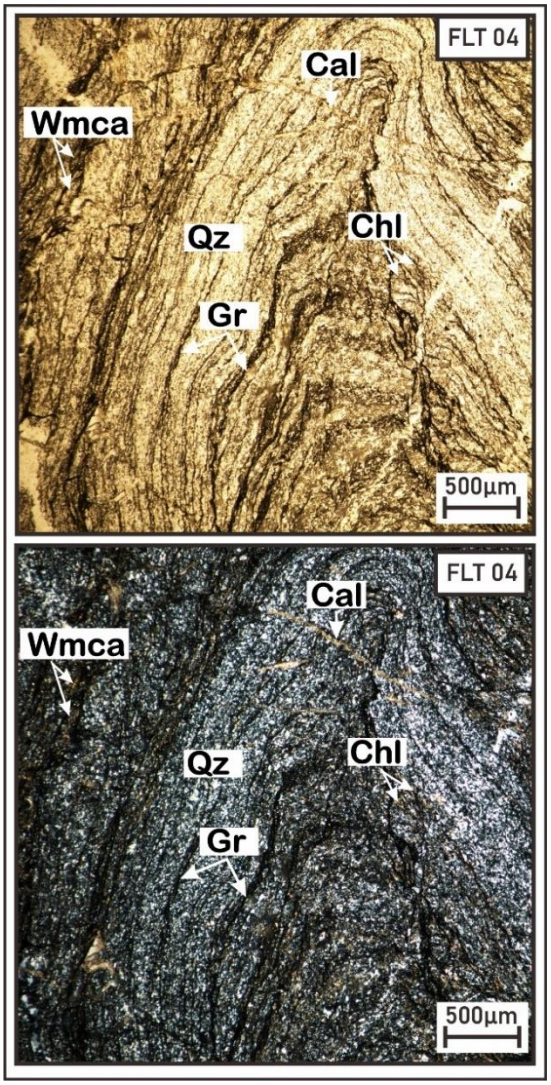


Gambar 4. Singkapan filit Kompleks Luk Ulo di daerah penelitian (a) Karangsambung (b) Seboro (c) Kebondalem (d) Kebutuhjurang (e) Pesangkalan

Hasil analisis Petrografi

Analisis petrografi pada lima sampel batuan filit dari lima lokasi yang berbeda (Tabel 1). Analisis petrografi menunjukkan bahwa batuan filit Kompleks Luk ulo menunjukkan skistositas yang berkembang cukup baik dengan ukuran mineral sangat halus–halus (0,01 mm s.d. 0,8 mm), dan memiliki tekstur lepidoblastik. Komposisi mineral utama terdiri dari kuarsa (23% s.d. 40%), grafit (11% s.d. 21%), klorit (13% s.d. 16%), dan mika putih (14% s.d. 25%) seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Kenampakan skistositas yang baik terbentuk oleh mineral-mineral utama tersebut (Gambar 5). Mineral aksesoris yang teramati antara lain adalah albit, apatit, k-feldpar, opak, rutil dan sfen/titanit. Sedangkan mineral sekunder yang terdapat pada filit adalah mineral kalsit yang hadir sebagai urat pada batuan tersebut. Struktur mikro *crenulation* teramati pada beberapa sayatan tipis filit Kompleks Luk Ulo. Kehadiran mineral

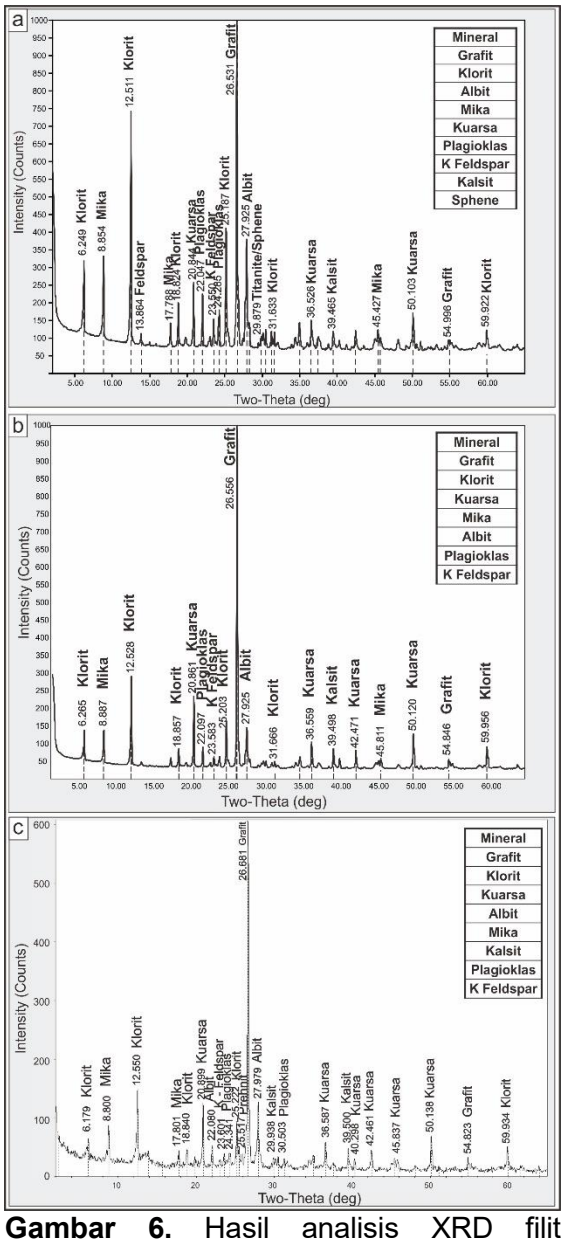
klorit, mika putih, dan albit dalam batuan filit Kompleks Luk Ulo menunjukkan bahwa batuan tersebut termasuk dalam Fasies Sekishijau karena mineral klorit, mika putih, dan albit merupakan mineral indeks penciri Fasies Sekishijau (Bucher and Grapes, 2011).



Gambar 5. Fotomikrograf sayatan tipis sampel FLT 04 menunjukkan komposisi mineral utama kuarsa (Qz), grafit (Gr), klorit (Chl), dan mika putih (Wmca) yang membentuk skistositas cukup baik dan memiliki struktur mikro *crenulation*

Hasil Analisis XRD

Analisis XRD dilakukan pada tiga sampel batuan filit yaitu sampel dari Karangsambung, Kebondalem dan dari Seboro. Hasil analisis XRD dari ketiga sampel tersebut menunjukkan kumpulan mineral yang hampir sama dengan hasil pengamatan petrografi yaitu menunjukkan kumpulan mineral grafit, klorit, albit, mika, kuarsa, plagioklas, k-feldpar, kalsit, dan sfen seperti ditunjukkan Gambar 6 dan Tabel 2.



Gambar 6. Hasil analisis XRD filit Kompleks Luk Ulo menunjukkan kumpulan mineral grafit, klorit, albit, mika, kuarsa, plagioklas, k-feldpar, kalsit, dan sfen, (a) sampel Karangsambung, (b) sampel Kebondalem (c) sampel Seboro

Tabel 1. Hasil pengamatan petrografi batuan filit kompleks Luk Ulo
Mineral *abbreviations:* Ab= Albit, Ap= Apatit, Cal= Kalsit, Chl= Klorit, Gr= Grafit, Kfs=K Feldspar, Opq= Mineral opak, Qz= Kuarsa, Rt= Rutil, Spn=Sfen/titanit, Wmca= Mika Putih

No	ID Sampel	Lokasi	Mineral Primer (%)									Mineral Sekunder (%)		Nama Batuan (IUGS 2007)
			Ab	Ap	Chl	Gr	Kfs	Opq	Qz	Rt	Spn	Wmca	Cal	
1	FLT 04	Karangsambung	7	3	16	21	-	4	32	3	-	14	-	*Chl-Ph -Gr Phyllite*
2	FLT 13	Kebondalem	6	3	16	11	5	3	23	3	-	25	5	*Gr-Chl-Ph Phyllite*
3	FLT 19	Kebutuhjurang	7	-	13	21	-	5	34	-	-	20	-	*Chl-Ph -Gr Phyllite*
4	FLT 22	Pesangkalan	7	-	15	11	-	5	40	-	-	19	3	*Gr-Chl- Ph Phyllite*
5	FLT 29	Seboro	7	3	16	18	-	5	30	-	3	18	-	*Chl-Gr-Ph Phyllite*

Tabel 2. Kumpulan mineral hasil analisis XRD pada batuan filit Komples Luk Ulo
Catatan Kelimpahan Mineral**:** ■ melimpah > 500, ▲ Sedang 100 - 500**,**
● Sedikit < 100, - absent

Nama Mineral	FLT 04	FLT 13	FLT 29
Albit	▲	▲	●
Feldpar	-	●	-
Grafit	■	■	■
Kalsit	●	-	-
K-Feldpar	▲	●	●
Klorit	■	▲	▲
Kuarsa	▲	▲	▲
Mika	▲	▲	▲
Plagioklas	▲	●	●
Sfen	●	-	-

Tabel 3. Kandungan litium (ppm), unsur utama (%), dan unsur jejak (ppm), dalam batuan filit Kompleks Luk Ulo

Sampel	**FLT 04**	**FLT 13**	**FLT 19**	**FLT 22**	**FLT 29**
Li (ppm)	**18,20**	**84,70**	**35,40**	**39,00**	**20,60**
(%)	**FLT 04**	**FLT 13**	**FLT 19**	**FLT 22**	**FLT 29**
SiO_2	62.70	66.10	62.20	70.20	67.90
Al_2O_3	14.95	14.55	14.9	13.25	13.65
Fe_2O_3*	6,57	6,05	4,31	5,56	7,27
CaO	0,44	1,48	0,96	1,3	1,02
MgO	2,11	4,29	1,88	1,96	2,88
Na_2O	1,85	2,75	2,53	1,45	2,53
K_2O	2,98	3,74	2,96	2,90	2,47
Cr_2O_3	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
TiO_2	0,65	0,64	0,63	0,65	0,70
MnO	0,15	0,14	0,09	0,11	0,26
P_2O_5	0,10	0,09	0,09	0,10	0,11
SrO	<0,01	0,01	<0,01	0,01	<0,01
BaO	0,03	0,09	0,03	0,04	0,03
LOI	6,44	4,43	3,82	4,17	6,53
Total	**101,98**	**100,82**	**100,76**	**99,81**	**101,46**

* Semua Fe dihitung sebagai Fe^{3+}

(*ppm*)	FLT 04	FLT 13	FLT 19	FLT 22	FLT 29
Ce	43,00	56,30	41,20	55,10	44,90
Cr	71,00	86,00	77,00	76,00	69,00
Cs	6,95	3,67	8,10	7,77	4,27
Dy	3,06	3,96	3,27	4,19	4,05
Er	1,81	2,61	2,04	2,61	2,48
Eu	0,87	0,90	0,82	0,99	1,04
Ga	17,40	15,10	15,20	17,60	19,00

Sampel	FLT 04	FLT 13	FLT 19	FLT 22	FLT 29
Gd	3,44	4,39	3,25	4,14	3,91
Ge	1,20	1,30	1,10	1,50	0,90
Hf	3,61	5,91	4,37	4,55	3,99
Ho	0,59	0,87	0,68	0,87	0,84
La	19,50	25,50	20,30	25,10	20,5
Lu	0,31	0,41	0,33	0,37	0,41
Nb	7,87	10,75	8,54	8,87	7,93
Nd	18,40	24,02	17,50	23,70	19,90
Pr	4,95	6,46	4,79	6,29	5,16
Rb	119,50	106,50	148,50	133,00	107,50
Sc	16,90	15,60	16,30	16,20	21,50
Sm	3,77	5,48	3,55	5,10	4,50
Sn	2,00	2,80	2,20	2,20	2,50
Sr	52,40	118,50	60,20	61,50	81,70
Ta	0,40	0,70	0,50	0,50	0,40
Tb	0,50	0,67	0,51	0,64	0,61
Th	6,96	3,125	8,11	7,78	4,17
Tm	3,06	3,15	3,27	4,20	4,39
U	1,82	2,61	2,04	2,61	2,49
V	6,96	3,12	8,11	7,78	4,17
W	3,06	3,15	3,27	4,20	4,39
Y	1,82	2,61	2,04	2,61	2,49
Yb	0,87	0,90	0,82	0,99	1,05
Zr	17,50	15,10	15,20	17,70	19,10
La/Yb	19.52	22.41	28.33	24.76	25.35
Th/Sc	0.19	0.41	0.20	0.50	0.48
Th/La	0.20	0.36	0.12	0.40	0.31

Hasil Analisis ICP AES/MS

Kandungan litium, unsur utama, dan unsur jejak batuan filit Kompleks Luk Ulo tersaji pada Tabel 3. Berdasarkan tabel tersebut diketahui bahwa konsentrasi litium dalam filit merentang antara 18,2 ppm sampai dengan 84,7 *ppm*, dengan kandungan tertinggi terdapat dalam sampel FLT 13 dari Kebondalem dan kandungan terendah terdapat dalam sampel FLT 04 dari Karangsambung.

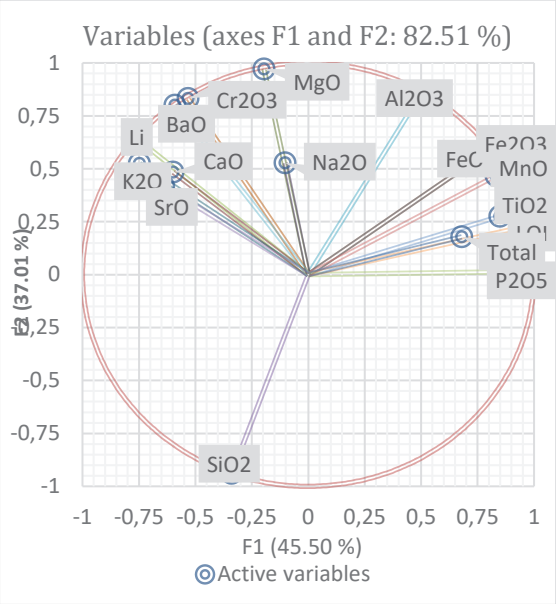
Hasil Analisis Komponen Utama

Untuk mengetahui model kehadiran litium dalam filit Kompleks Luk Ulo dilakukan analisis komponen utama *(principal component analysis)* dengan parameter unsur litium, unsur utama, dan unsur jejak batuan filit.

Berdasarkan analisis komponen utama diketahui bahwa unsur litium pada batuan filit Kompleks Luk Ulo memiliki korelasi positif dengan unsur utama BaO, Cr_2O_3, K_2O, CaO, MgO, SrO, Na_2O, dan Al_2O_3 seperti ditunjukkan pada Tabel 4 dan Gambar 7. Sedangkan bila dikorelasikan dengan kandungan unsur jejak, litium pada filit Kompleks Luk Ulo berkorelasi positif dengan unsur Ba, Ce, Cr, Dy, Er, Gd, Ge, Hf, Ho, La, Lu, Nb, Nd, Pr, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, U, dan Y seperti ditunjukkan pada Tabel 5 dan Gambar 8.

Tabel 4. Tabel korelasi analisis komponen utama unsur litium dan unsur utama filit Kompleks Luk Ulo

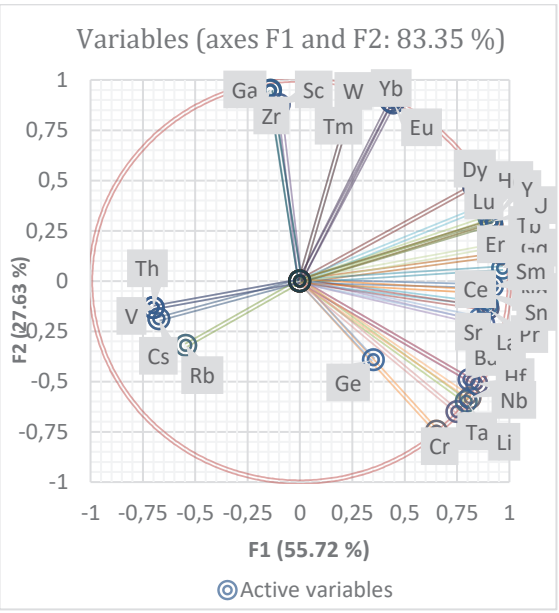
Variabel	Li
Li	**1**
SiO_2	-0,349
Al_2O_3	0,167
Fe_2O_3	-0,229
CaO	0,780
MgO	0,778
Na_2O	0,423
K2O	0,901
Cr_2O_3	0,940
TiO2	-0,462
MnO	-0,328
P_2O_5	-0,673
SrO	0,760
BaO	0,966
LOI	-0,577
Total	-0,414



Gambar 7. Diagram korelasi analisis komponen utama unsur litium dan unsur utama filit Kompleks Luk Ulo

Tabel 5. Tabel korelasi analisis komponen utama unsur litium dan unsur jejak filit Kompleks Luk Ulo

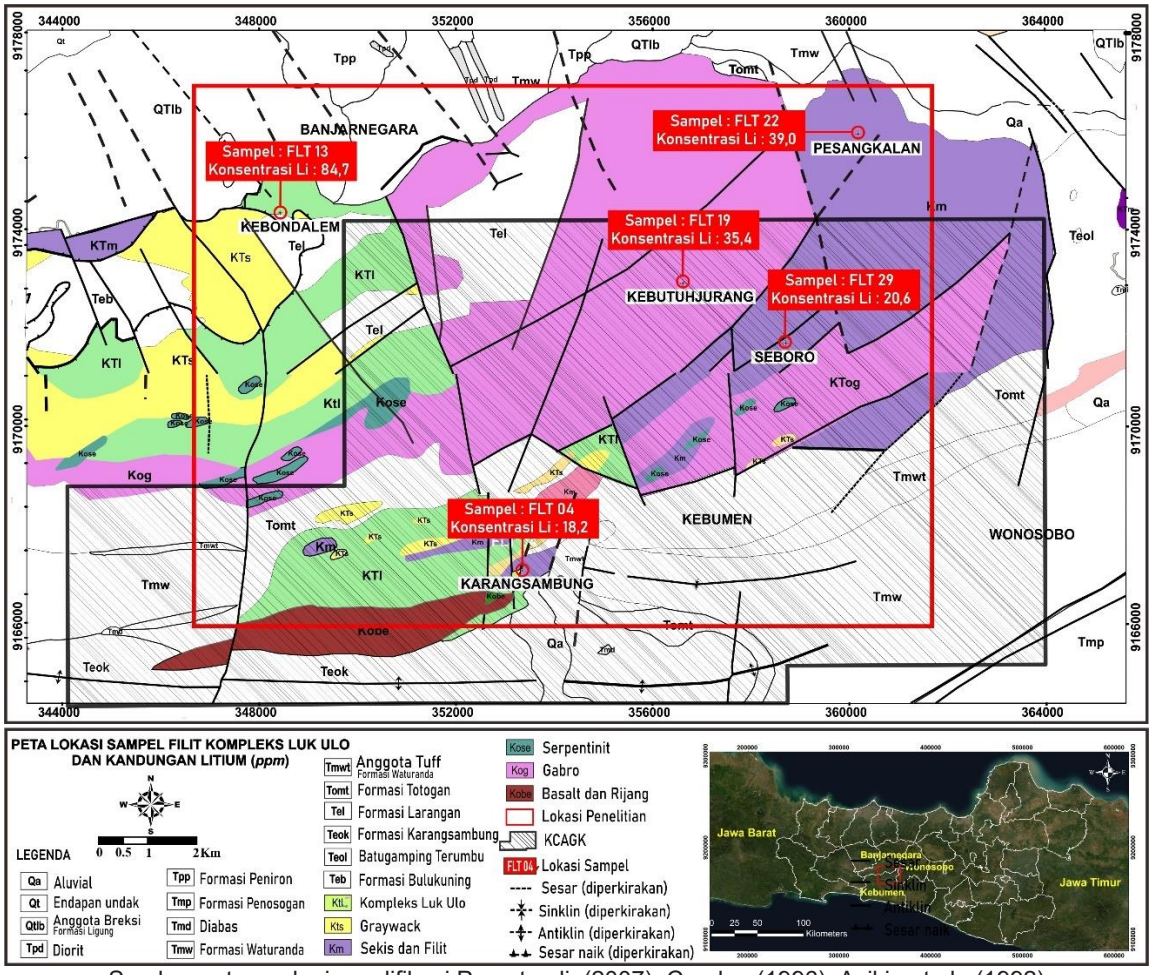
Variabel	Li
Li	**1**
Ba	0,948
Ce	0,744
Cr	0,971
Cs	-0,461
Dy	0,369
Er	0,557
Eu	-0,186
Ga	-0,699
Gd	0,670
Ge	0,441
Hf	0,990
Ho	0,532
La	0,795
Lu	0,504
Nb	0,999
Nd	0,713
Pr	0,761
Rb	-0,250
Sc	-0,565
Sm	0,711
Sn	0,759
Sr	0,831
Ta	0,996
Tb	0,658
Th	-0,515
Tm	-0,339
U	0,550
V	-0,515
W	-0,339
Y	0,550
Yb	-0,199
Zr	-0,701



Gambar 8. Diagram korelasi analisis komponen utama unsur litium dan unsur jejak filit Kompleks Luk Ulo

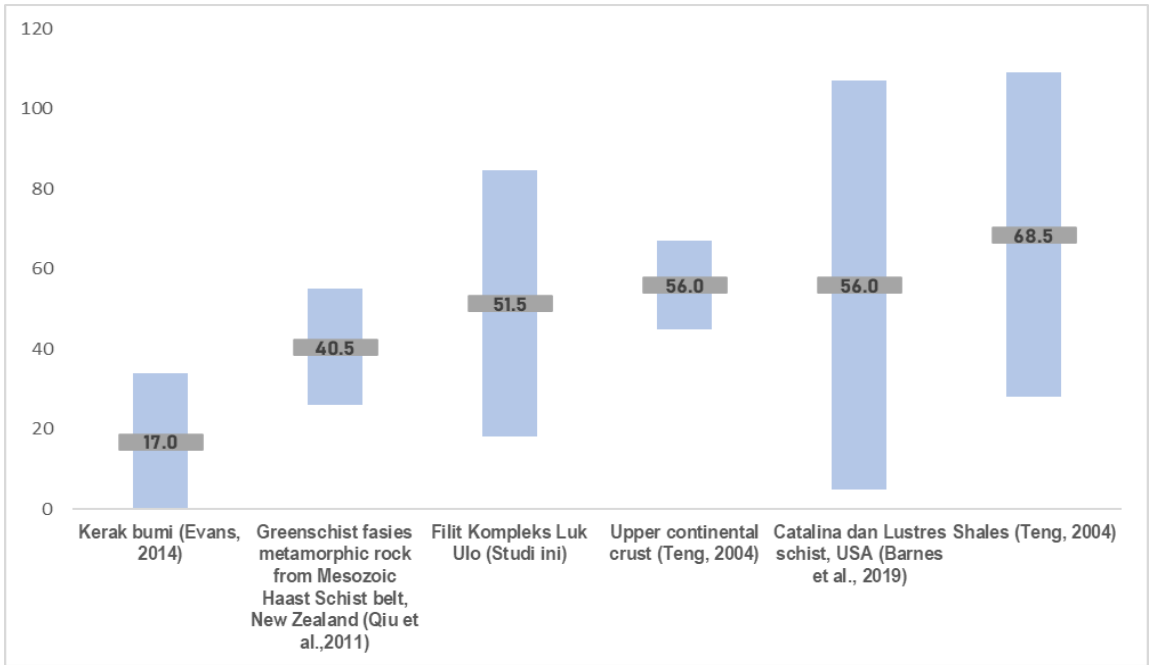
PEMBAHASAN

Batuan filit Kompleks Luk Ulo memiliki kandungan litium dengan konsentrasi yang berbeda-beda (Gambar 9). Berdasarkan peta tersebut, batuan filit yang terletak di bagian utara daerah penelitian cenderung memiliki konsentrasi litium yang lebih tinggi dibandingkan batuan filit yang terletak di bagian selatan daerah penelitian. Meskipun memiliki konsentrasi litium yang berbeda-beda, namun kandungan litium dalam filit Kompleks Luk Ulo secara umum memiliki konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan konsentrasi rata-rata litium dalam kerak bumi yaitu 17 *ppm* (Evans, 2014) seperti ditunjukkan dalam Gambar 10. Perbedaan konsentrasi litium dalam batuan filit Kompleks Luk Ulo dapat terjadi karena perbedaan prosentase mineral pembawa litium dan komposisi geokimia masing-masing sampel.



Sumber peta geologi: modifikasi Prasetyadi, (2007), Condon (1996), Asikin et al., (1992)

Gambar 9. Peta persebaran konsentrasi litium daerah penelitian



Gambar 10. Kelimpahan litium dalam filit Kompleks Luk Ulo dibandingkan dengan batuan lain

Mineral Pembawa Litium

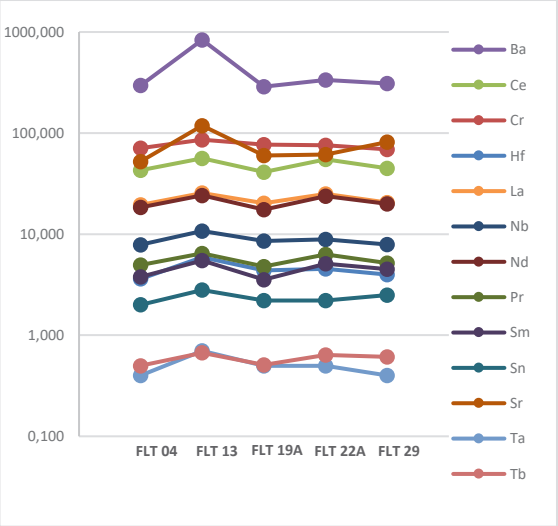
Litium merupakan unsur yang tidak ditemukan secara bebas di alam, melainkan dijumpai dalam bentuk senyawa dalam suatu mineral. Dalam studi ini, mineral mika putih diinterpretasikan sebagai mineral pembawa litium pada batuan filit Kompleks Luk Ulo. Interpretasi tersebut didasarkan atas hasil analisis komponen utama yang menunjukkan korelasi positif antara unsur litium dengan unsur utama K_2O, CaO, Na_2O, MgO, dan Al_2O_3.

Unsur K_2O, CaO, Na_2O, MgO, dan Al_2O_3 merupakan unsur utama penyusun mineral mika putih. Secara umum mineral mika memiliki formula $IM_{2-3}\square_{1-0}T_4O_{10}A_2$, dimana unsur K, Ca, dan Na merupakan unsur yang umum mengisi gugus I, unsur Al sangat umum mengisi gugus T, sedangkan litium merupakan salah satu unsur yang umum mengisi gugus M pada ikatan senyawa tersebut (Rieder et al., 1998).

Korelasi positif antara unsur litium dengan mineral mika putih tercermin dalam tabel komposisi mineralogi batuan filit (Tabel 1). Dalam tabel tersebut, sampel FLT 13 dari Kebondalem yang memiliki kandungan litium paling tinggi juga memiliki prosentase mineral mika putih yang lebih tinggi dari sampel lokasi lain. Sampel tersebut juga memiliki kandungan unsur Ba, Ce, Cr, Hf, La, Nb, Nd, Pr, Sm, Sn, Sr, Ta, dan Tb yang paling tinggi dibandingkan pada sampel dari lokasi lain (Gambar 11). Unsur-unsur tersebut merupakan unsur-unsur yang berkorelasi positif dengan litium berdasarkan analisis komponen utama.

Mineral mika yang diketahui mengandung litium diantaranya adalah mineral *lepidolite* ($K(Li,Al)_3(Si,Al)4O_{10}(F,OH)_2$), *zinnwaldite* ($K_2Al_2Fe_2Li_2Al_2Si_6O_{20}(OH,F)_4$), dan *lithium - phengite* ($2K_2LiFe_{1.5}Al_{2.5}Si_{6.5}Al_{1.5}O_{20}(OH,F)4$).

Mineral *lepidolite* dan *zinnwaldite* umumnya ditemukan sebagai mineral primer dalam batuan pegmatit granitik, sedangkan mineral *lithium–phengite* ditemukan sebagai mineral sekunder akibat pengaruh metamorfisme (Petrík et al., 2014).



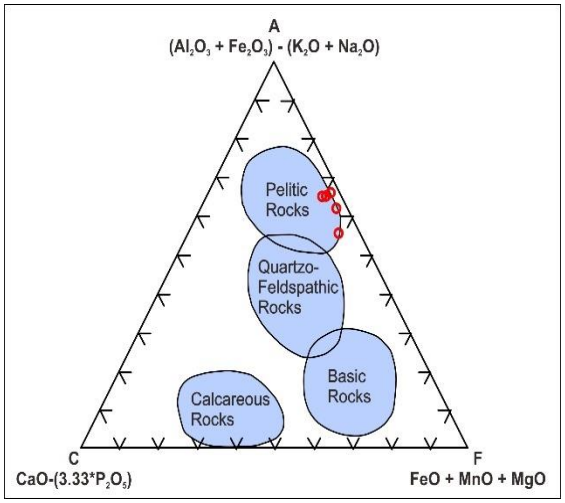
Gambar 11. Diagram pencar yang menunjukkan kandungan unsur jejak Ba, Ce, Cr, Hf, La, Nb, Nd, Pr, Sm, Sn, Sr, Ta, dan Tb pada filit Kebondalem (FLT 13) memiliki nilai yang lebih tinggi dibanding pada lokasi lain

Sumber Pengkayaan Litium

Sumber litium dalam batuan filit Kompleks Luk Ulo diperkirakan berasal dari batuan asal *(protolith)* yang memang mengandung konsentrasi litium tinggi. Berdasarkan hasil ploting data unsur utama pada diagram diskriminasi ACF oleh Eskola (1915) menunjukkan bahwa batuan asal pembentuk filit Kompleks Luk Ulo adalah batuan sedimen pelitik (Gambar 12). Rasio unsur jejak La/Yb, Th/Sc, dan Th/La pada batuan Filit Kompleks Luk Ulo secara umum memiliki nilai yang tinggi (Tabel 3), jika dibandingkan dengan dengan rasio La/Yb, Th/Sc, dan Th/La pada batuan *Post Archaean Australian Shales (PAAS,* La/Yb= 9.30; Th/Sc= 0.90; Th/La= 0.35, Taylor and McLennan, 1985) mengindikasikan provenance asal benua (Qiu et al., 2009).

Konsentrasi rata-rata litium dalam filit Kompleks Luk ulo sebesar 51,5 ppm memang mendekati konsentrasi rata-rata litium dalam kerak benua bagian atas yaitu sebesar 56 ppm (Gambar 10). Jika dibandingkan dengan rata-rata konsentrasi

litium pada *shale* sebesar 68,5 ppm, kandungan litium pada filit Kompleks Luk Ulo juga tidak berbeda jauh. Hal tersebut membuktikan bahwa *protolith* filit Kompleks Luk Ulo yang berupa sedimen pelitik asal benua merupakan sumber pengkayaan litium pada batuan tersebut.



Gambar 12. Plot data unsur utama batuan filit Kompleks Luk Ulo dalam diagram ACF Eskola (1915) menunjukkan protolith sedimen pelitik

Pada pembentukan filit Kompleks Luk Ulo, batuan sedimen pelitik tersebut akan mengalami proses metamorfisme regional sehingga terubah menjadi batuan metamorf Fasies Sekishijau. Namun demikian, menurut (Qiu et al., 2011) proses metamorfisme pada Fasies sub Sekishijau sampai Fasies Sekishijau tidak mengubah mobilitas dan konsentrasi Li secara signifikan.

Batuan filit Kompleks luk Ulo memiliki pengkayaan litium yang membuatnya berpotensi menjadi *raw-material* penyediaan mineral strategis litium dalam negeri. Namun demikian karena sebagian besar lokasi filit berada di Kawasan Cagar Alam Geologi Karangsambung (KCAGK, Gambar 9), maka batuan tersebut tidak dapat dieksploitasi walaupun memiliki pengkayaan litium. Hal ini karena berdasarkan Kepmen ESDM No. 2817 K/40/MEM/2006, KCAGK merupakan kawasan lindung geologi sehingga pemanfaatan kekayaan geologi di kawasan tersebut lebih ditujukan untuk menunjang pengembangan ilmu pengetahuan di bidang geologi dalam rangka mewujudkan pembangunan berkelanjutan yang berwawasan lingkungan hidup. Meskipun demikian, data kandungan litium batuan filit dalam penelitian ini dapat dijadikan acuan untuk melakukan identifikasi litium pada batuan sejenis lainnya di Indonesia.

KESIMPULAN

Batuan metapelitik filit ditemukan dibeberapa lokasi di Kompleks Luk Ulo seperti di Desa Karangsambung, Seboro, Kebondalem, Kebutuhjurang dan Pesangkalan. Batuan tersebut memiliki komposisi mineralogi utama yang terdiri dari mineral kuarsa, grafit, klorit dan mika putih yang membentuk skistositas yang cukup baik. Batuan filit Kompleks Luk Ulo terindikasi memiliki kandungan litium berdasarkan analisis ICP AES/MS dengan konsentrasi yang merentang antara 18,2 *ppm* sampai dengan 84,7 *ppm.* Mineral mika putih diinterpretasikan sebagai pembawa unsur litium dalam batuan filit Kompleks Luk Ulo karena unsur litium terbukti berkorelasi positif dengan unsur penyusun mineral tersebut yaitu unsur utama K_2O, CaO, Na_2O, MgO, dan Al_2O_3. Pengkayaan litium dalam filit Kompleks Luk Ulo diperkirakan bersumber dari *protolith* yaitu sedimen pelitik asal benua. Kandungan litium dalam batuan filit Kompleks Luk Ulo dapat dijadikan dasar untuk melakukan identifikasi litium pada batuan metapelitik lain di sepanjang jalur metamorfisme Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Beasiswa SAINTEK 2021 dan program hibah penelitian Fakultas Teknik UGM dengan nomor kontrak 1501407/UN1.FTK/SK/HK/2022. Penulis mengucapkan terima kasih yang setulusnya kepada BRIN KKI Geodiversitas Sukendar Asikin – Karangsambung karena telah mengizinkan penulis melakukan penelitian di kawasan cagar alam geologi.

DAFTAR PUSTAKA

Alfing, J., Bröcker, M., Setiawan, N.I., 2021. *Rb–Sr geochronology of metamorphic rocks from the Central Indonesian Accretionary Collision Complex: Additional age constraints for the Meratus and Luk Ulo complexes (South Kalimantan and Central Java).* Lithos 388–389. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.105971

Ansori, C., Godang, S., Hastria, D., Isyqi, 2019. *Protolith Oceanic Island Arc dari Granitoid Tipe M dan I di Karangsambung, Kebumen, Jawa Tengah.* Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral 20, 249–262. https://doi.org/10.33332/jgsm.v20.4.249-262p

Asikin, S., Handoyo, A., Busono, Gafoer, S., 1992. *Geologic Map of the Kebumen Quadrangle, Jawa, Scale 1 : 100.000.* Geological Research and Development Center of Indonesia, Bandung.

Barnes, J.D., Penniston-Dorland, S.C., Bebout, G.E., Hoover, W., Beaudoin, G.M., Agard, P., 2019. *Chlorine and lithium behavior in metasedimentary rocks during prograde metamorphism: A comparative study of exhumed subduction complexes (Catalina Schist and Schistes Lustrés).* Lithos 336–337, 40–53. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.03.028

Bucher, K. and, Grapes, R., 2011. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks,* 8th ed. Springer, New York. https://doi.org/10.1016/0016-7037(75)90141-6

Condon, W.H. et al, 1996. Peta geologi Lembar Banjarnegara-Pekalongan, Jawa Skala 1:100.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.

Eskola, P., 1915. *On the relations between the chemical and mineralogical composition in the metamorphic rocks of the Orijarvi region*. Bulletin de la Commission geologique de Finlande 44, 109–145.

Evans, K., 2014. *Lithium, in: Critical Metals Handbook*. pp. 230–260. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118755341.ch10

Isyqi, I., Ansori, C., Hastria, D., Wardhani, F.A., Al'Afif, M., Hidayat, E., Puswanto, E., 2019. Petrologi dan Geokimia Batuan Dasit Komplek Mélange Luk Ulo. RISET Geologi dan Pertambangan 29, 27. https://doi.org/10.14203/risetgeotam2019.v29.968

Kadarusman, A., Massonne, H.J., Van Roermund, H., Permana, H., Munasri, 2007. *P-T evolution of eclogites and blueschists from the Luk Ulo complex of central Java, Indonesia.* Int Geol Rev 49, 329–356. https://doi.org/10.2747/0020-6814.49.4.329

Kementerian Perindustrian Indonesia, 2002. Peraturan Menteri Perindustrian Nomor 6 Tahun 2022 tentang Spesifikasi, Peta Jalan Pengembangan, dan Ketentuan Penghitungan Nilai Tingkat Komponen Dalam Negeri Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (Battery Electric Vehicle).

Ketner, K.B., Modjo, S., Naeser, C., Obradovich, J., Robinson, K., Suptandar, T., 1976. *Pre-Eocene rocks of Java, Indonesia.* Journal of Research of the US Geological Survey 605–614.

Miyazaki, K., Sopaheluwakan, J., Zulkarnain, I., Wakita, K., 1998. *A jadeite-quartz-glaucophane rock from Karangsambung, central Java, Indonesia.* Island Arc 7, 223–230. https://doi.org/10.1046/j.1440-1738.1998.00164.x

Natasha, N.C., Lalasari, L.H., Andriyah, L., Arini, T., Yunita, F., Haryono, D., Rinanda, F., 2021. *The Use Of Mica Schist From Indonesia As Raw Material For Lithium Extraction Process Using Sulfate Roasting And Acid Leaching.* Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 3, 80–88. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231071

Pesquera, A., Roda-Robles, E., Gil-Crespo, P.P., Valls, D., Ruiz, J.T., 2020. *The metasomatic enrichment of Li in psammopelitic units at San José-Valdeflórez, Central Iberian Zone, Spain: a new type of lithium deposit.* Sci Rep 10, 1–11. https://doi.org/10.1038/s41598-020-67520-6.

Petrík, I., Čík, Š., Miglierini, M., Vaculovič, T., Dianiška, I., Ozdín, D., 2014. *Alpine oxidation of lithium micas in Permian S-type granites (Gemeric unit, Western Carpathians, Slovakia).* Mineral Mag 78, 507–533. https://doi.org/10.1180/minmag.2014.078.3.03.

Prasetyadi, C., 2007. Evolusi Tektonik Paleogen Jawa Bagian Timur (Disertation). Institut Teknologi Bandung, Bandung.

PSDMBP, 2022. Neraca Sumber Daya dan Cadangan Mineral, Batubara Gambut dan Panas Bumi Indonesia Tahun 2021. Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP), Bandung.

Qiu, L., Rudnick, R.L., Ague, J.J., Mcdonough, W.F., 2011a. *A lithium isotopic study of sub-greenschist to greenschist facies metamorphism in an accretionary prism , New Zealand.* Earth Planet Sci Lett 301, 213–221. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.001.

Qiu, L., Rudnick, R.L., Ague, J.J., McDonough, W.F., 2011b. *A lithium isotopic study of sub-greenschist to greenschist facies metamorphism in an accretionary prism, New Zealand.* Earth Planet Sci Lett 301, 213–221. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.001.

Qiu, L., Rudnick, R.L., McDonough, W.F., Merriman, R.J., 2009. *Li and δ7Li in mudrocks from the British Caledonides: Metamorphism and source influences.* Geochim Cosmochim Acta 73, 7325–7340. https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.08.017.

Rieder, M., Cavazzini, G., Yakonov, Y.S.D., Frank-kamenetskii, V.A., Gottardi, G., Guggenheim, S., Koval, P.W., Moller, G., Neiva, A.N.A.M.R., Radoslovich, E.W., Robert, J., Sassi, F.P., Takeda, H., Weiss, Z.K., Wones, D.R., 1998. *Nomenclature of The Micas.* Clays Clay Miner 46, 586–595.

Satyana, A.H., Purwaningsih, M.E.M., 2002. Lekukan Struktur Jawa Tengah : Suatu Segmentasi Sesar Mendatar, in: Indonesian Association of Geologists (IAGI) Yogyakarta – Central Java Section "Geology of Yogyakarta and Central Java."

Setiawan, N.I., Osanai, Y., Nakano, N., Adachi, T., Yonemura, K., Yoshimoto, A., Wahyudiono, J., Mamma, K., 2013. *An overview of metamorphic geology from central Indonesia: Importance of South Sulawesi, Central Java and South-West Kalimantan metamorphic terranes.* Bulletin of the Graduate School of Social and Cultural Studies, Kyushu University 19, 39–55.

Soesilo, J., Suparka, E., Abdullah, C.I., Schenk, V., 2010. *Petrology and Geochemistry of the Quartz-White Mica Schists in the Luk Ulo Melange Complex, Central Java.* Buletin Geologi 40.

Suparka, E., 1988. Studi petrologi dan pola kimia komplek ofiolit Karangsambung Utara, Luh ulo, Jawa Tengah (Ph.D Disertation). Bandung Institute of Technology Indonesia, Bandung. https://doi.org/10.31227/osf.io/vfds3.

Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. *The continental crust: Its composition and evolution.* Blackwell Scientific Pub.,Palo Alto, CA, United States.

Tuakia, M.Z., Rendy, Santoso, W.D., Puswanto, E., Yuwono, F.S., Sapiie, B., Dianto, A., 2024. *Outcrop to petrography scale and new age constraint of the Jatisamit Mélange in the Luk Ulo area, Central Java, Indonesia.* Australian Journal of

Earth Sciences 71, 100–113. https://doi.org/10.1080/08120099.2023.2273419.

Wakita, K., Munasri, Bambang, W., 1994. *Cretaceous radiolarians from the Luk-Ulo Melange Complex in the Karangsambung area, central Java*, *Indonesia*, Journal of Southeast Asian Earth Sciences.

Diterima : 29 Maret 2024
Direvisi : 14 Mei 2024
Disetujui : 31 Agustus 2024

UCAPAN TERIMA KASIH

Dewan Redaksi mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para editor dan mitra bestari atas kerjasamanya dalam proses review lima makalah untuk edisi kedua Buletin Sumber Daya Geologi tahun 2024. Secara khusus, kami mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bestari yang berkontribusi sesuai keahliannya, antara lain Prof. Mega Fatimah Rosana, M.Sc, Ph.D, Prof. Euis Tintin Yuningsih, M.Sc, Ph.D, Prof. Binarko, M.Sc, Dr.Eng, Ir. Agus Didit Haryanto, M.T, Dr. Ir. Rukmana Nugraha Adhi, DEA, Ir. Sabtanto Joko Suprapto, M.T, Ir. Bambang Pardiarto, Ir. Teuku Ishlah, Ir. Dwi Nugroho Sunuhadi dan Dr.rer.nat. Ernowo, ST, MT.

Kami mengucapkan terima kasih kepada para penulis yang telah mengirimkan makalah ilmiahnya kepada sekretariat Buletin Sumber Daya Geologi. Selain itu, ucapan terimakasih diucapkan kepada para kontributor foto yang telah berpartisipasi untuk mengisi Galeri Foto.

Ucapan terimakasih juga disampaikan kepada semua unsur Dewan Redaksi dalam proses penyusunan dan penerbitan Buletin Sumber Daya Geologi Volume.19 Nomor.2, Tahun 2024. Semoga hadirnya Buletin Sumber Daya Geologi kepada masyarakat dan pihak-pihak yang berkepentingan dalam bentuk cetakan maupun digital secara *online* dapat memberikan informasi yang bermanfaat dan akurat tentang potensi sumber daya mineral dan energi di Indonesia.

Salam sehat dan tetap semangat.

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 19 Nomor 2 Tahun 2024 ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

INDEKS PENULIS

Aisha Permatasari
Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung
Email: aishapermatasari19@gmail.com

Dadan Wildan
Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung
Email: dadan.wildan@esdm.go.id

Dedi Sunjaya
Unit Geomin, PT. Aneka Tambang
Email: dedi.sunjaya@antam.com

Denny Lumban Raja
Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung
Email: denny.lumbanraja@esdm.go.id

Dharma Irwanda
Universitas Padjadjaran, PT. Nusa Halmahera Minerals
Email: dharma20002@mail.unpad.ac.id

Ferian Anggara
Departemen Teknik Geologi, Universitas Gadjah Mada
Email: ferian@ugm.ac.id

Husin Setia Nugraha
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
Email: husin.nugraha@esdm.go.id

Isyqi
Pusat Riset Sumber Daya Geologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional
Email: isyq001@brin.go.id

Johanes Hutabarat
Universitas Padjadjaran
Email: adamunpad@gmail.com

Mega F. Rosana
Universitas Padjadjaran
Email: mega.fatimah.rosana@unpad.ac.id

Nugroho Imam Setiawan
Departemen Teknik Geologi, Universitas Gadjah Mada
Email: nugroho.setiawan@ugm.ac.id

Priatna
Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung
Email: parpar.priatna@gmail.com

Rina Wahyuningsih
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
Email: rinagea85@gmail.com

Sabtanto Joko Suprapto
Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung
Email: sabtanto_js@yahoo.com

Sarah Mutia
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
Email: sarahmutia23@gmail.com

Tatik Handayani
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
Email: hanitatik@gmail.com

Westia Alifah Surya Pratiwi
Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung
Email: alifahw21@gmail.com

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 19 Nomor 2 Tahun 2024 ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

INDEKS KATA KUNCI

Analisis Komponen Utama 71, 73, 79, 82, 91, 134, 139, 140, 142
Bauksit 93-95, 97-99, 101-104, 121-123, 125-130
Cutoff Grade 71, 72
Epitermal sulfida rendah 71, 72, 75, 82, 86, 91
Estimasi Sumber Daya 93-95, 97, 101, 102-104
Filit 131-143, 145
Geokimia multiunsur 71, 73, 75, 77, 79, 81, 83, 85, 87, 89, 91
Geostatistik 93, 95-97, 100
ICP AES/MS 131, 132, 139, 143
IRR Inkremental 105, 107, 108, 112, 117, 118
Keekonomian Proyek Panas Bumi 105, 107
Kelayakan Proyek Panas Bumi 105, 111, 112
Kompleks Luk Ulo 131-143, 145
Konkresi 93, 103, 121-123, 125-129
K-means 71-73, 75-77, 82, 89-91
Litium 131-135, 137-143, 145
Mika Putih 131, 136-138, 142, 143
Mukti Jaya 121-123, 125, 127, 129
Oolitik 121, 122, 125, 126
Ordinary Kriging 93-97, 99, 101-104
Perhitungan Discounted Cash Flow (DCF) 105, 107
Pisolitik 121, 122, 125, 126
Program Government Drilling 105-107, 112, 113, 115, 116, 119
Porfiri 71, 72, 74, 75, 83-86, 91
Reaktif silika 121, 129
Sanggau 121, 122, 127, 130

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Terbit : Agustus 2024 ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

Dharma Irwanda[1,2], Mega F. Rosana[1], Johanes Hutabarat[1]
([1]Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, Jatinangor, Sumedang, [2]PT. Nusa Halmahera Minerals, Gosowong, Halmahera Utama, Maluku Utara)

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

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Agustus 2024 Vol. 19 No. 2 Hal. 71 – 92

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

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 klaster 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 klaster 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

Westia Alifah Surya Pratiwi[1], Denny Lumban Raja[1], Priatna[1], Sarah Mutia[2], dan Dedi Sunjaya[3]
([1]Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung, [2]Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, [3]Unit Geomin, PT. Aneka Tambang)

ESTIMASI SUMBER DAYA BAUKSIT MENGGUNAKAN METODE ORDINARY KRIGING DI KECAMATAN MELIAU, KALIMANTAN BARAT

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Agustus 2024 Vol. 19 No. 2 Hal. 93 – 104

DOI: https://doi.org/10.47599/bsdg.v19i2.492

Estimasi sumber daya mineral sangat penting dalam pertambangan khususnya dalam menentukan target produksi, design pit tambang, dan keputusan dalam investasi. Hasil estimasi sumber daya yang akurat akan memudahkan perencanaan tambang yang optimal. Objek pada penelitian ini ialah penerapan teknik estimasi yang memperhatikan geostatistik yaitu ordinary kriging dalam melakukan estimasi sumber daya endapan bauksit. Lokasi penelitian berada di busur laterit Kalimantan Barat. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui litologi pembentuk endapan bauksit, sebaran kadar, dan estimasi sumber daya bauksit serta jarak spasi sumur uji yang optimal sebagai dasar klasifikasi sumber daya di daerah penelitian. Data yang digunakan dalam melakukan estimasi berupa data eksplorasi dari 212 titik lokasi sumuran uji. Untuk mengetahui jenis litologi dilakukan analisis petrografi terhadap 4 empat sampel. Dari hasil penelitian diketahui litologi pembentuk endapan bauksit terdiri atas granodiorit, diorit kuarsa, dan granit. Endapan bauksit daerah penelitian dominan berasal dari granodiorit dengan kadar 〖"Al" 〗_"2" "O" _"3" tinggi, oleh karena itu karakteristik bauksit merupakan kaolinitic bauxite. Hasil estimasi sumber daya bauksit berdasarkan cut-off grade 〖"Al" 〗_"2" "O" _"3" >35%, 〖"RSiO" 〗_"2" <8%, dan 〖"TSiO" 〗_"2" ≤30% sebesar 722.720 ton washed bauxite, dengan kadar rerata 39,78% 〖"Al" 〗_"2" "O" _"3" , 〖3,73% "RSiO" 〗_"2" dan 25,05% 〖"TSiO" 〗_"2" , dengan faktor konkresi (concretion factor) 48,44%. Sumber daya washed bauxite dengan status tereka sebesar 146.962 ton, sumber daya tertunjuk sebesar 550.482 ton, dan sumber daya terukur 221.643 ton Berdasarkan perhitungan sill variogram diperoleh spasi jarak optimum sumur uji untuk eksplorasi bauksit di daerah penelitian dengan klasifikasi sumber daya tereka 100 m, tertunjuk 50 m dan terukur 25 m.

Kata kunci: Geostatistik, Ordinary Kriging, Bauksit, Estimasi Sumber Daya, Cutoff Grade

Husin Setia Nugraha[1], Dadan Wildan[2], dan Rina Wahyuningsih[1]
([1]Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, [2]Politeknik Energi dan Pertambangan (PEP) Bandung)

EVALUASI KELAYAKAN PROYEK DAN PERANKINGAN AREA PROSPEK PANAS BUMI KANDIDAT LOKASI PROGRAM GOVERNMENT DRILLING

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Agustus 2024 Vol. 19 No. 2 Hal. 105 – 120

DOI: https://doi.org/10.47599/bsdg.v19i2.431

Government drilling merupakan program pengeboran sumur eksplorasi panas bumi yang dilakukan menggunakan dana pemerintah. Untuk perencanaan program tersebut, perlu dilakukan pemilihan lokasi dengan membuat perangkingan kandidat lokasi-lokasi area prospek yang akan dikembangkan. Studi ini melakukan perangkingan dua puluh kandidat lokasi dalam program tersebut dengan menggunakan metode incremental internal rate of return atau IRR inkremental hasil perhitungan discounted cash flow (DCF). Tahapan dalam metode ini adalah penghitungan nilai dan kelayakan proyek

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Terbit : Agustus 2024 ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

berdasarkan parameter profitabilitas pada masing-masing area prospek; dan perhitungan dan perangkingan berdasarkan IRR inkremental. Hasil evaluasi kelayakan proyek, empat lokasi dinyatakan layak secara ekonomi berdasarkan nilai BCR>1, yaitu Area Nage, Gunung Galunggung, Bittuang dan Gunung Papandayan. Sedangkan berdasarkan nilai IRR (IRR≥MARR; dengan MARR=13,5%) dan NPV (NPV>0), dari keempat lokasi tersebut hanya dua lokasi yang dinyatakan layak secara finansial yaitu Area Nage dan Gunung Galunggung. Jadi dua lokasi yaitu Area Nage dan Gunung Galunggung dinyatakan layak secara ekonomi maupun secara finansial. Sedangkan berdasarkan implementasi metode IRR inkremental hasil perhitungan discounted cash flow (DCF), peringkat pertama sampai dengan peringkat keempat secara berturut-turur adalah Area Nage, Gunung Galunggung, Gunung Papandayan dan Bittuang. Berdasarkan hasil studi ini, direkomendasikan untuk melakukan evaluasi ulang kandidat lokasi-lokasi area prospek untuk program government drilling ini. Hal ini karena dari dua puluh kandidat lokasi tersebut, hanya empat lokasi (20%) yang dinyatakan layak secara ekonomi dan dua lokasi (10%) yang dinyatakan layak secara ekonomi dan finansial. Pemilihan lokasi yang tepat akan menjadi salah satu kunci keberhasilan dalam menjalankan program ini.

Kata kunci: Keekonomian Proyek Panas Bumi, Kelayakan Proyek Panas Bumi, IRR Inkremental, Program Government Drilling, Perhitungan Discounted Cash Flow (DCF)

Aisha Permatasari[1], S J Suprapto[1], Priatna[1], Tatik Handayani[2], dan Dedi Sunjaya[3]
([1]Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung, [2]Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, [3]PT Aneka Tambang)

GEOLOGI, MINERALOGI, DAN GEOKIMIA ENDAPAN BAUKSIT LATERIT DI DESA MUKTI JAYA, KABUPATEN SANGGAU, KALIMANTAN BARAT

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Agustus 2024 Vol. 19 No. 2 Hal. 121 – 130

DOI: https://doi.org/10.47599/bsdg.v19i2.477

Geologi Kalimantan Barat khususnya Kabupaten Sanggau terhampar luas batuan asam hingga intermediet yang berumur Kapur Bawah dengan kondisi tektonik yang stabil sehingga memenuhi persyaratan terbentuknya bauksit dengan skala yang ekonomis. Daerah penelitian berada di Desa Mukti Jaya, Kabupaten Sanggau, Provinsi Kalimantan Barat. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik geologi, mineralogi, dan geokimia endapan bauksit. Metodologi penelitian meliputi pemetaan geologi, sumuran uji (*test pit*), dan analisis laboratorium menggunakan metode XRF, XRD, petrografi, dan mineragrafi, serta analisis korelasi dan regresi kandungan unsur Al_2O_3, $RSiO_2$, dan $TSiO_2$. Sebanyak 390 sampel bauksit dianalisis XRF, lima sampel bauksit dianalisis XRD, empat sampel batuan dasar dan dua sampel bauksit dianalisis petrografi, dan dua sampel konkresi bauksit dianalisis mineragrafi. Berdasarkan hasil pemetaan geologi ditemukan batuan granodirit, diorit kuarsa, dan tonalit. Bauksit tersusun oleh mineral kuarsa, gibbsit, kaolinit, hematit, biotit, boehmit, goetit, diaspor, muskovit, plagioklas, klorit, dan magnetit. Dari hasil analisis XRF didapatkan kadar 16,63% s.d. 52,56% Al_2O_3; 14,5% s.d. 66,69% $TSiO_2$; 0,47% s.d. 10,2% $RSiO_2$; dan 3,56% s.d. 32,92% Fe_2O_3. Hasil analisis korelasi diperoleh tingkat hubungan yang sangat kuat dan berkorelasi negatif antara Al_2O_3 dengan $TSiO_2$, serta tingkat hubungan sangat rendah antara Al_2O_3 dengan $RSiO_2$. Dari hasil analisis regresi diperoleh $TSiO_2$ berpengaruh terhadap Al_2O_3, serta $RSiO_2$ tidak berpengaruh terhadap Al_2O_3.

Kata kunci: bauksit, reaktif silika, konkresi, oolitik, pisolitik, Mukti Jaya, Sanggau

Isyqi[1], Nugroho Imam Setiawan[2], dan Ferian Anggara[2]
([1]Pusat Riset Sumber Daya Geologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional, [2]Departemen Teknik Geologi, Universitas Gadjah Mada)

IDENTIFIKASI KANDUNGAN LITIUM PADA BATUAN FILIT KOMPLEKS LUK ULO, JAWA TENGAH

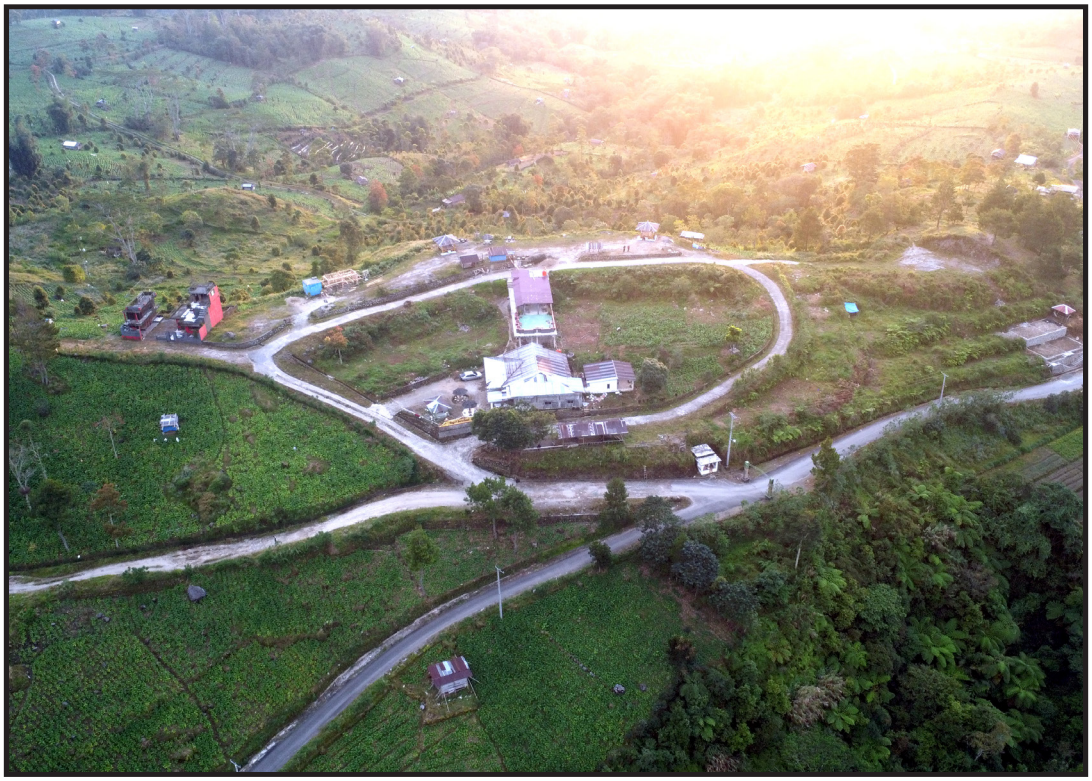
Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Agustus 2024 Vol. 19 No. 2 Hal. 131 – 146

DOI: https://doi.org/10.47599/bsdg.v19i2.470

Produksi baterai litium-ion di Indonesia akan lebih praktis jika Indonesia juga memiliki cadangan litium. Batuan metapelitik dapat menjadi salah satu material alternatif penghasil litium yang cukup potensial. Batuan filit yang termasuk dalam batuan metapelitik ditemukan tersingkap di Kompleks Luk Ulo, Jawa Tengah. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kandungan litium dan mineralogi batuan filit Kompleks Luk Ulo sebagai model analogi keterdapatan litium pada batuan sejenis. Metode yang digunakan meliputi survei lapangan, analisis petrografi, analisis XRD, dan analisis ICP AES/MS. Filit Kompleks Luk Ulo tersingkap pada beberapa lokasi, memiliki skitositas yang berkembang cukup baik dengan komposisi mineral utama berupa kuarsa, grafit, klorit, dan mika putih. Litium dalam filit Komplek Luk Ulo memiliki konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan konsentrasi rata-rata litium dalam kerak bumi yaitu merentang antara 18,2 *ppm* sampai dengan 84,7 *ppm*. Kandungan litium dalam batuan tersebut diinterpretasikan berkaitan dengan mineral mika putih karena litium dalam batuan filit berkorelasi positif dengan unsur-unsur pembentuk mineral mika putih yaitu unsur utama K_2O, CaO, Na_2O, MgO, dan Al_2O_3. Pengkayaan litium dalam batuan filit Kompleks Luk Ulo mencapai lima kali dibanding konsentrasi litium dalam kerak bumi. Sumber pengkayaan tersebut diperkirakan berasal dari *protolith* filit berupa batuan sedimen pelitik asal benua. Kandungan litium dalam batuan filit Kompleks Luk Ulo memungkinkan batuan tersebut menjadi bahan baku sumber litium, namun batuan tersebut tidak untuk dieksploitasi karena terletak di Kawasan Cagar Alam Geologi Karangsambung.

Kata kunci: Litium, Filit, Kompleks Luk Ulo, ICP AES/MS, Mika Putih



Area Camp Tim Lapangan Panas Bumi di Kabupaten Sinjai,
Provinsi Sulawesi Selatan (Eko Suryanto, 2024)



Morfologi Lapangan Panas Bumi di Kabupaten Sinjai, Provinsi Sulawesi Selatan
(Eko Suryanto, 2024)



Morfologi Lapangan Panas Bumi di Kabupaten Sinjai, Provinsi Sulawesi Selatan
(Eko Suryanto, 2024)



Morfologi Lapangan Panas Bumi di Kabupaten Sinjai, Provinsi Sulawesi Selatan
(Eko Suryanto, 2024)



Aliran Sungai yang Berada Diantara Perbukitan pada Lapangan Panas Bumi di Kabupaten Sinjai, Provinsi Sulawesi Selatan (Eko Suryanto, 2024)



Kegiatan Tim Geofisika Lapangan Panas Bumi di Kabupaten Sinjai, Provinsi Sulawesi Selatan (Eko Suryanto, 2024)



Kalibrasi Peralatan Gravity (Candra, 2024)



Kalibrasi Peralatan Seismik (Candra, 2024)



Kalibrasi Alat Geofisika MT (Candra, 2024)



Kalibrasi Drone (Candra, 2024)



Tambang Batubara Arutmin, Desa Senakin, Kabupaten Kota Baru, Provinsi Kalimantan Selatan (Soleh Basuki Rahmat, 2024)



Tambang Batubara Arutmin, Desa Senakin, Kabupaten Kota Baru, Provinsi Kalimantan Selatan (Soleh Basuki Rahmat, 2024)



Tambang Batubara Arutmin, Desa Senakin, Kabupaten Kota Baru,
Provinsi Kalimantan Selatan (Soleh Basuki Rahmat, 2024)



Persiapan Loging Untuk Pengukuran Temperatur Sumur di Kedalaman 160 meter
pada kegiatan Eksplorasi Landaian Suhu di Banda Baru, Provinsi Maluku (Joko, 2024)



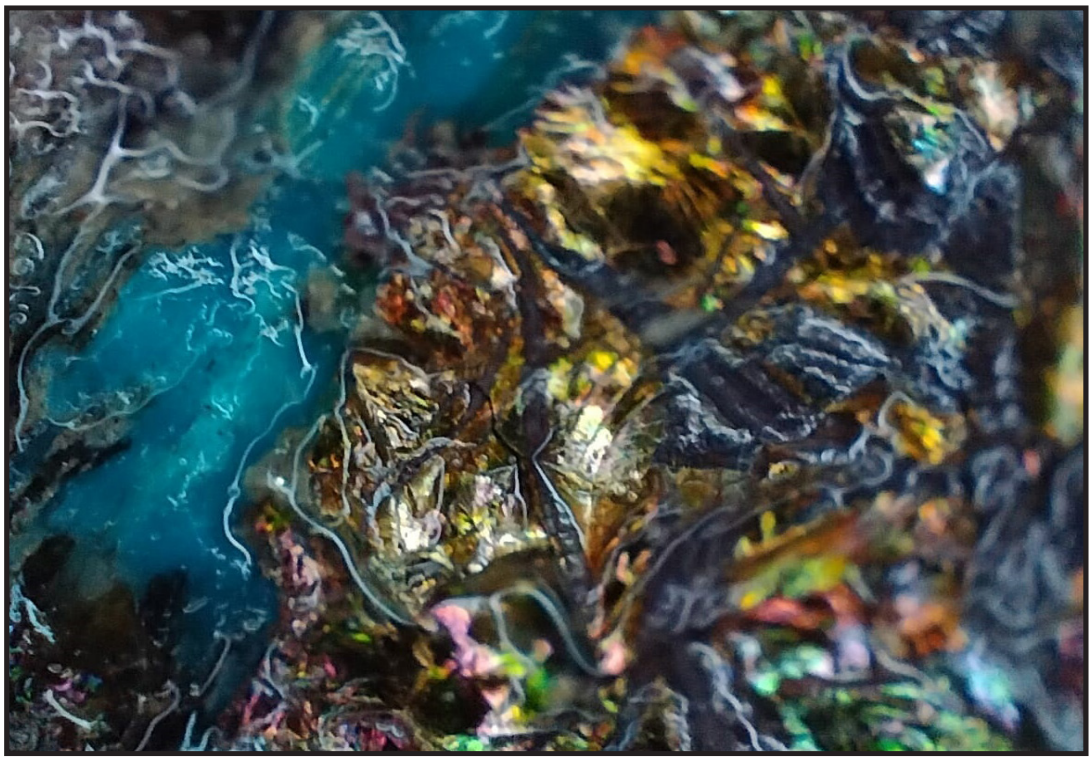
Proses Pemasangan Selubung 6 Inch Mesin Bor CS14
pada Kegiatan Eksplorasi Landaian Suhu di Banda Baru, Provinsi Maluku (Joko, 2024)



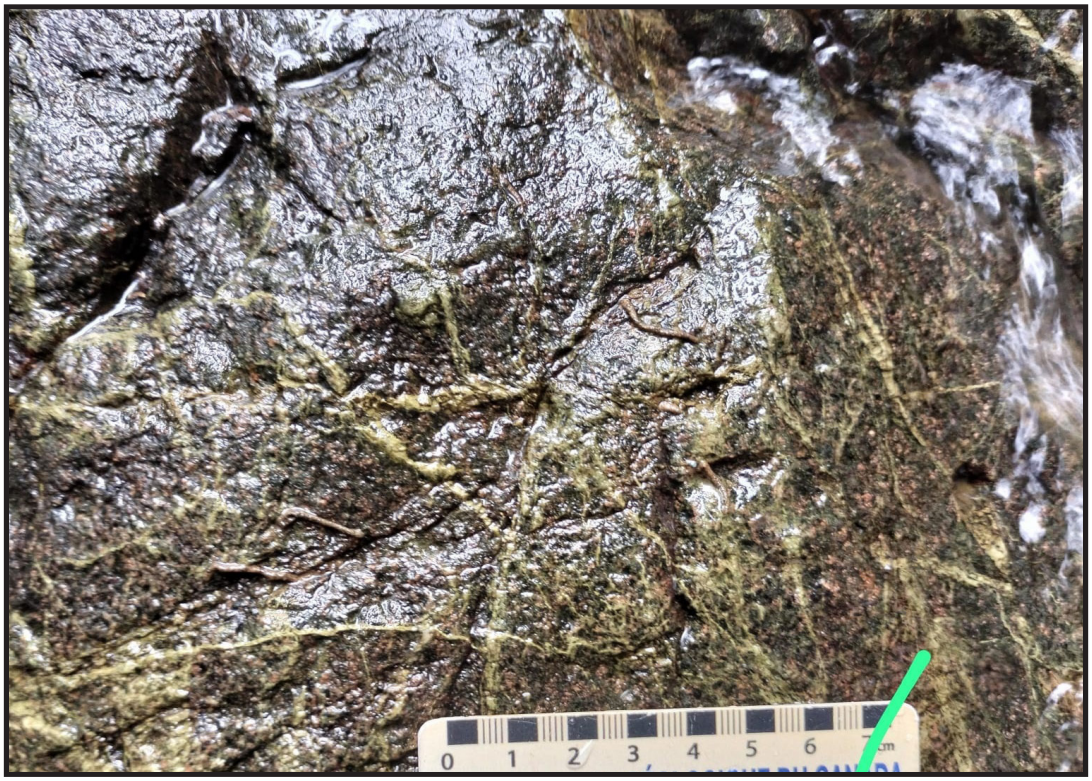
Proses Rig Up pada Kegiatan Eksplorasi Landaian Suhu di Banda Baru,
Provinsi Maluku (Joko, 2024)



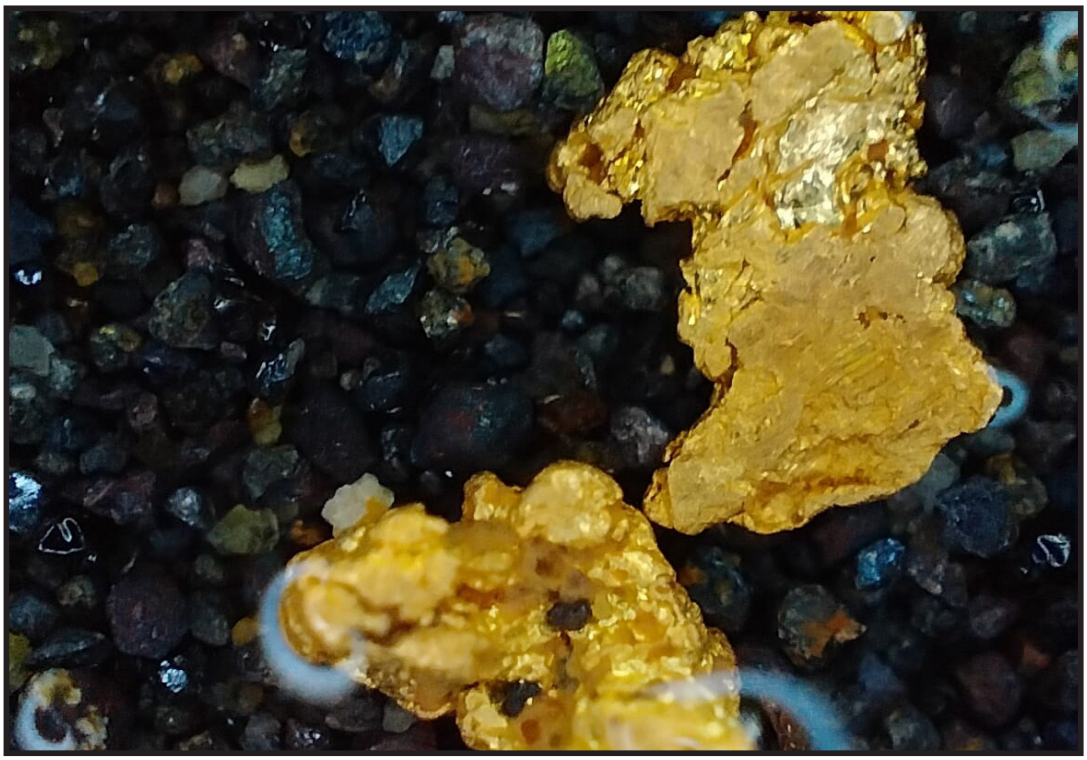
Kalkopirit Berassosiasi dengan Magnetit Merupakan Indikasi Mineralisasi Tembaga di Daerah Kabupaten Mandailing Natal (Edya Putra, 2022)



Krisokola Berassosiasi dengan Kalkopirit Merupakan Indikasi Mineralisasi Tembaga di Daerah Prospek Mineralisasi, Kabupaten Mandailing Natal (Edya Putra, 2022)



Klorit dan Stokwork Epidot pada Zona Ubahan Batuan Diorit
di Daerah Kabupaten Mandailing Natal (Edya Putra, 2022)



Nugget Gold di Daerah Mineralisasi, Kabupaten Mandailing Natal (Edya Putra, 2022)

PEDOMAN PENULISAN

Makalah/Karya Tulis Ilmiah
BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

ISI DAN KRITERIA UMUM

Naskah makalah/karya tulis ilmiah untuk publikasi di Buletin Sumber Daya Geologi dapat berupa artikel hasil penelitian, ulas balik (*review*) dan ulasan/tinjauan (*feature*) tentang geologi baik sains maupun terapan terutama berkaitan dengan tugas pokok dan fungsi Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi. Naskah yang diajukan belum pernah dipublikasikan atau tidak sedang diajukan pada publikasi lain.

Naskah ditulis dalam bahasa Indonesia atau Inggris sesuai kaidah masing-masing bahasa yang digunakan. Judul naskah ditulis dengan huruf besar (*capital*) di tengah atas halaman dan di cetak tebal (*bold*). Naskah harus selalu dilengkapi dengan Sari dalam bahasa Indonesia dan *Abstract* dalam bahasa Inggris. Kata-kata bahasa asing yang tidak dapat dialih bahasa/disadur dicantumkan dalam bentuk asli dan ditulis dengan huruf miring (*italic font*).

FORMAT

UMUM

Seluruh bagian dari naskah termasuk Sari, *Abstract,* judul tabel dan gambar, catatan kaki tabel, keterangan gambar dan daftar acuan diketik satu spasi dalam bentuk *electronic file* dan dicetak pada kertas HVS A4; menggunakan huruf Arial berukuran 11 *point*. Setiap lembar tulisan dalam naskah diberi nomor halaman dengan jumlah maksimum 15 halaman termasuk tabel dan gambar. Susunan naskah dibuat sebagai berikut:

NO	POKOK BAHASAN	POKOK PIKIRAN
I	**Judul** (*Title*)	Pada halaman judul makalah/karya tulis dicantumkan nama setiap penulis dengan jumlah penulis maksimum 5 orang, nama dan alamat institusi bagi masing-masing penulis; disarankan dibuat catatan kaki yang berisi nomor telepon, faxcimile serta email.
II	**Abstrak dan *Abstract***	Berisi ringkasan pokok bahasan lengkap dari keseluruhan isi naskah seperti latar belakang (yaitu berupa alasan ilmiah ataupun alasan keperluan penting mengapa tulisan ini dipublikasikan), obyek yang diteliti, permasalahan riset, tujuan riset, kegunaan hasil riset, metode yang digunakan dalam mencapai solusi riset tanpa harus memberikan keterangan terlalu rinci dari setiap bab, dengan jumlah maksimum 250 kata. Abstrak dicantumkan terlebih dahulu apabila naskah berbahasa Indonesia, sementara *Abstract* tercantum di bawah Abstrak; dan berlaku sebaliknya apabila naskah ditulis dalam bahasa Inggris. Disarankan disertai kata kunci/*keyword* yang ditulis di bawah Abstrak/*Abstract*, terdiri dari 4 hingga 6 kata. *Abstract* atau abstrak yang ditulis di bawah abstrak atau *abstract* menggunakan *italic font*.

III	**Pendahuluan** *(Introduction)*	Bab ini dapat berisi latar belakang (alasan ilmiah dan maksud penelitian fenomena aktual bermasalah sebagai tema sentral penelitian), masalah aktual yang perlu solusi, pengantar tentang profil wilayah/lokasi kajian/riset, tujuan penelitian, spesifik, metode riset, hipotesis (kalau ada) dengan gaya bahasa lebih populer dengan bab dan sub-bab tidak perlu menggunakan nomor. Bab berisi pernyataan yang mencukupi sehingga pembaca dapat memahami dan mengevaluasi hasil penyelidikan/penelitian yang berkaitan dengan topik makalah/karya tulis.
IV	**Metodologi** *(Methodology)*	Metode yang digunakan harus spesifik dan jelas, mencakup uji-uji hipotesis atau model-model uji statistik, dapat menghimpun data primer/*sampling*, cara pengukuran dan komputasi.
V	**Hasil dan Pembahasan** (*Results and Discussion*)	Berisi hasil-hasil penyelidikan/penelitian yang disajikan dengan tulisan, tabel, grafik, gambar maupun foto diberi nomor secara berurutan. Hindarkan penggunaan grafik secara berlebihan apabila dapat disajikan dengan tulisan secara singkat. Pencantuman foto atau gambar tidak berlebihan dan hanya mewakili hasil penemuan. Semua tabel, grafik gambar dan foto yang disajikan harus diacu dalam tulisan dengan keterangan yang jelas dan dapat dibaca. *Font* huruf/angka untuk keterangan tabel, gambar dan foto berukuran minimum 6 *point.* Berisi tentang analisis/interpretasi dan bahasan singkat mengenai penjabaran hasil verifikasi/validasi yang ditekankan kepada kejelasan penelitian, keterlibatan aneka variabel dan peristiwa atau produk dari penelitian tersebut.
VI	**Kesimpulan dan Saran** (*Conclusions and Recommendation*)	Berisi kesimpulan dan saran dari hasil uji hipotesis tentang penelitian, dan berisi segitiga konsistensi (masalah, tujuan dan kesimpulan).
VII	**Ucapan Terima Kasih** (*Acknowledgements)*	Dapat digunakan untuk menyebutkan sumber dana penyelidikan/penelitian dan untuk pernyataan penghargaan kepada institusi atau orang yang membantu dalam pelaksanaan penyelidikan/penelitian dan penulisan makalah/karya tulis.
VIII	**Acuan** (*References*)	Acuan ditulis dengan menggunakan sistem nama tahun, nama penulis/pengarang yang tercantum didahului oleh nama akhir (*surname*), disusun menurut abjad dan judul makalah/karya tulis ditulis dengan huruf miring (*italic font*)

Beberapa contoh penulisan sumber acuan:

Jurnal

Harvey, R.D. dan Dillon, J.W., 1985. *Maceral distribution in Illinois cals and their palaeoenvironmental implication*. International Journal of Coal Geology, 5, h.141-165.

Buku

Petters, W.C., 1987. Exploration and Mining Geology. John Willey & Sons, New York, 685 h.

Bab dalam Buku

Chen, C.H., 1970. Geology and geothermal power potential of the Tatun volcanic region. Di dalam : Barnes, H.L. (ed.), 1979. Geochemistry of hydrothermal ore deposits, 2nd edition, John Wiley and Sons, New York, h.632-683.

Prosiding

Suwarna, N. dan Suminto, 1999. *Sedimentology and Hydrocarbon Potential of the Permian Mengkarang Formation, Southern Sumatera*. Proceedings Southeast Asian Coal Geology, Bandung.

Skripsi/Tesis/Disertasi

DAM, M.A.C., 1994. The Late Quarternary evolution of The Bandung Basin, West Java, Indonesia. Ph.D Thesis at Dept. of Quarternary Geology Faculty of Earth Science Vrije Universitet Amsterdam, h.1-12.

Informasi dari Internet

Cantrell, C., 2006. Sri Lanka's tsunami drive blossom : Local man's effort keeps on giving.Http://www.boston.com/news/local/articles/2006/01/26/sri_lankas_tsunami_ Drive_blossoms/[26 Jan 2006].

Wewenang Redaksi

- Redaksi berwenang penuh melakukan penyuntingan atas naskah yang akan dipublikasikan tanpa mengubah subtansi isi naskah.
- Redaksi mempunyai hak dan wewenang penuh untuk menolak naskah dengan isi dan format yang tidak sesuai dengan pedoman penulisan Buletin Sumber Daya Geologi dan tidak berkewajiban untuk mengembalikan naskah tersebut.

Pengiriman Naskah

Penulis dimohon untuk mengirimkan 1 eksemplar naskah asli baik *hardcopy* maupun *softcopy* kepada:

Sekretariat Buletin Sumber Daya Geologi
Bagian Umum, Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
Jalan Soekarno Hatta No. 444 Bandung, 40254
Telepon. (022) 520 2698, 522 6270
Fax. (022) 522 6270, 522 6263
Email: buletinpsdg@gmail.com
OJS: http://buletinsdg.geologi.esdm.go.id

Semua tulisan yang ada dalam **Buletin Sumber Daya Geologi** bukan merupakan cerminan sikap dan atau pendapat **Dewan Redaksi Buletin Sumber Daya Geologi**.
Tanggung jawab terhadap isi atau akibat dari tulisan tetap terletak pada penulis.

SERTIFIKAT

Kementerian Riset dan Teknologi/
Badan Riset dan Inovasi Nasional

RISTEK-BRIN

Petikan dari Keputusan Menteri Riset dan Teknologi/
Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional
Nomor 200/M/KPT/2020
Peringkat Akreditasi Jurnal Ilmiah Periode III Tahun 2020
Nama Jurnal Ilmiah

Buletin Sumber Daya Geologi

E-ISSN: 25801023

Penerbit: Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral
Ditetapkan sebagai Jurnal Ilmiah

TERAKREDITASI PERINGKAT 2

Akreditasi Berlaku selama 5 (lima) Tahun, yaitu
Volume 15 Nomor 2 Tahun 2020 sampai Volume 20 Nomor 1 Tahun 2025

Jakarta, 23 Desember 2020
Menteri Riset dan Teknologi/
Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional
Republik Indonesia,

Bambang P. S. Brodjonegoro

Alamat Redaksi
Buletin Sumber Daya Geologi
Bagian Umum, Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi
Jalan Soekarno Hatta No. 444 Bandung 40254
Tel. (022) 522 6270, 520 2698, Fax: (022) 522 6263
Website : https://geologi.esdm.go.id/psdmbp
OJS: https://buletinsdg.geologi.esdm.go.id
Email: buletinpsdg@gmail.com

ISSN 1907-5367
9 771907 536770

eISSN 2580-1023
9 772580 102009